# МИНИСТЕРСТВО Т<u>РАНСПОРТ</u>А И СВЯЗИ УКРАИНЫ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АДМИНИСТРАЦИЯ СВЯЗИ ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СВЯЗИ ИМ. А. С. ПОПОВА

Т. В. МАКАРОВ

# К О Г Е Р Е Н Т Н Ы Е ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

УЧЕБНИК

по дисциплине

**«КОГЕРЕНТНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ** ПЕРЕДАЧИ"

для студентов и магистрантов специальностей 7.092401 и 7.092402

ОДЕССА 2009

#### Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук, проф. **И.М. Викулин, О**НАС им. А. С. Попова, доктор тех.наук, проф. **В.А. Балашов,** Одесский НИИ связи, доктор физ.-мат. наук, проф. **Курмашев Ш.Д.,** Одесский НУ им. И.И. Мечникова

# Отв. ред. доктор техн. наук проф. П.П. Воробиенко

**Макаров Т. В.** Когерентные волоконно-оптические системы передачи : Учебник / Макаров Т. В. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2009. – 220 с.

#### ISBN 978-966-7598-38-9

Рассмотрены состояние и тенденции развития современной когерентной волоконно-оптической связи, формирование, передача и обработка больших массивов информации, принципы построения и функционирования полностью оптической сети связи, спектральное, временное и поляризационное мультиплексирование оптических цифровых сигналов и их оптическая коммутация по таким сетям. Описаны основные компоненты оптических систем и сетей. Приведены ограничения, накладываемые нелинейными эффектами, на максимально допустимые значения передаваемой мощности в оптических каналах. Описаны некоторые компоненты ВОСП, принципы работы которых основаны на рассмотренных нелинейных эффектах.

Рассчитано на магистрантов и студентов последнего года обучения по специальности «Телекоммуникации».

Гриф присвоен Министерством транспорта и связи Украины. Письмо № 6778/23/ 14- 08 от 22.09.2008 г.

> © Макаров Т. В., 2009 © ОНАС им. А. С. Попова, 2009

ISBN 978-966-7598-38-9

Успехи в области разработки и производства сверхширокополосных кабелей, одномодовых оптических волокон И волоконно-оптических усилителей, одномодовых и "одночастотных" лазерных полупроводниковых излучателей, оптических мультиплексоров/демультиплексоров, транспондеров, оптических коммутаторов, конвертеров и других оптических устройств привели к массовому использованию когерентных волоконно-оптических систем передачи как в одноканальном, так и многоканальном режимах передачи со спектральным, временным и поляризационным оптическим мультиплексированием, сверхдлинных глобальных волоконно-оптических линий передачи и полностью оптических сетей связи, по которым передаются, преобразуются и коммутируются колоссальные потоки информации на оптическом уровне. На таких транспортных сетях нашли применение оптические мультиплексоры ввода/вывода оптических каналов и волоконнооптические квантовые и рамановские усилители, способные усиливать до 330 спектрально и поляризационно мультиплексированных оптических каналов, составляющих суммарную информационную емкость до 14 Тбит/с, на длинах усилительных участков до 100 и более километров с дальностью без регенерационной передачи 500...1000 км и более в спектре длин волн 1260...1675 нм.

В настоящее время обработка оптических сигналов чаще всего осуществляется непосредственно в канале передачи. Поэтому оптические методы на практике применяются как для непосредственной передачи информации, так и для одновременной ее обработки. Создание оптических интегральных схем (ОИС) имеет первостепенное значение для дальнейшего развития ВОСП. По аналогии с интегральными схемами микроэлектроники, под ОИС понимается устройство, выполненное на общей подложке (чипе) и операцию (или набор операций) осуществляющее по обработке ОИС информационных оптических сигналов. Основное отличие ОТ традиционных интегральных схем микроэлектроники состоит в том, что носителем информации в этом случае является оптическое излучение, распространяющееся в различного типа оптических волноводах ОИС, и для информационных обработки сигналов используются соответственно оптические методы на основе различных физических явлений в твердом теле. ОИС позволяют часто решать задачи, недоступные традиционной микроэлектронике, и одновременно расширять ее возможности. В ВОСП нашли применение также гибридные интегральные схемы, в которых на единой подложке укладываются как световоды, так и металлические токопроводники, по которым протекают токи, управляющие процессами.

В оптических методах обработки сигналов в световодном тракте используются как преимущества оптического канала передачи информации (возможность параллельной обработки, высокое быстродействие, помехоустойчивость и т. п), так и достоинства, присущие собственно ОИС

3

(высокая надежность и компактность, малая потребляемая мощность, возможность монолитного интегрального исполнения).

Основные вопросы создания, передачи, объединения, разделения и обработки больших массивов информации на оптическом уровне нашли освещение в данном учебнике, являющемся обобщением лекционного курса «Когерентные ВОСП», читаемого автором на протяжении ряда лет магистрантам и студентам факультета «Телекоммуникационные системы и сети», специализирующимся в области волоконно-оптических систем передачи. В равной мере он может удовлетворять интересы инженеров и научных работников, занимающихся этой областью знаний.

Автор с благодарностью примет замечания и пожелания, которые просит направлять по адресу:

65029, Одеса, ул. Кузнечная, 1, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова, кафедра ВОЛС.

Автор

# Основные определения и сокращения

# Русскоязычные

AOB – активное (накаченное) оптическое волокно, легированное атомами редкоземельных элементов

АПЧ – автоматическая подстройка частоты

АРУ – автоматическая регулировка уровня

БВОУ – бустерный (волоконно-оптический усилитель мощности)

ВКР – вынужденное комбинационное рассеяние Рамана

ВЛ – волоконный лазер

BM – временное мультиплексирование (OTDM)

ВОЛП – волоконно-оптическая линия передачи

ВОСП – волоконно-оптическая система передачи

ВОСП-МК – многоканальная ВОСП

ВОСП-ОК – одноканальная ВОСП

ВОСП ВРК – ВОСП с временным разделением оптических каналов

ВОСП ПРК – ВОСП с поляризационным разделением каналов

ВОСП СРК – ВОСП со спектральным разделением оптических каналов

ВР – внешний резонатор лазера

ВРМБ – вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна

ВтАХ – ватт-амперная характеристика источника излучения

ГЛОС – групповой линейный оптический сигнал

ДР – дифракционная решетка (структура)

КВОУ – квантовый волоконно-оптический усилитель, легированный редкоземельными химическими элементами (эрбием, тулием, иттербием и др.)

ЛД – лазерный диод

МДС – многослойная диэлектрическая структура

МИ – модуляция интенсивности (мощности)

МСС – модулятор на связанных световодах (двухканальный)

НО – направленный ответвитель

ОВ – оптическое волокно

ОД – оптический демультиплексор

ОИС – оптическая интегральная схема

ОК – оптический кабель

ОМ – оптический мультиплексор

ОМВ/В – оптический мультиплексор ввода/вывода

ОМОВ – одномодовое оптическое волокно

ОУ – оптический усилитель

ОФ – оптический фильтр

ПМ – поляризационное мультиплексирование (PDM)

ПОМ – передающий оптический модуль

ПОС – полностью оптическая сеть

ПП – показатель преломления

ПРОМ – приемный оптический модуль

ПСМ – плотное спектральное мультиплексирование (DWDM)

РБО – распределенное брэгговское отражение в лазере (DBR)

РВОУ – рамановский (ВКР) волоконно-оптический усилитель

РЛН – рамановский лазер накачки

РОС – разъемный оптический соединитель

РОС – распределенная обратная связь в лазере (DFB)

РСМ – разреженное спектральное мультиплексирование (CWDM)

с/ш – отношение средних значений оптических мощностей с/ш

СВ – световод (полосковый или волоконный)

СМ – спектральное мультиплексирование (WDM)

- СОВ спирально изогнутое ОВ (спиральное ОВ)
- СЦИ синхронная цифровая иерархия
- УБВ полупроводниковый оптический усилитель бегущей волны
- УФП полупроводниковый оптический усилитель Фабри–Перо

ФД – фотодиод

ФКМ – фазовая кросс-модуляция (перекрестная)

ФСМ – фазовая самомодуляция

ШСЛ – ширина спектральной линии излучения ЛД

ЭАМ – электроабсорбционный модулятор

# Англоязычные

ALS (Automatic Laser Shutdown) – автоматическое отключение лазера

AON (All Optical Network) – полностью оптическая сеть

АРС – автоматический поляризационный контроллер

ASE – Amplification of Spontaneous Emission (усиление спонтанного излучения)

ATM (Asynchronous Transfer Mode) – режим асинхронной передачи

AWG (Array Waveguide Grating) – волоконная дифракционная решетка

BER (Bit-Error Rate) – коэффициент ошибок

BPF – перестраиваемый оптический фильтр

CS-RZ – кодирование

CWDM (Coarse WDM) – грубое, разреженное спектральное мультиплексирование

DBR (Distributed Bragg Reflection Laser) – лазер с распределенным брэгговским отражением

DFB (Distributed Feedback Laser) – лазер с распределенной обратной связью

DCF (Disperssion-Compensating Fiber) – волокно, компенсирующее дисперсию (с отрицательной дисперсией)

DWDM (Dence WDM) – плотное мультиплексирование по длинам волн (частотам) ПСМ

ECL (External Cavity Laser) – лазер с внешним резонатором

EML (External Modulation Laser) – ПОМ (лазер) с внешней модуляцией Er – химический элемент эрбий

ETDM MUX/DEMUX – электронный временной мультиплексор/ демультиплексор

- GaAs арсенид галлия, кристалл
- Ge химический элемент германий
- GeO<sub>2</sub> химическая формула двуокиси германия
- HE<sup>o</sup><sub>11</sub>,HE<sup>e</sup><sub>11</sub> основные моды ОМОВ, обыкновенная (ordinare) и необыкновенная (extraordinare)
- IP (Internet Protocol) протокол Интернета
- LiNbO<sub>3</sub> ниобат лития (кристалл)
- LP<sub>01</sub> первая в порядке возбуждения линейно-поляризованная волна в ОВ
- MPI-R точка нормирования (измерения) интерфейса на приеме
- MPI-S то же, на передаче
- МZМ модулятор Маха–Цендера
- NRZ (Non Return to Zero) кодирование без возврата к нулю
- NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Singlemode Fiber) ОМОВ со смещенной ненулевой дисперсией
- OTDM (Optical Time Division Multiplexing) оптическое временное мультиплексирование
- PBS поляризационный мультиплексор (сумматор)
- PC (Physical Contact) физический контакт в оптических соединителях
- PM coupler волоконно-оптический ответвитель

RFTS (Remote Fiber Test System) – система дистанционного испытания волокон Si – химический элемент кремний

- SiO<sub>2</sub> химическая формула кварца (кристалла или чистого кварцевого стекла)
- SF (Standard Fiber) стандартное OB
- SFM (Self-Phase Modulation) самомодуляция (нелинейный эффект)
- SLM (single Mode Laser) лазер с одной продольной модой
- SMN (SDH Management Network) система управления СЦИ
- SNMP (Simple Network Management Protocol) простой протокол управления сетью
- Splitter оптический разветвитель
- TMN (Telecommunication Management Network) сеть управлениятелекоммуникациями, сеть управления электросвязью
- Tm химический элемент тулий
- MLM (Multi Mode Laser) лазер со многими продольными модами
- WDM (Wavelength Division Multiplexing) мультиплексирование по длинам волн (частотам), или спектральное мультиплексирование
- Yb химический элемент иттербий
- ZDSF (Zero Dispersion Shifted Singlemode Fiber) ОМОВ со смещенной нулевой дисперсией).

# 1 КОГЕРЕНТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ, СИГНАЛЫ И СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Гармоническая плоская волна в изотропном однородном пространстве в декартовой системе координат, распространяющаяся вдоль оси *z*, определяется в виде (при временной зависимости е  $+i\omega t$ ):

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x, y) \cos(\omega t - kz + \varphi);$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(x, y) \cos(\omega t - kz + \varphi),$$
(1.1)

где  $k = k_0 n$  – волновое число в среде с показателем преломления n;  $k_0$  – волновое число в вакууме;  $E_0(x, y)$ ,  $H_0(x, y)$  – произвольные функции распределения напряженностей электрического и магнитного полей в плоскости поляризации xy, перпендикулярной направлению z распространения волн. Две плоские гармонические волны типа (1.1) одинаковой амплитуды и частоты, распространяясь в одном направлении z в анизотропной среде, могут быть сдвинуты во времени. В точке z в момент времени t их электрические  $\vec{E}$  и магнитные  $\vec{H}$  поля будут иметь разные величины и направления. В этом случае говорят, что волны обладают различными фазами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Разность фаз  $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  во всех точках пространства в любой момент времени будет постоянна, если частоты равны и среда распространения изотропна и однородна и стационарна, т. е n(t) = const. Кроме амплитуды, частоты и фазы, волны характеризуются поляризацией, т. е направлением  $\vec{E}$  в плоскости xy. Отсюда следует определение.

Если амплитуда, частота, фаза, направление распространения и поляризация электромагнитной волны постоянны или изменяются, но не хоатически, а упорядоченно, по определенному закону, то такая волна называется к о г е р е н т н о й.

Строго монохроматическая волна всегда когерентна, однако таких волн в природе не существует. Любой физически реализуемый источник излучения, используемый в КВОСП, как правило лазер, всегда генерирует некоторую полосу частот  $\Delta \omega = 2\pi f$ . Чем уже полоса частот  $\Delta f$ , тем ближе его колебания к когерентным. На практике требования к максимально допустимой ширине спектра излучения лазеров зависят от способа обработки информационного сигнала как на передаче, так и на приеме, спектра частот, отводимого для передачи модулированной оптической несущей в линии, а также от качества передаточных характеристик волоконно-оптического тракта. В частности, при гетеродинном приеме цифровых амплитудно-, частотно-И фазомодулированных сигналов отношение  $\Delta f_{\rm H}/B$  должно составлять  $10^{-2}$  ...  $5\cdot 10^{-3}$ , где  $\Delta f_{\rm H}$  – ширина спектра излучения лазера (оптической несущей), МГц; В – скорость передачи информации, Мбит/с [4]. При прямом детектировании оптических сигналов полоса частот излучения лазера, преимущественно,

лимитируется допустимым значением хроматической дисперсии на регенерационном участке и обычно бывает больше вышеуказанной величины.

Из ограниченности полосы частот источника излучения возникает понятие взаимной когерентности волн и сигналов. Взаимная когерентность двух немонохроматических волн, переносящих сигналы, означает, что они обладают одинаковым набором частот, а разность фаз любых пар равных частот этого набора постоянна во времени и пространстве. Таким условиям взаимной когерентности для неискаженной передачи должны отвечать цифровые посылки сигналов, переносимых оптической когерентной несущей. Величину  $\Delta f_{\rm H}$  (технически, но не физически) можно трактовать как временную нестабильность генерации несущего колебания  $f_{\rm H}$ . Указанную нестабильность, и даже меньшую, могут обеспечить только лазеры. Теоретически это значит, что в спектре частот 0...  $f_{\rm H}$  в одномодовом режиме передачи методом спектрального мультиплексирования можно разместить сотни телевизионных программ и многие тысячи телефонных каналов в полосе оптических частот

$$\Delta f \le f_{\rm H} \approx c \,/\, n \,\,\lambda,\tag{1.2}$$

где c – скорость света в вакууме;  $\lambda$  – длина волны когерентного излучателя; n – показатель преломления среды распространения, удовлетворяющей условию когерентности. Если разность фаз двух колебаний меняется достаточно медленно, то говорят, что колебания остаются когерентными в течение некоторого времени, пока их разность фаз не достигает величины  $\pi$ .

Можно также сравнивать фазы одного и того же немонохроматического колебания в разные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , разделенные интервалом  $\tau = t_1 - t_2$ . Если немонохроматичность колебания проявляется в беспорядочном, случайном изменении во времени его фазы, то при некотором  $\tau$  оно может достичь величины  $\pi$ . Время  $\tau$  называется *временем когерентности*, а расстояние, которое проходит волна за время  $\tau$ , называется *длиной когерентности*. Учитывая возможную связь амплитуды и фазы в таких колебаниях, можно сказать, что  $\tau$  – это время между случайными изменениями амплитуд или фаз. Величина  $\tau$  может носить случайный характер во времени и пространстве (в случае нестационарной среды распространения, например в атмосфере).

Все сказанное справедливо для плоской волны. Но идеально плоской волны в природе не существует. В реальных волнах амплитуды и фазы меняются не только в направлении распространения, но и в плоскости, перпендикулярной этому направлению распространения. Если есть случайное изменение разности фаз в двух точках, расположенных в этой плоскости, то оно увеличивается с увеличением расстояния между ними. Когерентность колебаний в этих точках ослабевает и исчезает на некотором расстоянии l, когда случайные изменения разности фаз становятся близкими к ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) $l \approx \pi$ , где  $\varphi_1(t)$  и  $\varphi_2(t)$  являются функциями времени. Для описания когерентности

9

волны в направлении, перпендикулярном направлению распространения, применяют название *пространственная когерентность*. Таким образом, *когерентность волны* – это наличие связи, согласованности между фазами колебаний световых волн в различных точках пространства в один и тот же момент времени или между фазами колебаний в одной и той же точке пространства в различные моменты времени.

Следовательно, подытоживая вышеизложенное, можно ввести понятие когерентности ВОСП (одноканальной или многоканальной) как совокупности активных и пассивных оптических устройств (аппаратурных и линейных), предназначенных для передачи больших массивов информации на большие расстояния с высокой скоростью по одномодовым однополяризационным оптическим волокнам с помощью когерентных оптических сигналов, представляющих собой модулированные несущие когерентные колебания лазерных передающих оптических модулей. Такие ВОСП в сочетании с оптическими мультиплексорами/демультиплексорами позволяют полностью реализовать высокую информационную пропускную способность ОМОВ в окнах его прозрачности путем оптического спектрального, временного или поляризационного мультиплексирования, а также их сочетания.

# 2 ТРЕБОВАНИЯ ПО КОГЕРЕНТНОСТИ К КОМПОНЕНТАМ И СИГНАЛАМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА

Любой волоконно-оптический тракт состоит из трех основных функциональных компонентов: передающего оптического модуля (ПОМ), двух, преимущественно оптических волокон и приемного оптического модуля (ПРОМ). Нарушение когерентности волн и сигналов может наблюдаться в любом из указанных компонентов.

1 В качестве источника оптического излучения (оптической несущей) в ПОМ используются полупроводниковые лазерные диоды (ЛД), которые по полосковыми световодными устройствами. существу являются Лля обеспечения когерентности генерация ЛД должна быть одномодовой с узкой спектральной линией излучения (полосой частот), которая зависит от токовой и температурной нестабильности работы ПОМ. Для этого в ПОМ предусматриваются устройства стабилизации тока накачки и температуры ЛД [2]. Одномодовый режим генерации ЛД неустойчив из-за встречного светового потока, приходящего с линии вследствие переотражений на Из-за наблюдаются неоднородностях. ЭТОГО перескоки генераиии ЛД (см. п. 3.3). Для устранения этого отрицательного явления на выходе лазера включается оптический вентиль (изолятор) [2]. Целесообразно при этом функции генерации и модуляции в ПОМ разделить так, чтобы оптическая несущая модулировалась во внешнем по отношению к ЛД модуляторе.

2 Оптические волокна (OB), как и полосковые световоды всего оптического тракта, для обеспечения когерентности должны работать в одномодовом режиме передачи. При этом в ОМОВ распространяются фактически две взаимно-ортогональные волны НЕ<sub>11</sub>. Одномодовые оптические волокна укладываются в оптический кабель (ОК) по спиральным линиям. ОК изгибается при укладке на местности. В результате в ОМОВ возникают условия распространения взаимоортогональных анизотропные необыкновенной HE<sup>e</sup><sub>11</sub> и обыкновенной HE<sup>o</sup><sub>11</sub> волн, приводящие к нарушению взаимной когерентности распространяющихся сигналов, к поляризационной их дисперсии (см. пп. 5.3.3 и 5.3.4). Для устранения указанных явлений необходимо в общем обеспечить меры по поддержанию единого времени распространения "взаимноортогональных" сигналов и устойчивой поляризации распространяющихся HE<sup>e</sup><sub>11</sub> и HE<sup>o</sup><sub>11</sub> волн вдоль всего волоконно-оптического тракта.

3 Фотоприемные устройства прямого детектирования при вышеуказанных нарушениях когерентности по пп. 1 и 2 сами по себе не могут обеспечить когерентного приема сигналов при высоких скоростях передачи и мультиплексировании. Однако, устранив причины нарушения когерентности волн по пп. 1 и 2, можно при прямом детектировании сигналов обеспечить значительные длины усилительных и регенерационных участков при заданной величине вероятности ошибки.

11

Адаптивные к изменению поляризации принимаемых сигналов гетеродинные приемные устройства (см. п. 7. 6.2.3) являются более чувствительными – на 20...25 дБ – по сравнению с приемными устройствами прямого детектирования, однако они существенно дороже последних.

Проблему нестабильности поляризации принимаемых с линии сигналов фотоприемные частично способны решать также устройства С разделением пространственным оптических сигналов no поляризации, независимым их детектированием и последующим их суммированием после необходимой временной задержки одного их них.

4 Для эффективного использования полосы частот, как правило, в третьем и четвертом окнах прозрачности ОМОВ, при выполнении условий передачи можно осуществлять оптическое когерентной спектральное мультиплексирование сигналами нескольких одноканальных ВОСП ОК. Для этой цели необходимы высокостабильные когерентные перестраиваемые по транспондеры, оптические частоте лазеры, мультиплексоры/ демультиплексоры, фильтры, оптические усилители, оптические конвертеры, оптические коммутаторы и другие устройства объединения и разделения систем передачи по частоте (ВОСП СРК).

5 При спектральном мультиплексировании OMOB возможна энергетическая перегрузка его материала, при которой показатель преломления его приобретает нелинейные свойства, приводящие к частотным преобразованиям как внутри оптических каналов, так и между ними. (см. п. 9). Поэтому для линейной передачи групповых оптических сигналов необходимо ограничивать суммарную их оптическую мощность, вводимую в волокно. Это значит, что необходимо чаще размещать оптические усилители в волоконнооптическом тракте передачи или использовать ОМОВ с увеличенным сечением одномодового распространения. Такое ограничение поля накладывает нелинейность показателя преломления волокна, т. е. зависимость его от суммарной величины распространяющейся по волокну оптической мощности.

6 Однако повышенная перегрузка ОМОВ может приводить при определенных условиях к отрицательной нелинейной дисперсии оптического импульсного сигнала, В результате чего его ллительность может самоограничиваться до единиц пикосекунд и образовываться солитон, т. е. такой нелинейный импульсный сигнал, который не претерпевает дисперсии, не реагирует на неоднородности в одномодовом ОВ. На солитон воздействуют только потери в тракте передачи и энергия, сосредоточенная в нем. Таким образом, открывается новый путь к созданию сверхскоростных ВОСП по одномодовым ОВ.

# Контрольные вопросы

- 1 Почему с увеличением полосы частот оптической несущей когерентность ослабевает и может даже нарушаться?
- 2 Назовите, какие признаки когерентности при этом могут не удовлетворяться?

- 3 Почему одним из пределов существования когерентности волны является разность фаз, равная π?
- 4 Нарисуйте распределение напряженности электрического поля волны *HE*<sub>11</sub> в поперечном сечении световода при нарушении пространственной когерентности.
- 5 Будет ли когерентной передача оптического сигнала в многомодовом световоде?
- 6 Какие признаки когерентности оптического сигнала нарушаются при этом?
- 7 При каких условиях будет некогерентной передача сигналов в одномодовом световоде? Перечислите их.

# 3 ИСТОЧНИКИ КОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Когерентными называются такие источники, которые излучают когерентные (синфазные) волны (см. п. 1). Такими источниками в ВОСП являются полупроводниковые и волоконные лазеры. В основе их работы лежит спонтанное излучение полупроводникового светодиода или активного волокна, охваченных объемными резонаторами.

# 3.1 Спонтанное излучение

Как известно ИЗ квантовой значения приобретаемой механики. электронами энергии не являются непрерывными, а носят дискретный характер. Дискретность энергетических состояний дает основание говорить, что электрон находится на том или ином энергетическом уровне –  $W_2$  или  $W_1$ . В полупроводниках многочисленные энергетические уровни расположены плотно, образуя зоны. Имеется два типа таких зон: верхняя – зона проводимости с энергией  $\Delta W_2$  и нижняя – зона валентности с энергией  $\Delta W_1$ . На рис. 3.1 показаны некоторые переходы между уровнями 2 и 1. При переходе энергии наибольшей величины, 1 излучается квант при переходе 3 – наименьший. Соответственно будут различаться и частоты излучения; переход 1 сопровождается излучением наибольшей частоты, переход 3 – наименьшей. Излучаемая (поглощаемая –  $\omega_{12}$ ) такой квантовой системой мощность максимальна на частоте Бора:

$$\omega_{21} = (W_2 - W_1)/h = -\omega_{12}, \tag{3.1}$$

где h – постоянная Планка (1,05·10<sup>-34</sup> Дж·с), поскольку плотность распределения частиц по энергиям  $dN_i/dW$  максимальна для значений  $W_2$  и  $W_1$  и убывает по обе стороны от этой частоты (рис. 3.2). Зависимость мощности излучения от частоты называется *атомной спектральной линией излучения*  $g(\omega)$ . Частотный интервал  $\Delta \omega_{21}$ , на границах которого мощность излучения убывает до половины максимальной величины, называется *шириной спектральной линии*. Величина  $\Delta \omega_{21}$  непосредственно связана с шириной энергетических уровней:

$$\Delta \omega_{21} = (\Delta W_2 - \Delta W_1)/h. \tag{3.2}$$

Для квантовой системы спектральная линия описывает зависимость коэффициента усиления активного вещества от частоты и характеризует полосу усиливаемых частот. Таким образом, для усиления и генерирования колебаний определенной частоты с помощью квантовых систем с числом электронов  $N=N_1+N_2$  в единице объема необходимо подобрать вещество, в котором возможны квантовые переходы на данной частоте  $\omega_{21}$ , и создать в нем избыток активных частиц  $N_2$  на верхнем уровне перехода, т. е. обеспечить инверсию населенностей  $N_2 - N_1 > 0$ .



Рис. 3.1. Плотность распределения частиц по энергиям в полупроводнике

Если к *p-n*-переходу в полупроводнике приложить напряжение смещения в прямом направлении, то через переход потечет электрический ток. Если количество добавляемой извне энергии значительно, то некоторые электроны, находящиеся на низком энергетическом уровне, приобретая добавочную энергию, переходят на более высокий уровень. В полупроводнике добавочная энергия (*накачка*) приводит к тому, что часть электронов, сконцентрированных в валентной зоне, переходит в зону проводимости, т. е. появляются свободные электроны, которые могут перемещаться внутри полупроводника. При этом свободные электроны, сталкиваясь с узлами кристаллической решетки или с другими электронами, "падают" в зону валентности. Иногда "падение" на нижний энергетический уровень или в зону валентных электронов происходит без соударений, и в таких случаях энергия, теряемая электроном, выделяется в виде фотона, или кванта.



Рис. 3.2. Спектр спонтанного излучения активного вещества

Подобный процесс излучения называется спонтанным излучением (лучеиспусканием). Вероятность спонтанного излучения зависит не от плотности энергии внешнего электромагнитного поля, а только от времени. Если квантовая система была выведена из равновесия и в возбужденном состоянии с энергией  $W_2$  находится  $N_2$  частиц, то при отсутствии внешних электромагнитных полей (накачки) населенность верхнего уровня будет уменьшаться только вследствие спонтанных переходов, т. е.

$$N_2(t) = N_2(0)\exp(-A_{21}t)$$
,

где  $N_2(0)$  – населенность верхнего уровня в момент t = 0;  $A_{21}$  – коэффициент Эйнштейна для спонтанного перехода за единицу времени (1/с).

Спонтанное излучение возникает под действием случайных квантовых возмущений. Акты излучения квантов энергии поэтому не связаны друг с другом; направления распространения спонтанно излученных квантов и их поляризации произвольны. Спонтанное светоизлучение возникает при переходе любого электрона с одного энергетического уровня на другой. Но так как моменты времени перехода всех электронов не совпадают, то происходит наложение их излучений и возникают световые волны с неодинаковой амплитудой и фазой, а вследствие этого наблюдается неоднородность и по частоте. Кроме того, мельчайшие колебания энергий  $\Delta W_2 - \Delta W_1$  тоже влияют частотный разброс излучения. Таким образом, напряженность на

электрического поля светового излучения изменяется во времени по следующему закону:

$$E(t) = [A + a(t)] \sin [\omega_{21}t + \phi(t)],$$

где a(t) – колебания амплитуды (шумы амплитудной модуляции);  $d\phi/dt$  – колебания частоты (шумы частотной модуляции, или фазовые шумы). Если бы все колебания представляли собой синфазные синусоиды и отсутствовали частотные отклонения, то спектр состоял бы из единственной линии с некоторой частотой  $\omega_{21}$ .

Спонтанное излучение обладает низкой *монохроматичностью* и является некогерентным светом. Кроме того, квант, излучаемый при этом каждым электроном, не имеет регулярного направления в пространстве, т. е. спонтанное излучение отличается низкой направленностью.

В полупроводниковых излучателях в качестве основы используется кристалл арсенида галлия (GaAs), у которого угловая частота излучения  $\omega_{21}$  соответствует  $\lambda_{21} = 0.91$  мкм. Необходимо, чтобы длины волн излучения соответствовали окнам прозрачности кварцевых стекол: 0.85; 1.3 и 1.55 мкм. Сдвиг длин волн излучения GaAs производится легированием его другими химическими элементами. Например, учитывая одинаковую валентность Ga и Al и примерное равенство постоянных кристаллических решеток у GaAs и AlAs (соответственно 5,646 и 5,369 ангстрем) и то, что у AlAs  $\lambda_{21} = 0.65$  мкм, удается получить  $\lambda_{21} = 0.85$  мкм от трехкомпонентного твердого раствора Ga<sub>(1-x)</sub> Al<sub>x</sub>As, где *x* атомов Ga замещены атомами Al.

Для окон прозрачности  $\lambda = 1,31$  мкм и 1,55 мкм используются четверные соединения AlGaAsSb; InGaAsP и др. Если выращивать на подложке InP четырехэлементное химическое соединение, например, In<sub>x</sub>Ga<sub>(1x)</sub>As<sub>y</sub>P<sub>(1-y)</sub>, то в зависимости от соотношения долей *x* и *y* светоизлучение будет изменяться в диапазоне длин волн от 1,0 до 1,9 мкм.

#### 3.2 Функции и типы оптических резонаторов

Наиболее эффективно взаимодействие электромагнитного поля с активной средой осуществляется при помещении ее в резонатор. В оптическом диапазоне роль резонатора выполняет система параллельных плоских или сферических диэлектрических зеркал [2], одно из которых для вывода излучения делают полупрозрачным. Идея использования открытых резонаторов (интерферометров Фабри–Перо) для оптического диапазона принадлежит лауреату Нобелевской премии А. М. Прохорову.

В открытом резонаторе существуют волны *TEM*, или *T*, напряженности полей которых по трем осям изменяются. Тип колебаний характеризуется числом изменений направления поля по поверхности зеркал (по осям x и y) и вдоль оси z и обозначают его  $T_{mpq}$ , где m – число изменений направления поля (нулей) по оси x; p – число изменений по оси y; q – число полуволн,

укладывающихся по оси *z* между зеркалами резонатора. Типы колебаний, отличающиеся индексами *m* и *p*, называют *поперечными модами*. Типы колебаний, характеризуемые различными значениями *q*, т. е. отличающиеся распределением поля по продольной оси резонатора, обычно называют *продольными*, или аксиальными модами (интерференционными максимумами).

Условие резонанса для открытого резонатора состоит в том, что полный фазовый сдвиг в резонаторе должен быть кратен  $2\pi$ . Он складывается из фазового сдвига, возникающего в результате движения волны между зеркалами, и фазового сдвига  $\Delta \varphi_{mp}$  при отражении волны от зеркала, который зависит от формы, размеров резонатора и типа волны, существующей в нем [11]:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2L - 2\Delta\varphi_{m\rho} = 2\pi q, \qquad (3.3)$$

где  $\lambda$  – длина волны в среде, заполняющей резонатор; *L* – расстояние между зеркалами резонатора.

Из выражения (3.3) определяем резонансные частоты:

$$\omega_{mpq} = \frac{V}{L} (\pi q + \Delta \varphi_{m\rho}), \qquad (3.4)$$

где *V* – фазовая скорость волны в среде, заполняющей резонатор.

Разность частот типов колебаний, отличающихся индексами m или p на единицу, составляет обычно величину порядка десятых долей или единиц мегагерц. Наибольший разнос по частоте имеет место для продольных мод, различающихся индексом q. Частотный интервал между продольными модами составляет величину

$$\Delta \omega = \pi V/L; \ \Delta f = V/2L; \ \Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2nL}, \tag{3.5}$$

где *n* – показатель преломления пассивной среды, заполняющей резонатор.

Существенное значение для поддержания колебаний того или иного типа имеют потери. Наименьшими потерями обладает основной тип колебаний  $T_{00a}$ , так как для этого типа колебаний распределение поля по поверхности зеркал наиболее равномерное, т. e. почти плоская волна, направление И распространения такой волны в резонаторе почти совпадает с осью z, нормальной к зеркалам. Потери в резонаторе обусловлены отражениями от зеркал резонатора, затуханием в пассивной его среде и потерями вследствие неточной юстировки зеркал.

Ширина спектральной линии колебания в пассивном резонаторе Фабри–Перо, обусловленная только однократным отражением от стенки резонатора с коэффициентом *R*, представляется в виде

$$\delta\lambda \approx \Delta\lambda \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}} = \frac{\lambda^2}{2nL} \cdot \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}.$$
 (3.6)

Расчет см. в Приложении.

# 3.3 Процессы колебаний в активном резонаторе

Выходное излучение возникает независимо от воздействия внешнего электромагнитного поля. Колебания в любом генераторе поддерживаются благодаря тому, что часть энергии с выхода активной среды подводится ко входу для создания положительной обратной связи.

Отличительной особенностью лазерного генерирования является отсутствие явно выраженной цепи обратной связи. Причина этого кроется в том, что принцип положительной обратной связи содержится в самом индуцированном (вынужденном, стимулированном) излучении. Поле резонатора, воздействующее на активную среду, вызывает излучение, которое полностью (по частоте, фазе, поляризации и направлению распространения) совпадает с этим полем. Увеличение поля ведет к соответствующему увеличению индуцированного излучения, дальнейшему увеличению поля и т. д. Индуцированное излучение в веществе способствует, таким образом, поддержанию колебаний. Колебания в активной среде будут нарастать до предельной интенсивности, ограниченной процессом насыщения.

Следовательно, лазерным генератором по существу может быть активная среда достаточной длины, в которой обеспечена инверсия населенностей, и помещенная внутрь резонатора. Источником, вызывающим появление выходного излучения, являются спонтанные переходы в активной среде.

В большинстве случаев генерирование лазерного излучения происходит в резонаторе Фабри–Перо, в котором помещается активная среда. При этом необходимая положительная обратная связь обеспечивается за счет взаимодействия поля резонатора и активной среды. В резонаторе выделяются те типы колебаний, затухание которых минимально, т. е. направление распространения которых совпадает с осью z резонатора (в дальнейшем рассматривается единственная мода  $T_{00a}$ ).

Если в среде резонатора возникает некоторая плоская волна, волновой вектор  $\vec{k}$  которой ориентирован под некоторым углом к оси *z*, то такой вектор  $\vec{k} = \vec{k}_z + \vec{k}_x + \vec{k}_y$ ; слагаемым такого волнового вектора соответствуют три взаимно-ортогональные плоские волны. Поперечные волны с соответствующими  $\vec{k}_x$  и  $\vec{k}_y$  при этом излучаются за предел открытого резонатора Фабри–Перо, а осевая волна с  $\vec{k}_z$  суммируется с основной волной  $T_{00q}$ .

Качественно рассмотрим вопрос о характере спектра частот, излучаемых лазером. Количество типов колебаний, которые могут возникать и поддерживаться в активном резонаторе, определяется, в первую очередь, *атомной спектральной линией активного вещества g*( $\omega$ ) и резонансными (интерференционными) кривыми резонатора. На рис. 3.3, а представлена атомная спектральная линия излучения *g*( $\omega$ ), определяющая одновременно

19

спектр усиления, а также и спектр пассивного резонатора Фабри-Перо (рис. 3.3, б).



Рис. 3.3. Атомная спектральная линия *g*(ω) активного вещества (а); резонансные (интерференционные) кривые резонатора (б); монохроматизация излучения лазерного диода (в)

Для возникновения колебаний в лазере наряду с указанными частотными условиями необходимо соблюдение энергетических условий. Иначе говоря, необходимо ввести в излучающую среду от внешнего источника энергию (это может быть и оптическая накачка), вполне достаточную для компенсации потерь в резонаторе, а также для создания определенного числа распределений инверсий и усиления света с помощью индуцированного излучения. *Коэффициент усиления среды* представляется в виде

$$k(\boldsymbol{\omega}) = \frac{h\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{B}_{21}}{V}g(\boldsymbol{\omega})\left(\boldsymbol{N}_2 - \frac{\boldsymbol{g}_2}{\boldsymbol{g}_1}\boldsymbol{N}_1\right),\tag{3.7}$$

где  $B_{21}$  – вероятностный коэффициент Эйнштейна для индуцированных переходов с испусканием квантов; V – фазовая скорость в среде резонатора;  $g_1, g_2$  – коэффициенты вырождения (совпадения) уровней.

Минимальный необходимый для генерации коэффициент усиления  $K_{\text{пор}}$ , или так называемый *пороговый коэффициент усиления*, уравновешивающий потери, представлен на рис. 3.3, а штриховой линией. Здесь иллюстрируется случай, когда поступающая извне энергия обеспечивает коэффициент усиления, больший его порогового значения. С увеличением инверсии населенностей ( $N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1$ ) усиление активной среды, в соответствии с (3.7),

возрастает, и условие баланса энергий, когда усиление больше затухания, может быть выполнено для трех (как показано на рисунке) и большего числа частот (мод). При этом будет увеличиваться как число одновременно генерируемых частот, так и расширение полосы спектра излучения (ширины спектральной линии). Можно так подобрать мощность накачки и функцию усиления  $g(\omega)$ , чтобы ее максимум совпал с максимумом резонансной кривой резонатора моды  $T_{00q}$  и чтобы *надкритическое* усиление активной среды обеспечивалось только для этой моды. Такой режим генерации лазера называется *одномодовым* с одной продольный модой.

В многомодовом режиме лазер излучает несколько резонансных частот, соответствующих (3.4) или различным типам колебаний  $\omega_{00q}$  (рис. 3.3, б). Такое излучение лазера вызывает появление В фотоприемнике комбинационных частот. Частоты этих комбинационных колебаний легко рассчитать и при необходимости исключить их влияние на прием сигналов. Кроме того, при любом режиме генерирования наблюдается явление монохроматизации излучения, т. е. сужения спектральной (интерференционной) линии пассивного резонатора. Это явление проявляется в том, что усиливаемые колебания, соответствующие центру спектральной линии  $g(\omega)$ , т. е. когда  $\omega = \omega_{21}$ , уменьшают усиление для всех других частот  $\omega_{00a \pm m}$  (рис. 3.3, в).

Значительное влияние на формирование спектра излучения оказывает пространственная модуляция инверсной населенности. Предположим, что в резонаторе существует только одна мода  $T_{00q}$  при  $q \ge 1$ . Интенсивность этой моды, равная квадрату напряженности электрического поля  $I = E^2$ , будет распределена по продольной оси z резонатора и по радиусу r, как показано на рис. 3.4, а. Число индуцированных переходов пропорционально интенсивности волны. В пучностях стоячей волны число индуцированных переходов будет наибольшим, а в узлах – минимальным, близким к нулю. Поэтому инверсная населенность в областях, соответствующих пучностям стоячей волны, будет уменьшаться, а в узлах – оставаться практически неизменной. Инверсная населенность, которая до начала генерации имела некоторое постоянное значение N для всего объема активной среды, окажется пространственно промодулированной (рис. 3.4, б). В результате этого усиление в активной среде для других типов колебаний, отличающихся распределением поля в резонаторе,

становится больше, чем для существующего типа колебаний  $T_{00q}$ . В итоге в резонаторе возникает другой тип колебаний. После возникновения в генераторе другого типа колебаний, пучности и узлы которого не совпадают с существовавшим ранее полем, вновь изменяется распределение инверсной населенности и вновь может возникнуть новый (возможно, также и первоначальный) тип колебаний. Создаются условия для *перескока колебаний* в процессе генерирования, и следовательно, к *перескоку ширины спектральной линии излучения*. Если в лазере исключены условия перескоков, то такой режим работы называют *одночастотным*.



Рис. 3.4. Пространственная модуляция: а – интенсивности моды; б – инверсной населенности

Спектр излучения  $\delta\omega$  (рис. 3.3, в) одночастотного лазера может быть чрезвычайно узкий (порядка долей герц). Для исключения перескоков на выходе лазеров в когерентных ВОСП необходимо включать оптические вентили (изоляторы), запирающие проникновение внутрь активной среды лазера встречных оптических потоков, образующихся на неоднородностях волоконно-оптического тракта.

#### 3.4 Модуляционные частотные характеристики

В полупроводниковом лазере путем изменения инжектируемого тока накачки  $J_{\rm H}$  можно управлять как мощностью (интенсивностью), так и частотой излучения. На рисунке 3.5 представлена качественная ватт-амперная характеристика лазерного диода, на которой изображены области оптических излучений *P*: спонтанного, лазерного (когерентного) и нелинейного

(насыщения). Для когерентных ВОСП пригодна только область лазерного излучения, т. е. прямолинейный участок ватт-амперной характеристики ЛД.

Здесь мы остановимся только на частотных характеристиках (энергетические характеристики см., например, в [2]).



Рис. 3.5. Зависимости оптической мощности (а) и показателя преломления кристалла (б) лазерного диода от величины тока накачки

Спектр частот генерации определяется числом продольных мод резонатора Фабри–Перо (3.4) и (3.6). Если предположить, что генерируется единственная продольная мода, то на основе формулы (3.6) полное изменение частоты выражается в виде

$$\Delta f = -f \left[ \frac{A}{n} \Delta N_{C} \left( J_{H} \right) + \left( \alpha_{T} + \beta_{T} \right) \Delta T \left( J_{H} \right) \right], \qquad (3.8)$$

где в первом слагаемом с увеличением тока  $J_{\rm H}$  увеличивается плотность носителей  $\Delta N_c$ , вследствие чего уменьшается коэффициент преломления n среды в резонаторе и соответственно этому увеличивается частота продольной моды; A – коэффициент пропорциональности. Второй член в квадратных скобках отражает следующее:

1) от протекания тока повышается температура и увеличивается длина резонатора L, т. е.  $\alpha_T = \partial L/\partial T$  соответствует коэффициенту теплового линейного расширения лазерной среды;

2) благодаря изменению коэффициента преломления, т. е.  $\beta_{\rm T} = \partial n / \partial T$ , изменяется частота продольной моды.

При частоте тока модуляции  $F \le 10$  МГц численное значение второго члена примерно в 10 раз больше первого, поэтому преобладает температурный эффект. Однако при F > 10 МГц изменение электрического тока не сопровождается повышением температуры лазера, т. е. температурный эффект эффект носителей, преобладает который выражается в ослабевает И резонансном пике, подобном пику В модуляционной характеристике интенсивности (см. рис. 17.23 в [2]). В таблице приведены значения коэффициентов в формуле (3.8) для InGaAsP - лазера (1,55 мкм):

<i>А</i> , м <sup>3</sup>	п	α <sub>т</sub> , град <sup>-1</sup>	β <sub>т</sub> ,град <sup>-1</sup>
- 7 <sup>·</sup> 10 <sup>-27</sup>	3,5	5 · 10-6	$1 \cdot 10^{-4}$

#### 3.5 Температурные характеристики

В зависимости от температуры окружающей среды изменяется не только мощность излучения, но и резонансная частота. Это изменение в соответствии с формулой (3.8) выражается как

$$-f(\alpha_{\rm T} + \beta_{\rm T}) (T - T_{\rm c}),$$

где  $T - T_c$  – изменение температуры относительно стандартной. Ниже отражена зависимость частоты и длины волны излучения InGaAsP – лазера от постоянного электрического тока и окружающей температуры:

$\partial \lambda / \partial J_{\rm H} = 0,008$ нм/мА;	$\partial f / \partial J_{\rm H} = -1,1 \ \Gamma \Gamma \mu / {\rm MA};$
$\partial \lambda / \partial T = 0,08$ нм/град;	$\partial f / \partial T = -11 \ \Gamma \Gamma \mu / \Gamma \rho a d.$

При использовании лазера для когерентных ВОСП со спектральным скорее всего, более мультиплексированием, важна так называемая спектральная долговечность. При непрерывной работе полупроводникового лазера даже в условиях стабильной температуры и пониженного тока накачки происходит медленный сдвиг частоты генерации, равный – 26 МГц/ч. В подобных случаях принимаются определенные ограничения на продолжительность генерации продольной моды (использование ЛД в цифровом (импульсном) режиме пердачи).

#### 3.6 Шумы и управление ими

Как недостаток полупроводниковых лазеров можно отметить малые размеры резонатора, и, следовательно, небольшое значение его добротности. Поэтому на излучаемый лазером свет большое влияние оказывают флуктуации спонтанного излучения. Они вызывают флуктуации интенсивности излучения (модуляционные шумы интенсивности) и флуктуации частоты (шумы частотной модуляции или фазовые шумы). Помимо этого, имеется много других факторов, увеличивающих уровень шумов, которые необходимо также уменьшать с помощью тех или иных способов.

Ниже рассматриваются случаи с генерацией только одной продольной моды.

#### 3.6.1 Модуляционные шумы интенсивности

#### 1 Шумы, обусловленные спонтанным излучением

Флуктуации мощности спонтанного излучения определяют частотные границы шумов. На рис. 3.6. приведена спектральная плотность мощности

модуляционных шумов для частот выше 1 МГц. Множество этих значений можно разделить на две составляющие. Одна из них обусловлена флуктуациями коэффициента усиления индуцированного излучения из-за флуктуаций спонтанного излучения (ASE). Эта составляющая присутствует во всех без исключения полупроводниковых лазерах. Их характеристика спектральной плотности напоминает характеристику фильтра нижних частот, частота среза которого

$$f_{\rm c} = (J_{\rm cm}/J_{\rm II} - 1)/2\pi\tau_{\rm w},$$

где  $J_{\rm cm}$ ,  $J_{\rm n}$  – постоянный ток смещения и пороговый ток соответственно при стандартной температуре (см. рис. (3.5, а));  $\tau_{\rm ж}$  – время жизни электрона в возбужденном состоянии. Для полупроводниковых лазеров частота среза лежит в пределах от единиц гигагерц до 100 ГГц.

Другая составляющая проявляется в резонансном пике на частоте, равной частоте колебаний, релаксационных В свою очередь обусловленных флуктуациями спонтанного излучения. На частотах ниже 1 МГц носители под воздействием спонтанного излучения возбуждаются и переходят в зону проводимости, вызывает флуктуации плотности носителей. ЧТО а следовательно, колебания тока и собственной теплопроводности. Далее колебания температуры приводят к дрейфу мощности оптического излучения.



Рис. 3.6. Спектральная плотность модуляционных шумов

#### 2 Шумы, обусловленные изменением температуры и тока накачки

На практике к вышеупомянутым шумам добавляются шумы, обусловленные сторонними для излучающего вещества факторами и

повышающие общий уровень шумов. На частотах до 10 МГц особенно существенны колебания порогового значения тока и дифференциального выхода, ИЛИ дифференциальной эффективности, квантового которые определяются углом наклона прямой, соответствующей лазерному режиму генерации, и измеряются в милливаттах на микроампер  $(\partial P_0 / \partial I_H)$ , в свою обусловленные преимущественно, колебаниями окружающей очередь температуры. В результате наблюдается температурный дрейф мощности примерно – 50 мкВт/град. Кроме того, шумы тока инжекции влияют на уровень смещения, в связи с чем наблюдаемые колебания относительной мощности достигают величины 10<sup>-4</sup>. Поэтому необходимо обеспечить регулировку температуры кристалла лазерного диода (ЛД) (микрохолодильник Пельтье) либо автоматическую регулировку средней мощности импульсного излучения с помощью внешних схем, одна из возможных приведена на рис. 3.7. Для этой цели предусматривается создание на одной подложке с лазерным диодом и фотодиода (ФД), предназначенного для слежения по цепи обратной связи за мощностью оптического излучения лазерного диода (ЛД).



Рис. 3.7. Схема стабилизации среднего значения мощности излучения лазера в ПОМ: а – входной ток цифрового сигнала *i*(*t*); б – электрический усилитель У<sub>с</sub>; в – регулируемый источник питания РИП; г – компаратор К; д – усилитель постоянного тока УПТ; е – фотодиод ФД; ж – лазерный диод ЛД; з – оптическое согласующее устройство СУ; и – оптическое волокно

Продетектированное фотодиодом ФД обратное излучение ЛД через усилитель постоянного тока УПТ и компаратор К управляет величиной тока смещения  $J_{\rm cM}$  регулируемого источника питания РИП. Величина средней мощности излучения  $P_{\rm cp}$  задается установкой опорного напряжения  $V_{\rm on}$  на входе компаратора.

При проектировании лазера предусматривается монолитное с ним выполнение схемы автоматической регулировки мощности, т. е. создание на одной подложке лазера и фотодиода, предназначенного для слежения за оптической мощностью. Введением подобной схемы удается снизить колебания относительной мощности до 1.10<sup>-6</sup>.

Прямое излучение ЛД через согласующее устройство СУ поступает в оптическое волокно ОВ.

#### 3 Шумы, обусловленные обратным светом

Если лазерное излучение отражается от внешнего зеркала, торца ОВ и других препятствий, а затем возвращается в лазер с произвольной фазой, то этот отраженный свет изменяет условия генерации лазера и значительно увеличивает уровень модуляционных шумов интенсивности и шумов частотной модуляции.

Влияние отраженного света заметно уже при интенсивности его  $10^{-4}$  по отношению к основному излучению, а при интенсивности 0,05 обратный свет приводит уже к *генерации импульсного типа*. Изменения характеристик генерации, вызванные отраженным светом, сводятся главным образом к следующему:

– сдвиг резонансной центральной длины волны, изменение числа генерируемых продольных мод (рис. 3.3, б) за счет изменения n(J);

- изменение формы кривой I (L) (рис. 3.4, а), изменение порогового тока;

- расширение или сужение спектра колебаний (чирпинг);

- изменение вида модуляции (рис. 3.8);

– появление шумов на частоте  $f = c/2L_e$  и ее высокочастотных составляющих, на частоте  $f = a_f c/2L_e$  и ее высокочастотных составляющих ( $a_f \ll 1$ ), увеличение низкочастотного шума, способствующее перескоку моды, где  $L_e$  – расстояние от лазера до внешней поверхности отражения.



Рис. 3.8. Модуляция интенсивности излучения лазера обратным светом

Отмеченные недостатки свойственны не только лазерам с резонаторами Фабри–Перо, но и лазерам с распределенной обратной связью (РОС) и обратным брэгговским отражением (РБО), рассмотренных в пп. 3.7 и 3.8. Для защиты генерации лазеров от отраженной волны или от попадания в лазер извне любой поперечной световой волны используют оптические вентили (изоляторы), которые могут быть вмонтированы в передающий оптический модуль.



Рис.3.9. Оптическая часть передающего оптического модуля с вентилем и устройством согласования ЛД с ОМОВ: 1 – лазерный диод; 2 – коллимирующая линза; 3 – поляризатор; 4 – ротатор Фарадея (кристалл); 5 – кобальт –

самарчевый постоянный магнит; 6 – фокусирующая линза; 7 – одномодовое ОВ

Оптическая часть такого ПОМ с использованием ЛД с РОС представлена на рис. 3.9. Излучение ПОМ будет линейно поляризованным. Так как ЛД в значительной мере подвержен воздействию переотраженных оптических полей, компоненты должны быть миниатюрными и расположены то все В непосредственной близости от ЛД. Все поверхности между компонентами быть обработаны противоотражающим покрытием. должны Плоскость поляризатора, обращенная к ЛД, наклонена примерно на 6° для исключения попадания отраженного от нее света в резонатор ЛД. Ротатор Фарадея размещен между двумя поляризаторами, плоскости поляризации которых скрещены под углом 45°. Ротатор изготовлен из кристалла железо-иттриевого граната (YIG – yttrium iron garnet) и помещен в трубчатый цилиндрический постоянный магнит 5. Вносимое затухание для прямого света составляет менее 1...3 дБ (вносится преимущественно первым поляризатором), для обратного света – больше 50 дБ. Для простоты изготовления используются или сферические линзы с большим показателем преломления материала, например циркония как показано на рисунке, или короткие градиентно-стержневые линзы. Некоторые согласующие устройства кристалла ЛД с ОМОВ описаны в [2, п. 13.4].

Для высокоскоростных ВОСП используются ПОМ, в которых лазерный диод часто крепится к алмазному держателю 8, прикрепленному к микрохолодильнику Пельтье, поддерживающему температуру  $25 \pm 2^{\circ}$  С, или нагревателю, поддерживающему температуру  $100 \pm 2^{\circ}$  С. Такой держатель является отличным электрическим изолятором и одновременно обладает хорошей теплопроводностью.

# 3.6.2 Шумы частотной модуляции

Шумы частотной модуляции (частотные нестабильности), 1 обусловленные преимущественно спонтанным излучением, определяются флуктуациями мощности спонтанного излучения. Эти шумы имеют постоянный уровень, вплоть до частот немного ниже 10 ТГц (рис. 3.10, кривая 4), соответствующих времени релаксации дипольных моментов из пар электрон-дырка. Вероятней всего указанные шумы являются продуктом нелийных преобразований в активной среде кристалла ЛД вследствие большой концентрации мощности (см. раздел 11, ВКР и четырехволновое смещение). Эту составляющую спектральной плотности можно представить как белый шум. Он свойствен лазерам любого типа.



Рис. 3.10. Спектральные плотности составляющих шумов частотной модуляции, обусловленные: 2 – флуктуациями коэффициента преломления и тока накачки; 3 – колебаниями плотности носителей; 4 – флуктуациями мощности спонтанного излучения; 1 – суммарный шум

Для полупроводниковых лазеров характерны также колебания частоты плотности моды, обусловленные колебаниями носителей. продольной вызванными, в свою очередь, флуктуациями спонтанного излучения (кривая 3), коэффициента преломления, а также тока (кривая 2). Шумы, обусловленные колебаниями коэффициента преломления, имеют резонансный пик, связанный с релаксационными колебаниями в широком частотном диапазоне. Шумы, колебаниями обусловленные тока, имеют только низкочастотные составляющие. В результате общая характеристика (суммарный шум, кривая 1) получается похожей на модуляционную характеристику интенсивности (см. рис. 17.23 в [2]).

2 Шумы, обусловленные колебаниями температуры и тока, фактически формируются колебаниями окружающей температуры, колебаниями тока инжекции, плотности носителей и температурными колебаниями, вызванными колебаниями тока. Уровень этих шумов выше уровня шумов, описанных в п. 3.6.1, и относительные частотные колебания, обусловленные ими, составляют величину  $10^{-8}$  и более.

Абсолютные отклонения частоты генерации лазера, даже если он работает на одной продольной моде, составляют:

 $\Delta f(T) \leq 120 \Gamma \Gamma \mu/\Gamma pad;$   $\Delta f(J_{\mu}) \leq 1...5 \Gamma \Gamma \mu/MA.$ 

Такие частотные колебания лазера недопустимы в когерентных ВОСП, и их необходимо подавлять как стабилизацией температуры, так и стабилизацией тока накачки.

3 Шумы, обусловленные обратным светом. Условия генерации при попадании обратного света в лазер становятся весьма нестабильными, что приводит к значительным изменениям частоты излучения. Кроме того, отраженный свет может вызвать перескок генерации моды, что приводит к скачкообразному изменению частоты, соответствующему разности между частотами этих мод (см. (3.5)). Устранить эти частотные изменения, как указывалось раньше, можно включением на выходе лазера оптического вентиля.

# 3.7 Лазерный диод с распределенной обратной связью

Это особый вид лазерного диода (лазера), в котором торцевые зеркала вообще могут отсутствовать, а положительная обратная связь обеспечивается периодических неоднородностях, образующих рассеянием на строго решетку внутри кристалла. Важно, периодичную чтобы эта решетка образовывалась пространственными периодическими изменениями одного из параметров, от которого зависят условия распространения света внутри лазера. Это может быть показатель преломления (гетеропереходы), коэффициент усиления, толщина световода и др. Расстояние Л между указанными неоднородностями решетки должно удовлетворять условию отражения Брэгга [2]:

$$A\sin \theta_{\rm B} = \lambda_{\rm B}/2, \tag{3.9}$$

где  $\lambda_{\rm B} = \lambda_0/n_{\rm 3\phi}$  – длина волны в световоде;  $\lambda_0$  – то же, в вакууме;  $n_{\rm 3\phi}$  – эфективный показатель преломления световода, в котором размещена дифракционная решетка;  $\theta_{\rm B}$  – угол между нормалью к плоскости решетки и оптической осью резонатора, т. е. направлением высвечивания лазера. Таким образом, центральная длина волны генерации в лазерах с РОС определяется значениями  $\Lambda$  и  $n_{\rm 3\phi}$  световода.

В оптических резонаторах решетка является одновременно фильтром и отражателем. Распределенная обратная связь (РОС, DFB-Distributed  $\theta_{\rm B} \, \theta_{\rm B}$  Feedback) используется в таких типах полупроводниковых лазеров. Она осуществляется следующим образом. Пусть электромагнитное излучение распространяется в тонком одномодовом полосковом диэлектрическом световоде, заполненном активной средой. Вблизи этого активного слоя на расстоянии  $\ell$  от него помещается плоская дифракционная решетка с периодом  $\Lambda$ , как показано на рис. 3.11.



Рис. 3.11. Лазерный диод с распределенной обратной связью для рабочей длины волны 1,55 мкм

Оптическая волна, распространяясь вдоль световода, проникает частично в зону размещения дифракционной решетки (ДР) и взаимодействует с нею. Если период решетки  $\Lambda$  составляет целое число длин волн света в световоде, то брэгговское отражение световодной моды от решетки изменит направление ее распространения на обратное при  $\theta_{\rm B} = \pi/2$ , приводя тем самым к возникновению положительной обратной связи. Очевидно, эта обратная связь будет распределена равномерно по всей длине активного слоя, поэтому она называется *распределенной обратной связью*. Величину обратной связи можно изменять расстоянием  $\ell$ .

При определенных условиях с помощью той же дифракционной решетки можно осуществить вывод излучения из полоскового CB наружу. При этом излучение выводится с поверхности активного слоя под определенным углом  $\theta_{\rm B}$ , удовлетворяющим условию направления Брэгга на главный максимум ±1-го порядка [2]:

$$\Lambda \sin \theta_{\rm B} = \pm \lambda_{\rm B} = \pm \lambda_0 / n_{\rm Sp}. \tag{3.10}$$

Так как условия (3.9) и (3.10) выполняются для одной длины волны  $\lambda_{\rm B}$  при определенных значениях  $\Lambda$  и  $\theta_{\rm B}$ , то спектр длин волн излучения лазеров с РОС определяется качеством технологии изготовления и может быть представлен в виде

$$\delta \lambda = \delta \lambda_{\rm B} \pm \delta \lambda_{\rm p}/2$$
,

где расстройку  $\delta\lambda_p/2$  можно представить соответствующей двум аксиальным модам, расположенным слева и справа от центральной моды резонатора (см. рис. 3.3).

Для их поражения смещают изменением  $n_{3\phi}$  период ДР, что приводит к нарушению симметрии ДР относительно этих волн и в конечном итоге, возможно, к полному их устранению. При этом условии ширина спектральной линии излучения лазера будет минимальной. В настоящее время достигнуто излучение таких лазеров с шириной спектральной линии  $\delta\lambda = 0,01$  нм.

#### 3.8 Лазерный диод с распределенным брэгговским отражением

когерентных ВОСП со спектральным мультиплексированием Для перестраивать собственную возникает необходимость плавно частоту резонатора лазера и тем самым плавно изменять частоту генерации лазера. В принципе это может быть достигнуто изменением величины показателя преломления внутри резонатора (в зоне размещения ДР) (см. (3.5)) с помощью тока управления J<sub>v</sub> (рис. 3.12), так как показатель преломления является функцией тока управления  $n_v$  ( $J_v$ ) (рис. 3.13), что в конечном итоге изменяет эффективную длину резонатора или самой ДР. Это же относится и к лазерам с POC.



Рис. 3.12. Лазерный диод с распределенным брэгговским отражением для рабочей длины волны 1,55 мкм

В лазерах с распределенным брэгговским отражением (РБО, DBR – Distributed Bragg Reflection) периодическая структура, как правило, вынесена за пределы активной области. Имеются лазеры с РБО, у которых одно (выходное) многослойное зеркало плоское, а другое зеркало – брэгговская решетка, вынесенная за пределы активной области; имеются также резонаторы РБО с двумя периодическими структурами, расположенными по обе стороны от активного слоя. В этом случае они ведут себя аналогично многослойным

диэлектрическим зеркалам, которые могут отражать свет только определенной длины волны. Однако число диэлектрических слоев в таких зеркалах значительно меньше того количества периодов решетки, которое необходимо для замены зеркала решеткой. Это же замечание относится и к лазерам с РОС. Поэтому резонаторы РОС и РБО лазеров – обычно длиннее, чем резонаторы лазеров с плоско-параллельными многослойными зеркалами, т. е в резонаторах Фабри–Перо, вследствии этого более коллированный выходящий луч. Но главное их преимущество перед лазерами Фабри–Перо – это наличие селективности (перестройки) по длине волны.



от тока (накачки, управления)

Лазеры со структурой распределенного брэгговского отражения не имеют перескоков мод даже при высокоскоростной модуляции и генерируют только одну продольную моду, что делает их удобными в качестве источников излучения для многокальных ВОСП со спектральным мультиплексированием. При использовании материалов системы InGaAsP могут быть получены структуры с длиной волны излучения 1,3...1,6 мкм и шириной спектральной линии  $\delta\lambda = 0,01$  нм.

#### 3.9 Лазеры с внешними резонаторами

Для получения одномодовости и одночастотности колебаний лазера необходимы как пространственная, так и спектральная селекция (по типам мод и частоте). Дополнительная (к рассмотренному ранее в лазерах Фабри–Перо) селекция реализуется следующим образом:

1 Собственная обратная связь в лазерном диоде (ЛД) уменьшается путем нанесения противоотражающего покрытия на заднее зеркало, у которого коэффициент отражения был  $R \approx 1$ , и излучение ЛД переводится на *внешний резонатор* (*BP*). При этом во ВР могут применяться соответствующие частотные или пространственные фильтры.

2 ВР комбинируется с собственным резонатором ЛД, образуя *составной резонатор*. Простейшим вариантом составного резонатора для лазера является резонатор с внешним зеркалом в непосредственной близости от одной из

задней). Модовая избирательность граней ЛД. (как правило, такого многозеркального резонатора реализуется для тех мод и спектров частот, для наблюдаются которых условия резонанса 60 всех межзеркальных промежутках одновременно. Это условие выполняется, когда внешнее зеркало настроено в резонанс с избирательным внутренним типом колебаний ЛД.

Рассмотрим некоторые реализации составных резонаторов.

3.9.1 Монолитная конструкция внешних резонаторов

а) Монолитная конструкция составного резонатора включает, кроме ЛД, прозрачную диэлектрическую пластину толщиной d = 0,1...0,4 мкм, находящуюся в оптическом контакте с задней гранью ЛД (рис. 3.14, а). При этом получается двухрезонаторная структура.



Рис. 3.14. Монолитная конструкция внешних резонаторов ЛД: а – с изотропной прозрачной диэлектрической пластинкой толщиной 0,1...0,4 мкм; б – с кристаллической пластинкой с большим электрооптическим эффектом; в – с отражательным эталоном на основе многослойной структуры

б) Если пластинку выполнить из кристалла с большим электрооптическим эффектом (LiNbO<sub>3</sub>,), то, прикладывая к ней регулируемое электрическое напряжение, можно перестраивать частоту генерации лазера, так как при этом изменяется, вследствие изменения показателя преломления кристалла оптическая длина лазерного составного резонатора (рис. 3.14, б).

в) Если пластинку выполнить из кристалла с большим пьезоэлектрическим эффектом, то изменение электрического напряжения, приложенного к ней, приводит к изменению ее толщины *d*, и следовательно, к изменению физической длины составного резонатора (рис. 3.14, б). Увеличение по пп. б и в оптической длины *nL* составного резонатора свидетельствует об уменьшении ширины спектральной линии (3.6), а также о сгущении спектра продольных мод (3.5). Последнее также приводит к сокращению ширины спектральной линии (ШСЛ) при многомодовой генерации лазера с ВР.

г) Если пластинку выполнить в виде отражательного эталона на основе многослойной структуры (рис. 3.14, в), состоящей из совокупности отражающих  $\lambda/4$ -слоев, с эквивалентным коэффициентом отражения R, приближающимся к единице, и разместить эту пластину на регулируемом расстоянии d от заднего зеркала ЛД, то, в соответствии с формулами (3.5) и (3.6), это приводит как к изменению длины волны излучения лазера, так и к сокращению ШСЛ за счет увеличения R.

Таким образом, рассмотренные монолитные внешние резонаторы осуществляют как селекцию мод, так и частотную перестройку в пределах атомной спектральной линии  $g(\omega)$  (см. рис. 3.3), а также ограничивают ШСЛ излучения лазера.

3.9.2 Внешние подвижные резонаторы лазеров

Другой класс селективных внешних резонаторов составляют резонаторы внешними элементами (интерференционные с фильтры, зеркала, др.), дифракционные решетки И согласованными с ЛД c помощью коллимирующих линз, сферических зеркал, градиентно-стержневых линз и др.

1 На рис. 3.15, а представлена схема лазера с внешней коллимирующей линзой и интерференционным фильтром на основе многослойной структуры с высоким коэффициентом отражения *R*, реализованным четвертьволновыми слоями  $\mathcal{N}4$ . Следовательно, такая многослойная структура согласована с базой L, обеспечивающей генерирование длины волны λ ЛД. Грубая настройка осуществляется изменением базы L, но лишь в очень малом спектральном диапазоне, соответствующем частотному расстоянию  $\Delta f$  (3.5) между двумя ближайшими аксиальными модами. Тонкая настройка осуществляется поворотом плоскости зеркала (многослойной структуры) относительно оси и плоско-параллельным перемещением самой оси так, чтобы нормаль к зеркалу совпадала с оптической осью лазера. Пределы тонкой настройки также ограничены изменением угла β, т. е. изменением эффективной толщины слоя λ/4cos β. Возможно изменение оптических толщин слоев электрическим напряжением, рассмотренное в предыдущем разделе.

2 Возможно управление длиной волны излучения ЛД на основе известного из радиотехники *явления затягивания (захвата)*, когда один из генераторов выступает в роли опорного (ведущего, высокостабильного). На рис. 3.15, б представлена схема соединения выращенных на единой подложке

35

двух ЛД разной длины с помощью общего ВР, например сферического зеркала. лазерных В ЭТОМ случае обе задние грани диодов обработаны противоотражающим покрытием, выводящим части мощностей их излучения нестабильность на общий BP. Температурная таких лазеров без микрохолодильника Пельтье составляет примерно 0,1нм/град. При изменении температуры изменяется также и выходная мощность. Это и определяет область применимости подобных лазеров.



Рис. 3.15. Лазеры с внешними подвижными резонаторами: а – на основе коллинирующей линзы и многослойной диэлектрической структуры; б – на основе двух ЛД, связанных общим резонатором; в – на основе коллинирующей линзы и дифракционной решетки

З Наибольшее распространение получила *схема соединения ВР на* основе ДР, оптически сочлененной с ЛД с помощью коллимирующей линзы (рис. 3.15, в). Заднее зеркало ЛД так же, как, и в предыдущих схемах, обработано противоотражающим покрытием, и часть мощности ЛД выводится в сторону ДР. В таком резонаторе нормаль к плоскости ДР повернута
относительно оси резонатора на угол β, удовлетворяющий условию направления на *первый главный максимум* ДР:

$$\lambda \pm \delta \lambda/2 = \Lambda \sin(\beta \pm \delta \beta/2),$$

где  $\Lambda$  – период ДР;  $\lambda$  – центральная длина волны излучения лазера (см. рис. 3.15, г). Отраженное от ДР в первом главном максимуме в пределах  $\delta\lambda/2$  и развернутое излучение возвращается в заднее окошко ЛД. Область выхода волноводного слоя ЛД на грани кристалла служит щелью, селектирующей выбранную длину волны  $\lambda$ . Настройка (перестройка) длины волны излучения лазера достигается изменением угла  $\beta$ . Диапазон настройки может составлять 15...20 нм (с перескоком) и зависит от типа ЛД, а также уровня его накачки.

Если грань ЛД просветлена, то настройку можно осуществлять плавно относительно  $\lambda_{np}/4$  на указанную величину. Если просветление ЛД не применено, то настройка будет дискретной с шагом плавной настройки, равным межмодовому расстоянию  $\Delta\lambda$  для собственных мод ЛД (3.5). Таким методом практически получено сокращение полосы частот излучения в области 1,55 мкм до 40 кГц и даже до 0,5 кГц (в разных вариантах реализации).

Использование оптической обратной связи наряду с сужением ШСЛ уменьшает температурную и токовую зависимости самой частоты генерации. При оптической обратной связи, но без стабилизализации температуры и тока накачки, получены:

 $\partial f/\partial T \approx (10...20) \Gamma \Gamma \mu/\Gamma pag; \quad \partial f/\partial J_{H} \approx 100 M \Gamma \mu/MA.$ Данные таких зависимостей без оптической обратной связи и без стабилизации температуры и тока накачки приведены в п. 3.6.2.

Стабилизацию температуры, а следовательно, и частоты излучения полупроводниковых лазеров осуществляют с помощью микрохолодильников (элемент Пельтье), охлаждающих экран (радиатор), на который помещен лазерный диод. При такой стабилизации температуры получена стабильность частоты порядка 1 МГц/мин, а дополнительно со стабилизацией инжекционного тока – 1 МГц/ч. Такие отклонения частоты уже могут быть отслежены электрическими системами автоматической подстройки частоты (АПЧ).

особенно В когерентных BOCI, С спектральным плотным мультиплексированием, с гетеродинным приемом оптических сигналов 10.3) реализовать спектральный доступ любому (см. п. возможно К оптическому через направленный ответвитель, используя каналу перестраиваемый местный гетеродинный лазерный генератор. Для этого требуются лазеры излучения не только с предельно узкой ШСЛ, но и перестраиваемые в больших пределах непрерывной настройки. Известна разработка с ШСЛ  $\Delta f = 10$  кГц, но с прерывистой (дискретной) настройкой в диапазоне 55 нм путем изменения угла β (см. рис. 3.15, в). Прерывистость настройки объясняется тем, что при простом повороте ДР (без поступательного

37

ее смещения) наблюдаются перескоки мод ВР в пределах спектрального диапазона между модами, типичное значение которого составляет примерно 3 ГГц для внешнего резонатора с базой L = 5 см.

Предложена реализация лазера с *BP* на основе *ДP*, непрерывная настройка которого осуществляется совместным поступательновращательным перемещением *ДP*. Схема такого лазера представлена на рис. 3.16.



Рис. 3.16. Реализация лазера с подвижным ВР на основе ДР: 1, 5 – механизмы горизонтального и вертикального перемещения осей вращения 2; 3 – толкающая рейка; 4 – пьезоэлектрический двигатель перемещения ДР; 6 – ДР; 7 – коллимирующая линза; 8 – противоотражающее покрытие; 9 – ЛД; 10 – выход излучения лазера

Дифракционная решетка имела разрешение 1200 лин/мм, скреплена с пьезоэлектрическим кристаллом (двигателем) для точного перемещения, и следовательно, ДЛЯ точной настройки резонансной частоты BP. Для исключения перескоков между генерируемыми продольными модами резонатора в течение перестройки необходимые изменения угла наклона ДР и длины резонатора L одновременно были такими, чтобы изменение L sin  $\beta$  не превышало Л/2. Иначе говоря, это значит, что в створе коллимированного пучка лучей, падающих на ДР, один из возможных лучей не выходил за пределы участка  $\pm \Lambda/2$ , а отраженный от ДР этот луч, находящийся в створе первого главного максимума ДР, распространялся к ЛД параллельно оптической оси резонатора. При выполнении этих условий длина волны

излучения лазера изменялась непрерывно в диапазоне 15 нм (1,875 ТГц) механическим перемещением ДР микровинтами со скоростью 4 ГГц/мкм. Точная перестройка пьезоэлектрическим двигателем осуществлялась в пределах 1 ГГц. Ширина спектра излучения такого лазера  $\Delta f \leq 10$  кГц. Таким образом, лазер, обладающий узкой  $\Delta f$  и широким диапазоном перестройки центральной частоты, может быть использован как источник излучения в когерентных ВОСП с частотным объединением и разделением оптических каналов и гетеродинным приемом для спектрального доступа до оптических каналов без детектирования всех оптических каналов. Лазер такого типа используют в одной из трансатлантических ВОСП.



Рис. 3.17. Реализация лазера с ВР на основе ООМОВ: 1 – оптическое соединение ЛД с ООМОВ микролинзой на перетяжке вводного торца ООМОВ; 2 – ООМОВ; 3 – внешнее зеркало (скол ООМОВ); 4 – тепловой изолятор; 5 – V-образный желоб; 6 – поляризационный вентиль; 7 – оптичекий разъем

4 Реализация сужения ШСЛ возможна с помощью *отрезка одномодового однополяризационного оптического волокна* (ООМОВ), выполняющего роль ВР. Схема реализации такого лазера представлена на рис. 3.17, где выходное зеркало ЛД оптически соединено микролинзой 1 на перетяжке вводного торца ООМОВ 2 [2]. Противоположный конец ООМОВ, плоско сколотый, выполняет роль внешнего зеркала 3. Коэффициент отражения от такого скола находится в пределах 0,02...0,06. ЛД и ООМОВ размещаются в тепловом изоляторе 4, внутри которого ООМОВ размещено в *V*-образном желобе 5, скрепленном с тепловым изолятором 4.

На выходе ООМОВ из теплового изолятора размещается оптический вентиль 6 с поляризационной зависимостью, предотвращающий попадание внутрь резонатора отраженного света другой поляризации. Длина ООМОВ в различных образцах колеблется в пределах 20...50 см. Для сокращения ШСЛ достаточно получить от наружного торца ООМОВ коэффициент отражения порядка 10<sup>-3</sup>. Поэтому такой волоконный резонатор может быть армирован гнездом (розеткой) или штепселем (вилкой) 7 разъемного оптического соединителя или даже сварен с линейным ООМОВ, так как реальный коэффициент отражения от указанных стыков с ВОЛП дает необходимую обратную связь для возникновения резонанса в ООМОВ. С помощью такого ВР на основе ООМОВ достигнуто 50-кратное сокращение полосы частот

39

излучения ЛД и получена  $\Delta f = 30$  кГц. Подстройка достигается током накачки, если используется ЛД с РОС или РБО.

Лазеры с ВР обладают и крупным недостатком. Действительно, для получения столь узких спектров излучения необходимо, чтобы фаза световой волны, отраженной от зеркала или конца ООМОВ, при повторном вхождении в ЛД была равна фазе излучаемой световой волны. Другими словами, положение зеркала и длину ООМОВ необходимо регулировать с точностью в пределах длины волны, иначе шумы обратного света вызовут расширение спектра.

5 Разработаны способ и устройство, при которых с помощью гибридной широкополосной обратной связи как по оптическому излучению, так и по электрическому току снижается частота шумов частотной модуляции и сужается ШСЛ. В отличие от рассмотренных выше способов с оптической обратной связью, этот способ не препятствует миниатюризации лазера, при нем нет необходимости изменять конструкцию резонатора ЛД. Схема реализации способа приведена на рис. 3.18.



Рис. 3.18. Лазер с гибридной обратной связью:

1 – лазерный диод; 2 – резонатор Фабри–Перо; 3 – фотодекодер;

4 – электрический усилитель; 5 – регулируемый источник питания

Резонатор Фабри–Перо в этой схеме играет роль оптического внешнего резонатора по отношению к резонатору ЛД и уменьшает ШСЛ за счет увеличения общей базы резонатора *L* между передним зеркалом резонатора ЛД и задним зеркалом резонатора Фабри–Перо (см. формулу (3.6)). В дополнение к этому продетектированное с выхода резонатора Фабри–Перо узкополосное оптическое излучение, усиленное электрическим усилителем, управляет по цепи обратной связи схемой стабилизации тока смещения ЛД (регулируемым источником питания). Это, в свою очередь, приводит к сокращению ШСЛ излучения лазера и уменьшению шумов. Более подробно схема управления величиной тока смещения ЛД описана в п. 3.6.1, рис. 3.7.

Теоретически этим способом и схемой лазера, представленного на рис. 3.18, можно достичь ширины спектра излучения в несколько сотен килогерц. Для лазеров системы InGaAsP (1,55 мкм) реализована ширина спектра 330 кГц. Электрическую схему с отрицательной обратной связью можно выполнить по интегральной технологии.

Уникальными характеристиками для построения ВОСП обладают волоконные (см. п. 6.6) и импульсные лазеры.

# 3.10 Импульсные лазеры

Для формирования оптических цифровых сигналов высокой скорости передачи применяются импульсные лазеры. Их называют также *лазеры с синхронизацией мод*. Импульсный режим работы лазера обеспечивается, когда за сравнительно большой промежуток времени в активном веществе его происходит накопление энергии накачки и создается большая степень перенаселенности между лазерными уровнями, а затем в заданный момент времени накопленная энергия излучается в виде мощного светового импульса. Этот режим осуществляется благодаря модуляции добротности резонатора. Излучаемые световые импульсы имеют малую длительность, высокую импульсную энергию и называются *гигантскими импульсами*.

Укажем три наиболее эффективных метода модуляции добротности лазера.

1 Одно из двух зеркал резонатора вращается вокруг оси, лежащей в плоскости зеркала. Потери в резонаторе будут очень высокими на протяжении всего цикла, за исключением короткого интервала времени, соответствующего параллельному расположению зеркал. Этот момент времени соответствует включению добротности.

2 Внутри резонатора имеется оптический модулятор, оптические свойства которого можно изменять с помощью внешних воздействий. Наиболее часто для этой цели используются электрооптические модуляторы, работающие на основе электрооптических эффектов в кристаллах.

3 Внутри резонатора имеется насыщающийся поглотитель, т.е. вещество, показатель поглощения которого уменьшается (насыщается) с ростом интенсивности излучения (просветляется переходом поглощающих молекул красителя в возбужденное состояние и связанным с этим уменьшением поглощения).

Рассмотрим теперь многомодовую генерацию лазера. Пусть для определенности генерация осуществляется на (2N+1) аксиальных модах, разделенных частотным интервалом  $\Delta \omega = \omega_{q+1} - \omega_q = \pi c / nL$  (см. (3.5)). Обозначим собственную частоту центральной моды  $\omega_0$ . Тогда полное электрическое поле E(t) электромагнитной волны в некоторой произвольной точке, например на зеркале резонатора, можно записать в комплексной форме:

$$E(t) = \sum_{m=-N}^{N} E_m e^{i[(\omega_0 + m\Delta\omega)t + \varphi_m]}, \qquad (3.11)$$

где  $E_m$ ,  $\phi_m$  – амплитуда и фаза *m*-той моды при t = 0. Если не принимать специальных мер, то фазы отдельных мод будут случайными и полная мощность излучения будет равна сумме мощностей отдельных мод. Если фазы отдельных мод каким-либо образом синхронизированы, то моды интерферируют и происходит явление, называемое *синхронизацией мод*.

Для простоты будем считать, что генерируется (2N + 1) аксиальных мод с равными амплитудами  $E_m = E_0$  и все фазы равны нулю. Тогда выражение (3.11) даст

$$E(t) = A(t)e^{i\omega_0 t}; \quad A(t) = E_0 \frac{\sin[(2N+1)\Delta\omega t/2]}{\sin(\Delta\omega t/2)}.$$
 (3.12)

Эти выражения отображают гармоническую волну с частотой несущей  $\omega_0$  и амплитудой A(t), промодулированной по закону (3.12). Выходная относительная интенсивность лазера  $I(t)/I_m$ , пропорциональная  $|A(t)|^2/E_0^2$ , представлена на рис. 3.19.



Рис. 3.19. Выходная интенсивность импульсного лазера

Отметим следующие важные свойства функции (3.12).

1 Энергия излучается в виде последовательности коротких световых импульсов. Максимумы соответствуют моменту времени, когда знаменатель (3.12) обращается в нуль. Два импульса разделены интервалом времени  $T=2\pi/\Delta\omega=2nL/c$ . Это время, необходимое фотону для полного прохода резонатора оптической длины 2nL. Частота повторения импульсов более 1 ГГц.

2 Ширина импульса на половине высоты его приблизительно равна:

$$\tau = \frac{T}{2N+1} \approx 1/\Delta\delta, \qquad (3.13)$$

где  $\Delta \delta$  – ширина спектра излучения лазера одного из интерференционных максимумов на уровне  $0,5I_m$ , и может находиться в субнаносекундной области. (см. Приложение).

3 В режиме синхронизации мод пиковая мощность в импульсе в (2*N*+1) раз превышает сумму мощностей отдельных мод и приблизительно равна  $(2N+1)^2 E_0^2$ .

Синхронизация мод осуществляется путем модуляции усиления (или потерь) в лазере с частотой  $\Omega = \Delta \omega = \pi c/nL$ , равной межмодовому интервалу.

## Контрольные вопросы

- 1 Как обеспечивается высокодобротный пространственный резонанс в резонаторе Фабри–Перо?
- 2 За счет чего вступают в резонанс частотные составляющие полей резонатора, находящиеся за пределом резонансных частот лазера, или почему наблюдается монохроматизация излучения?
- 3 Как обеспечивается одномодовый режим генерации лазера?
- 4 Как технически обеспечить одночастотный режим генерации в одномодовом лазере?
- 5 Чем принципиально отличаются лазеры РБО и РОС?
- 6 Как можно использовать лазеры с перестраиваемой полосой частот генерации для коррекции хроматической дисперсии цифровых оптических сигналов?
- 7 Можно ли и если да, то как использовать лазеры с подвижным ВР на основе ДР для коррекции хроматической дисперсии цифровых оптических сигналов?
- 8 Как использовать лазер по схеме рис. 3.18 при прямой его модуляции электрическим импульсом для управления формой оптического импульса на его выходе?
- 9 В каких ВОСП используются импульсные лазеры и почему?

## 4 ОДНОКАНАЛЬНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

По определению [2], волоконно-оптическая система передачи (ВОСП) – это система, в которой все виды сигналов передаются по оптическим волокнам оптического кабеля. Иначе говоря, ВОСП – это комплекс активных и пассивных оптических устройств волоконно-оптического тракта передачи, на которых И с помощью которых создаются, передаются основе И обрабатываются оптические сигналы. Совокупность волоконно-оптических трактов образует волоконно-оптическую линию передачи (ВОЛП). ВОСП, в которой передача сигналов осуществляется по одному оптическому каналу передачи (спектру оптических частот или интервалу времени), называется одноканальной (ВОСП-ОК).

Волоконно-оптический линейный тракт передачи (рис. 4.1) состоит из трех основных функциональных компонентов: передающего оптического модуля (ПОМ), оптических волокон (как правило, двух, без учета запаса) и приемного оптического модуля (ПРОМ).

Известны схемы двухсторонней связи по одному ОМОВ с использованием циркуляторов.



Рис. 4.1. Структурная схема волоконно-оптического линейного тракта ВОСП-ОК (одно направление передачи): ЭИ – электрический интерфейс (стык); ПОМ – передающий оптический модуль; РОС – разъемный оптический соединитель; ВОУ – волоконно-оптический усилитель; ОМОВ – одномодовое оптическое волокно; Р – регенератор; ПРОМ – приемный оптический модуль; MPI-S (MPI-R) – точка нормирования на передаче (приеме)К; -(3)-– условное обозначение оптического волокна.

Для компенсации потерь и дисперсии в оптических волокнах используются оптические регенераторы (Р). При использовании ОМОВ с низким значением дисперсии в волоконно-оптическом тракте могут быть использованы и оптические усилители (ОУ) совместно с компенсаторами дисперсии.

Передающий оптический модуль (ПОМ) – это изделие оптоэлектроники, предназначенное для преобразования входных электрических сигналов электронного оборудования в оптические. Типичный ПОМ включает источник оптического излучения (несущей частоты), электронные схемы для преобразования входных электрических сигналов и стабилизации режимов работы (усилители, модуляторы и др.), оптические устройства согласования источника излучения с оптическим соединительным волокном (кабелем), выполненные в едином конструктивном исполнении.

Приемный оптический модуль (ПРОМ) – изделие оптоэлектроники, предназначенное для преобразования оптических сигналов, приходящих из оптического линейного тракта, в электрические сигналы, подаваемые в решающее устройство регенератора или электронного оборудования приемной станции.

Рассмотрим способы и устройства формирования, передачи и обработки оптических сигналов более подробно.

### 4.1 Прямая модуляция источника излучения

Модуляцией называют операцию, при помощи которой информационный электрический сигнал вносится в оптическую волну. Модулятором называют устройство, которое изменяет детектируемые параметры световой волны в соответствии с приложенным электрическим сигналом. Такими параметрами являются мощность (интенсивность), фаза, поляризация и длина волны (частота).

Рассмотрим здесь самый распространенный в ВОСП модулятор интенсивности как устройство, которое изменяет интенсивность когерентной световой волны в соответствии с изменяющимся во времени электрическим сигналом. Возьмем для такого типа модуляции напряженность электрического поля плоской волны в форме

 $E(t) = E_0(t) \exp[i(\omega t - \beta z + \varphi)].$ 

Тогда интенсивность волны можно представить как

$$I = E(t) \cdot E^*(t) = \left| E \right|^2,$$

где  $E^{*}(t)$  – комплексно-сопряженная величина.

Величина  $|E|^2$ , называемая *интенсивностью*, будет функцией приложенного электрического сигнала и характеристик модулятора (интенсивность пропорциональна мощности).

Максимальную глубину модуляции в этом случае определим следующим образом. Предположим, что без приложенного электрического сигнала интенсивность света, покидающего модулятор и падающего на детектор, имеет величину  $I_0$ . Если при приложении максимального сигнала к модулятору интенсивность света равна  $I_m$ , то максимальная глубина модуляции  $\eta_m$  определяются как

$$\eta_m = rac{|I_m - I_0|}{I_0}$$
для  $I_m \le I_0;$   
 $\eta_m = rac{|I_m - I_0|}{I_m}$ для  $I_m \ge I_0.$ 

Для сигнала меньше максимального глубина модуляции *η* равна

$$\eta = \frac{|I - I_0|}{I_0}$$
, где  $I_m \le I_0$ ;  
 $\eta = \frac{|I - I_0|}{I_0}$ , где  $I_m \ge I_0$ .

Здесь *I* – детектируемая интенсивность при соответствующем уровне сигнала.

В одноканальных волоконно-оптических системах передачи (ВОСП-ОК) оптические цифровые сигналы на передаче могут формироваться путем прямой (непосредственной) модуляции мощности (интенсивности) источника излучения, например лазерного диода (ЛД) токами накачки его кристалла. Ток накачки кристалла ЛД

$$J_{\rm H} = J_{\rm CM} + i(t)$$

состоит из постоянной составляющей тока смещения ЛД Ј и переменного развиваемого электронной частью цифрового (сигнального) тока i(t), оборудования ВОСП-ОК (рис. 4.2, а) и подаваемого на ЛД через усилитель накачки  $V_c$  и разделительный конденсатор  $C_p$ . Величина тока смещения  $J_{cm}$  на ватт-амперной характеристике (ВтАХ) ЛД (рис. 4.2, б) устанавливается регулируемым источником питания (РИП) на уровне примерно (1,1...1,2)  $J_{\pi}$ порогового тока ЛД, т. е. в начале линейного участка ВтАХ. На выходе ЛД высвечивается постоянная световая составляющая (фон) мощности  $P_{\phi}$ , соответствующая логическим «О» (заштрихованная область на рис. 4.2, б). Мощность P<sub>0</sub> соответствует логическим «1». Вследствие линейности участка  $P_0(i(t))$  ватт-амперной характеристики на выходе ЛД оптические импульсы мощности повторяют форму и длительность импульсов тока электронного оборудования ВОСП-ОК. Промодулированная оптическая мощность с выхода ЛД через согласующее устройство (СУ) вводится в оптическое волокно (OB).

Полный спектр частот оптического импульсного сигнала  $\Delta f$ , полученный путем модуляции по интенсивности (МИ) оптической несущей частоты спектром  $\Delta f_{\rm H}$ , электрическим импульсным сигналом со спектром  $\Delta F$ , записывается в виде

$$\Delta f = \Delta f_{\rm \tiny H} + 2\Delta F \quad \Delta F = F_{\rm max} - F_{\rm min} \,,$$

который представлен на рис. 4.3, б как результат интегрирования спектров, промодулированных по интенсивности фурье-компонент рис. 4.3, а стационарного несущего излучения ЛД спектром

$$\Delta f_{\rm H} = f_{\rm max} - f_{\rm min} = f_{\rm LH} \pm \frac{\Delta f_{\rm H}}{2}.$$



Рис. 4.2 Упрощенная схема ПОМ (а); прямая модуляция мощности (интенсивности) излучения лазерного диода (б)



Рис. 4.3. Спектры частот МИ оптического сигнала

Принято считать шириной спектра оптического сигнала полосу частот или диапазон длин волн, в которых передается основная часть средней мощности модулированной оптической несущей. ПОМ не содержит оптических фильтров, ограничивающих полосу частот оптического сигнала МИ. Следовательно, в волоконно-оптический тракт передается спектр частот оптической несущей  $\Delta f_{\rm H}$  и обе боковые полосы частот информационного (электрического) сигнала  $\pm \Delta F$ . Если  $\Delta f_{\rm H} >> \Delta F$ , то можно представить, что интенсивности всех фурье-компонент оптического сигнала в спектре  $\Delta f_{\rm H}$  изменяются во времени примерно по закону изменения во времени информационного электрического сигнала.

Хроматическая дисперсия импульсного оптического сигнала в ОВ прямо пропорциональна спектру оптического сигнала. Следовательно, для обеспечения когерентной передачи цифровых сигналов в ВОСП необходимо требование особенно минимизировать  $\Delta f_{\rm H}$ Это важно выполнять В ВОСП многоканальных независимо мультиплексирования OT метода оптических сигналов одноканальных ВОСП-ОК.

С изменением тока накачки в схеме прямой модуляции излучения ЛД (рис. 4.2, а) изменяется и ширина спектра излучения ЛД. Это явление, называемое *чирпингом* (chirping), ограничивает применение прямой модуляции излучения ЛД в высокоскоростных и протяженных ВОСП-ОК. Для исключения чирпинга в таких ВОСП-ОК и особенно в многоканальных ВОСП со спектральным мультиплексированием оптических каналов используется *внешняя модуляция излучения лазера* в пассивном модуляторе по схеме рис. 4.4.



Рис. 4.4. Схема внешней модуляции непрерывного излучения лазера: Л – лазерный источник излучения; М – внешний модулятор;

ВО – вентиль оптический, исключающий попадание обратного светового потока внутрь лазера; V – электрическое напряжение, состоящее из смещения модулятора и сигнала, модулирующего оптическую несущую.

Такая схема исключает чирпирование оптического модулированного сигнала. Некоторые конкретные схемы и принципы работы внешних модуляторов рассмотрены далее.

### 4.2 Модулятор Фабри-Перо

При рассмотрении электрооптических модуляторов интенсивности и фазы на кристалле (см. п. 12.7, в [2]) было показано, что модуляция оптической несущей пропорциональна длине взаимодействия в кристалле *L*, а глубина модуляции как по интенсивности, так и по фазе равны соответственно

$$\Delta = \pi \frac{U_m}{V_\pi}; \qquad \delta = \pi \frac{U_m}{V_\pi}, \qquad (4.1)$$

где  $U_m$  – напряжение электрического сигнала, модулирующее оптическую несущую;  $V_{\pi}$  – полуволновое напряжение, обеспечивающее разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами в кристалле, равную  $\pi$ .

## 4.2.1 Модуляция интенсивности

Для осуществления большой глубины модуляции полуволновое напряжение  $V_{\pi}$  должно быть малым при данном напряжении модуляции  $U_m$ , а для этого, в случае поперечного модулятора, когда луч перпендикулярен силовым линиям электрического поля, требуются кристаллы большой длины.

рассматривается В данном подразделе продольная модуляция интенсивности и фазы соответственно на кристаллической пластине LiNbO<sub>3</sub>, помещенной внутрь резонатора Фабри-Перо (рис. 4,5, а, рис. 4.7), в котором в результате многократного переотражения света эффективная ллина взаимодействия его с кристаллом сильно возрастает. Это существенно увеличивает глубину модуляции как в модуляторах интенсивности, так и в фазовых модуляторах Фабри-Перо.



Рис. 4.5. Модулятор интенсивности Фабри-Перо

На внешние поверхности многослойных диэлектрических зеркал резонатора Фабри–Перо наложены прозрачные электроды (рис. 4,5, а). Коэффициент пропускания резонатора Фабри–Перо по интенсивности света определяется как

$$T = \frac{I_{\rm BMX}}{I_{\rm BX}} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2\Phi} , \qquad (4.2)$$

где  $I_{BX}$ ,  $I_{Bbix}$  – интенсивности света произвольной поляризации обыкновенной волны на входе и на выходе соответственно (рис. 4.5, б); R – коэффициент отражения от многослойной диэлектрической структуры (зеркал) резонатора (МСД), максимально приближающийся к единице (см. п. 11.4 в [2]);

Ф – фазовый сдвиг света при прохождении обыкновенной волны через кристалл:

$$\Phi = k_0 nL = \frac{2\pi}{\lambda} nL, \qquad (4.3)$$

где *nL* – эффективная оптическая толщина кристаллической пластинки.

Для продольного электрооптического эффекта показатель преломления для обыкновенной волны *n*<sub>0</sub> при наличии внешнего электрического поля напряженностью *E* записывается в виде (см. п. 12.7 в [2]):

$$n = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{13} E \,. \tag{4.4}$$

Подставив (4.4) в (4.3), получим:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_0 L - \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 r_{13} V, \qquad (4.5)$$

где V – приложенное к электродам напряжение;  $r_{13}$  – электрооптический коэффициент; X, Y, Z – главные оси кристалла на рис. 4.5, а.

В соответствии с (4.2) и (4.5), интенсивность прошедшего света зависит от приложенного напряжения  $V = V_{\rm cm} + u(t)$  Интерференционные максимумы  $T(\lambda)$  на выходе резонатора имеют крутой склон, который на линейном участке его может быть представлен в виде

$$\frac{dT}{d\Phi} \approx \frac{Q}{\pi} \quad , \tag{4.6}$$

где *Q* – добротность резонатора Фабри–Перо.

Следовательно, если приложить к электродам модулятора смещающее напряжение  $V_{\rm см}$ , при котором рабочая точка будет располагаться в начале линейного участка  $T(\Phi)$  (см. рис. 4.6) одного из интерференционных максимумов T(V), то небольшое приложенное напряжение u(t) цифрового сигнала относительно точки смещения приводит к существенной модуляции интенсивности света на выходе.



Рис. 4.6. Модуляция интенсивности коэффициента пропускания в модуляторе Фабри–Перо

Нетрудно изготовить резонаторы Фабри–Перо с добротностью Q = 30. Таким образом, тангенс угла наклона кривой (4.6) может быть 10. Следовательно, глубина модуляции прошедшего света сквозь модулятор Фабри–Перо при том же напряжении  $U_m/V_{\pi}$  увеличивается в  $Q/\pi = 10$  раз по сравнению с глубиной модуляции в электрооптическом модуляторе (4.1). Если варьировать величину  $V_{\rm CM}$  в нелинейной области интерференционного максимума, то можно вносить предварительное искажение в оптический импульс на выходе модулятора, компенсирующее дисперсию его в линии.

#### 4.2.2 Фазовая модуляция

Промодулированный по интенсивности свет после прохождения через модулятор Фабри–Перо оказывается промодулированным также и по фазе. Однако есть необходимость в получении светового пучка лазера с чисто фазовой модуляцией. Идеализированная структура чисто фазового модулятора изображена на рис. 4.7. Он представляет собой асимметричный резонатор Фабри–Перо, заднее зеркало которого имеет коэффициент отражения 1, а переднее –  $R_1 < 1$ . Коэффициент отражения полной структуры равен также 1 (потери не учитываются), а фазовый сдвиг  $\phi$  может быть представляен как:

$$\varphi = -2 \arctan(\frac{1 + \sqrt{R_1}}{1 - \sqrt{R_1}} tg \,\Phi) \,. \tag{4.7}$$

В предельном случае, когда коэффициент отражения переднего зеркала  $R_1 = 0$ , мы имеем  $\varphi = -2\Phi$ , т. е. фазовый сдвиг совпадает с полным оптическим фазовым сдвигом светового пучка, прошедшего через резонатор в прямом и обратном направлениях. Если  $R_1 < 1$ , то в асимметричном резонаторе Фабри–Перо фазовый сдвиг  $\varphi$  существенно возрастает из-за многократных переотражений (см. рис. 4.7).



Рис. 4.7. Схема фазовой модуляции на основе модулятора Фабри-Перо

В отсутствие модулирующего напряжения ( $U_m = 0$ ) напряжение смещения выбирается таким, чтобы  $\Phi = m\pi$ , т. е.,  $V_{\rm CM} = V_{\pi}$ .

Если модулирующее напряжение мало, то глубина фазовой модуляции будет

$$\Delta \varphi = 2\pi \frac{1 + \sqrt{R_1}}{1 - \sqrt{R_1}} \cdot \frac{U_m}{V_\pi} . \qquad (4.8)$$

Следовательно, наличие переднего зеркала увеличивает глубину модуляции в  $(1 + \sqrt{R_1})/(1 - \sqrt{R_1})$  раз. Например, при  $R_1 = 0,9$  глубина фазовой модуляции увеличивается в 38 раз. Однако это увеличение возможно лишь для тех оптических частот, которые удовлетворяют условиям резонанса Фабри–Перо (см. рис. 4.5, б) ( $\Delta F \ge 1$  ГГц).

Зависимость фазового сдвига  $\Delta \varphi$  от отношения  $U_m/V_{\pi}$  представлена на рис. 4.8. Если варьировать величину  $U_m/V_{\pi}$ , то можно вносить предварительные фазовые искажения в оптический импульс на выходе фазового модулятора и тем самым дистанционно регулировать дисперсию информационного импульса в волоконно-оптическом тракте передачи.



Рис. 4.8. Зависимость фазового сдвига от  $U_m/V_{\pi}$ 

### 4.3 Модулятор Маха-Цендера

Модуляторы этого типа основаны на интерферометре Маха–Цендера (рис. 4.9, а) на одномодовых полосковых световодах сечением, как правило, 3×3 мкм (рис. 4.9, б), в котором интерференция происходит между когерентными световыми пучками, проходящими разные оптические пути (рис. 4.9, а).



Рис. 4.9. Схема модулятора Маха-Цендера

При использовании моды низшего типа в отсутствие модулирующего напряжения ( $V_{\rm CM} = 0$ ) оптические длины путей одинаковы ( $n_{1a} = n_{16}$ ), мода разделяется по мощности на две равные части на входе в 3 дБ делителе и вновь суммируется на выходе в таком же делителе. В этом случае схема рис. 4.9, а полностью прозрачна.

При приложении напряжения  $V_{cM} = V_{\pi}$ , при котором образуется разность фаз на выходе между обыкновенной и необыкновенной волнами, равная  $(2m+1)\pi$ , за счет изменения эффективного показателя преломления  $n_{1a}$  на выходе в середине световода суммарная мощность будет равна нулю, и схема будет полностью заперта. Таким образом, модулятор можно переводить из пропускающего (при  $V_{cM} = 0$ ) в не пропускающий (при  $V_{cM} = V_{\pi}$ ). Для напряжений на электродах  $0 \le V(t) \le V_{\pi}$  интенсивность основной моды будет прямопропорциональна величине V(t).

Созданный на основе ZnS модулятор реализует указанную функцию для проходящего света с коэффициентом проницаемости в пределах (0,01...0,6) при напряжениях  $V_{\pi} \le 25$  В. Такое же устройство реализовано на основе LiNbO<sub>3</sub> с диффузией титана (T*i*) длиной 38 мм с разностью уровней мощностей вход/выход (включен/выключен) 22 дБ при  $V_{\pi} = 19$  В для  $\lambda = 1,3$  мкм.

Реализованы модуляторы Маха–Цендера для длин волн  $\lambda = 1,31$  и 1,55 мкм, работающие в полосе оптических длин волн  $\Delta \lambda = 25$  нм с вносимым затуханием  $\leq 5$ дБ, обеспечивающие модуляционные полосы частот  $\Delta F = 2$ ; 5; 8 и 16 ГГц соответственно при напряжении смещения ±10 В;  $\Delta t = 0...70$  °C.

Модуляторы Маха–Цендера являются полностью интегральными устройствами, поскольку для получения модуляции излучения по интенсивности не требуется дополнительных элементов. Они достаточно легко могут быть состыкованы с линейным волокном, источниками излучения и встроены в более сложные оптические интегральные схемы. По вносимым потерям, энергопотреблению и быстродействию модуляторы такого типа превосходят другие электрооптические управляемые устройства.

На основе двух таких модуляторов с нелинейными свойствами материала световодов с двумя входами создан оптический мультивибратор и другие бистабильные устройства, выполняющие логические операции И, ИЛИ, И-НЕ и ИЛИ-НЕ со временем переключения <10<sup>-9</sup>с [20]. Кроме оптических элементов, такие устройства используют фотодетекторы, усилители и другие электрические элементы для получения необходимых управляющих напряжений и электрической обратной связи.

### 4.4 Модулятор на связанных световодах

Расположенные рядом на подложке  $n_2$  канальные световоды (CB) как направленный ответвитель можно превратить в электрооптический модулятор добавлением двух металлических электродов, как показано на рис. 4.10 заштрихованными участками схемы. Модуляторы на связанных световодах (MCC) в настоящее время разработаны в наибольшей степени. Они служат в качестве базового элемента для большинства коммутирующих оптических интегральных схем (OИC).



Рис. 4.10. Модулятор интенсивности на связанных световодах: а – при двух металлических электродах; б – при ступенчатом управлении ±Δβ

Если напряжение модулирующего сигнала подано на электроды, то оно приводит к небольшой разнице в показателях преломления в CB, которое в свою очедь приводит к некоторой разнице фазовых коэффициентов распространения Δβ.

Основными параметрами МСС являются коэффициент связи  $C_{12}$ , фазовое рассогласование  $2\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$  постоянных распространения  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , связанных CB, и длина зоны связи L (см. рис. 4.10), которые определяют напряжение переключения (модуляции) входного оптического сигнала интенсивностью  $I_0$  в перекрестное состояние с интенсивностью  $I_2 = \eta I_0$ . Эффективность ответвления (переключения) оптической мощности (глубина модуляции)  $\eta$  должна быть равной 1, что достигается при  $\Delta\beta = 0$  и пространственном периоде  $L_0 = \pi/2C_{12}$ 

на длине связи  $L_q = L_0(1+2q)$ , где q – целое число. Параметры МСС выбираются так, чтобы переключение входного сигнала осуществлялось при напряжении u = 0. Для достижения полного пропускания в МСС ( $\eta = 0$ ) необходимо обеспечить соответствующее фазовое рассогласование волн  $\Delta \beta \neq 0$ приложением напряжения  $u_{\rm II}$ , при котором выполнялось бы условие [2]

$$\Delta\beta L = \sqrt{3}\pi$$

Это соответствует изменению эффективного показателя  $\Delta n_{ph} = \sqrt{3}\pi/kL$ . При

этом для уменьшения перекрестных (переходных) помех в выходных плечах МСС до уровня не хуже минус 20 дБ погрешность в задании значения L, точнее  $C_{12}L$ , не должна превышать  $\pm 0,006$ . От такого ограничения можно избавиться в МСС со ступенчатым и противоположным по знаку рассогласованием постоянных распространения ±Δβ вдоль зоны связи (см. рис. 4.10, б). В таком MCC состояние переключения пропускания при приложении И соответствующих напряжений ±и можно электрически подстраивать достаточно широком диапазоне изменения длины зоны связи, что позволяет перекрестные помехи. Для этого необходимо, минимизировать чтобы выполнилось условие  $\frac{L}{L_0} > 1$ . МСС чувствительны к изменению поляризации

входного излучения, что технически легко устраняется подстройкой поляризации на входе.

При разработке оптических интегральных основе схем на соединений, обладающих полупроводниковых оптической изотропией, проблема создания поляризационно-нечувствительных переключателей И модуляторов может быть существенно упрощена.

Если выполнить CB из Ga<sub>(1-x)</sub>Al<sub>x</sub>A<sub>s</sub> длиной связи 1 см сечением 3×3 мкм, то для полного выключения входа необходимо  $\Delta n_{3\phi} \approx 10^{-4}$ , что соответствует напряженности электрического поля 3·10<sup>4</sup> В/см или напряжению  $V_{\pi} = 10$  В. В MCC, выполненных из LiNbO<sub>3</sub> с тремя параллельными электродами тот же эффект можно получить при  $V_{\pi} = 5$  В.

Модуляционная полоса частот  $\Delta F$  с центральной длиной волны  $\lambda = 1,31$  мкм составила в разных образцах 3 и 5 ГГц, а на длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм  $\Delta F$  составила 10 и 20 ГГц. Такие модуляторы позволяют осуществлять цифровую модуляцию с соответствующими скоростями передачи.

### 4.5 Электроабсорбционный модулятор

Электроабсорбционный модулятора света по интенсивности в последнее время находит все большее применение. Связано это, во-первых, с малыми величинами напряжений, необходимых для осуществления почти 100%-ной модуляции, во-вторых, такой модулятор легко интегрируется в одной конструкции вместе с лазерным кристаллом, оптическим изолятором и другими элементами. Лазерный модуль с оптическим изолятором и внешним модулятором электроабсорбционного типа на основе полупроводникового лазера с решеткой Брэгга представлен на рис. 4. 11.



Рис. 4.11. Электроабсорбционный модулятор

1 – волноводный кристалл; 2 – дифракционная решетка Брега; 3 – электрод тока накачки; 4 – полупроводниковый вентиль (изолятор); 5 – электрод модулирующего напряжения; 6 – волноводный электроабсорбционный модулятор; 7 – выходное окно с противоотражающим покрытием; 8 – период решетки Брега; 9 – подложка

На лазерный волноводный кристалл 1 нанесена дифракционная решетка Брэгга 2. Непосредственно к нему справа примыкает входная грань электроабсорбционного модулятора (ЭАМ) 6, волноводного в котором управление световыми потоками осуществляется путем поглощения света, связанного с резонансным переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости. Ha нижней И верхней гранях устройства нанесен электропроводящий слой (электрод) 3 для подвода электрического тока накачки J<sub>н</sub> к лазерному кристаллу с РОС. Для подключения модулирующего сигнала к ЭАМ в правой части также нанесен электропроводящий слой 5. Электроды 3 и 5 оптически изолированы друг от друга полупроводниковым изолятором 4 на основе соединения InP. Модулированное по интенсивности излучение выходит через окно 7, поверхность которого покрыта противоотражающим слоем. Перечисленные элементы размещены на подложке 9, выполненной из материала *n*-InP.

Подробнее поясним принцип работы ЭАМ. Слева на рис. 4.11 находится лазер с РОС, излучение которого размещается в диапазоне длин волн 1530...1565 нм. Заряженные частицы в зоне модуляции 6 облучаются этим излучением лазера и переводятся в возбужденное состояние с уровнями энергий  $h\Delta\omega_{12} = \Delta W_2 - \Delta W_1$ , соответствующих третьему окну прозрачности OB

и структуры InGaAsP. Модулирующее напряжение  $U_{\text{мод}} \equiv u(t)$  способствует лучеиспусканию и выходу промодулированной мощности  $P_{\text{вых}}$  через окошко 7.

Вследствие приведенной структуры и температурной стабилизации долгосрочная стабильность спектра длин волн излучения лазера составляет 0,01 нм в течение 20-ти лет. Величина порогового тока  $I_{\text{пор}} = 10$  мА, средний уровень выходной мощности  $p_{\text{вых}} = -3$  дБм. Для получения модуляции с коэффициентом модуляции 8,2 дБ (стандартная величина), требуется напряжение с амплитудой импульса 2 В. Эта схема почти полностью прозрачна при  $U_{\text{мод}} = 0$  и работает как лазер с РОС. Данный ЭАМ обеспечивает частоту модуляции  $\Delta F = 12,5...50$  ГГц.

### 4.6 Одноканальный прием оптических сигналов

Структурная схема приемного оптического модуля (ПРОМ) прямого детектирования представлена на рис. 4.12. Приходящие из волоконнотракта оптические сигналы через разъемный оптический оптического соединитель (РОС) подаются на фотодиод (ФД), который преобразовывает оптические сигналы в электрические. На ФД подается обратное напряжение смещения от регулируемого источника питания (РИП). Продетектированые фотодиодом слабые электрические сигналы усиливаются в предварительном усилителе (ПУс), затем – в основном усилителе (ОУс), фильтруются от продуктов нелинейного преобразования фильтром нижних частот (ФНЧ) и подаются к решающему устройству. С выхода ФНЧ часть напряжения электрического сигнала в цепи обратной связи детектируется в пиковом детекторе (ПД) и через усилитель АРУ регулирует усиление ОУс и напряжение РИП, подаваемое на ФД (подробнее смотри в [2]).



Рис. 4.12. Структурная схема одноканального ПРОМ:

Важнейшей характеристикой  $\Phi Д$  является токовая чувствительность  $R_i$ , преобразования показывающая эффективность оптической мощности В ток. Чем больше  $R_i$ , ΦД. Спектральные электрический тем лучше ΦД, изготовленных различных характеристики ИЗ полупроводниковых материалов, представлены на рис. 4.13.

ПРОМ характеризуется как уровнем чувствительности, так и уровнем перегрузки. *Уровень чувствительности* ПРОМ – это минимальное значение уровня мощности оптического сигнала в точке нормирования (MPI-R)

оптического тракта на приеме, при котором обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала. *Уровень перегрузки* ПРОМ – максимальное значение уровня мощности оптического сигнала в точке нормирования (MPI-R) оптического тракта на приеме, при котором обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала.



Рис. 4.13. Спектральные зависимости токовой чувствительности фотодиода на основе Si, Ge и InGaAsP

ПРОМ должны точно воспроизводить форму принимаемого оптического сигнала, для чего они должны быть рассчитаны на максимальную скорость передачи. В настоящее время достигнута скорость передачи 40 Гбит/с в рабочем диапазоне длин волн 800...1600 нм с чувствительностью минус 26 дБм. ПРОМ не должны вносить дополнительный шум в сигнал. Главной составляющей шума является темновой ток, который течет в нагрузке в отсутствие оптического сигнала.

*Динамический диапазон* ПРОМ, характеризующий его способность преобразовывать как самые малые, так и большие уровни оптического сигнала, составляет 18...60 дБ, в зависимости от скорости передачи.

Типовый ПРОМ содержит входной РОС или отрезок ОК, фотодиод, электронные схемы обработки электрических сигналов и стабилизации режимов работы, объединенные в единую конструкцию.

### 4.7 Регенератор оптических цифровых сигналов

Волоконно-оптический линейный тракт ВОСП-ОК содержит зачастую два ОВ в оптическом кабеле, которые подключаются к аппаратуре с помощью РОС. Через определенные участки, называемые участками регенерации, включаются обслуживаемые или необслуживаемые регенерационные пункты (НРП), предназначенные для регенерации импульсов, искаженных вследствие потерь и дисперсии в оптическом тракте. Принцип работы одноканального регенератора поясняет структурная схема, представленная на рис. 4.14, где ПРОМ и ПОМ – соответственно приемный и передающий оптические модули; УК – усилитель-корректор; ПУ – пороговое (решающее) устройство; УС – устройство синхронизации.



Рис. 4.14. Стуруктурная схема оптического регенератора

Ha В регенератор происходит преобразование в ПРОМ входе ослабленных и искаженных оптических цифровых сигналов в электрические, их усиление в УК и коррекция, выработка исходной формы в ПУ и временных соотношений сигналов в УС, после чего они снова преобразуются в ПОМ в оптические. Со стороны А и со стороны Б к регенератору подводят по два ОВ, одно из которых используется для передачи сигналов в направлении А-Б, другое – в направлении Б-А. Если в ОК используются *т* пар ОВ для работы m ВОСП-ОК, то в регенерационном пункте устанавливаются m регенераторов. Такие регенераторы принято называть регенерационными ретрансляторами.

Разрабатывается компонент ВОСП, предназначенный для регенерации цифрового оптического сигнала без его преобразования в электрический, называемый оптическим регенератором. В основе его работы лежит нелинейный способ обработки оптических сигналов (см. п. 9).

### 4.8 Основные оптические интерфейсы ВОСП-ОК

Для ВОСП-ОК рекомендации ITU-Т регламентируют оптические и электрические интерфейсы (стыки) систем СШИ всех уровней И производителей. В частности, к параметрам оптических интерфейсов, определенных рек. G.957, относятся: длина волны оптического излучения, диапазон длин волн, ширина спектральной линии излучения, уровень на передаче, коэффициент экстинкции, оптической мощности уровень чувствительности приемного устройства при заданном коэффициете ошибки для даной скорости передачи. Выбор значений этих параметров определяется передачи информации максимальной скоростью И длиной линии. Соответственно рек. G.957 ВОСП-ОК СЦИ классифицируются следующим образом:

1) по типу и месту применения (коду применения):

– внутриобъектовые ВОСП-ОК, индексируемые буквой I (inter);

– ВОСП-ОК для коротких межстанционных связей, индексируемые буквой S (short);

– ВОСП-ОК для длинных межстанционных связей, индексируемые буквой L (long);

– ВОСП-ОК для очень длинных межстанционных связей, индексируемые буквой V (very);

– ВОСП-ОК для сверхдлиных межстанционных связей, индексируемые буквой U (ultra);

2) по номинальной скорости передачи цифрового сигнала (СТМ-1 (155,52 Мбит/с), СТМ-4 (622,08 Мбит/с), СТМ-16 (2488,32 Мбит/с), СТМ-64 (9953,28 Мбит/с), СТМ-256 (39763,12 Мбит/с)) и индексируются цифрой, соответствующей уровню иерархии после указанных букв;

3) по номинальной длине волны источника излучения (1310 нм и 1550 нм) и индексируются соответственно цифрами 1 и 2 при использовании ОМОВ G.652;

4) по типу оптического волокна в ОК соответственно рекомендации G.655 при длине волны 1550 нм и индексируются цифрой 5. Например, код применения L-16.5 означает ВОСП-ОК для длинных межстанционных связей со скоростью передачи цифрового сигнала СТМ-16, номинальной длины волны 1550 нм и типа оптического волокна G.655.

При заключении контрактов на поставку оборудования изготовитель может с целью увеличения диапазона перекрываемого затухания при условии использования оборудования одного производителя в пределах проектируемого волоконно-оптического тракта предлагать оборудование с отклонениями параметров оптического интерфейса (стыка). В этом случае в обозначении кода применения изготовителем используется обозначение JE (joint engineering). Например, вместо L-16.3 код применения принимает вид L-16.3JE или JE-16.3.

В таблицах 4.1...4.5 приведены параметры оптических интерфейсов систем передач СТМ-1...СТМ-256. Для повышения энергетического потенциала системы в аппаратуре предусмотрено использование волоконнооптических усилителей: на передающей стороне – усилителя мощности с уровнями выходных мощностей 10, 13, 15 дБм; на приемной стороне – предварительного усилителя с коэффициентом усиления до 17 дБ при коэффициенте шума меньше 7 дБ.

# Таблица 4.1. Параметры оптических интерфейсов (стыков) СТМ-1

Скорость передачи, Мбит/с	155,5	Мультиплексор ТМ 1/1		
Код применения (G.957)	S-1.1	L-1.1	L-1.2; L-1.3	
Рабочий диапазон длин волн, нм	12701360	12851330	15301560	
Тип источника излучения	MLM (ЛД со многими продольными модами)	MLM	SLM (ЛД с единственной продольной модой)	
Спектральные характеристики:				
максимальная ширина полосы				
излучения на уровне –3 дБ, нм	4	3	-	
на уровне –20 дБ, нм	-	-	1	
подавление боковых мод относительно				
центральной частоты, дБ	-	_	30	
Средняя вводимая в волокно мощность:				
максимум, дБм	-8	2	2	
минимум, дБм	-15	-5	-5	
перекрываемое затухание, дБ	8,2	10	10	
Минимальная чувствительность ПРОМ				
(при BER 10 <sup>-10</sup> ), дБм	-34	-34	-34	
Минимальный уровень перегрузки, дБм				
Максимальний коэффициент отражения	-3	-3	-3	
в точке S, дБ	25	25	25	

Скорость передачи, Мбит/с	622,04						
Код применения интерфейса (G.957)	S-4.1	L-4.1	L-4.2 L-4.3	JE-4.1 JE-4.2	и си оптиче мощи U-4.2 b10 U-4.3 b10	Інтерфейси спользован еского уси. ности (Воо U-4.2 b12 U-4.3 b12	ы нием пителя ster) U-4.2 b16 U-4.3 b16
Коэффициент ошибок	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$
Рабочая длина волны, нм	1285- 1330	1296- 1329	1530- 1570	1530- 1560	1530- 1560	1530- 1560	1530- 1560
Уровень мощности излучения, дБм	-11	-0,5	-0,5	4,5	11	13	17
Диапазон перекрываемого затухания, дБ	0-18	5-30	10-32	14-38	21-44	23-46	25-50
Длина регенерационной секции, км	0-31,1	2,2-57,8	17,1-80	28,6-97,1	48,6-114,3	54,3-120	60-131,4
Тип источника излучения	ЛД Фабри–Перо со снижен- ной мощ- ностью излучения	То же, с номиналь- ной мощ- ностью излучения	ЛД с РОС и номиналь- ной мощ- ностью излучения	ЛД с РОС и повышен- ной мощ- ностью излучения	_	_	_
Максимальный спектр излучения на уровне 0,5, нм	меньше 2,5	меньше 1,7	меньше 0,5	меньше 0,5	_	_	_
Минимальный коэффициент подавления боковых мод, дБ			больше 30	больше 30	_	_	Ι
Тип фотоприемника	Ge-ЛФД в режиме номиналь- ной чувствитель- ности	InGaAs- ЛФД в режиме номин. чувствите ль-ности	InGaAs- ЛФД в режиме повышен- ной чувствите льности	InGaAs- ЛФД в реж. ном. чувств. с оптичес- ким предусиле- нием	_	_	_
Чувствительность при 10 <sup>-10</sup> BER, дБм	-34	-36	-39	-45	_	_	_
Уровень перегрузки, дБм	-3	-8	-17	-15	-	-	_

**Примечанием.** b10, b12, b16 – для совместной работы с волоконно-оптическими усилителями мощности на 10, 12, 16 дБ. Прочерки означают возможность применения ПОМ и ПРОМ со спектральными характеристеками, которые выбираются проектировщиком в зависимости от типа ОМОВ и длины линии

# Таблица 4.3. Параметры оптических интерфейсов СТМ-16

Параметры		Величина							
Код применения	L-16.1 S-16.1	L-16.2 L-16.3	JE-16.1 JE-16.2 JE-16.3		JE-16.2 JE-16.3				
Скорость передачи, Мбит/с		2488,32							
Линейний код			Бинарный 🛛	NRZ					
Передающий оптический модуль, контрольная точка S									
Тип источника излучения	ЛД с РОС и мощностьк	номинальной э излучения	ЛД с РОС, с внешним модулятором и повышенной мощностью излучения						
Рабочая длина волны излучения, нм	1293-1328	1510-1560	1293-1328	1510-1560	1530-1560				
Максимальная ширина полосы излучения, нм	менше 1	менше 0,6	менше 1	менше 0,6	менше 0,1				
Коэффициент подавления боковых мод, дБ	больше 30	больше 30	больше 30	больше 30	больше 30				
Глубина модуляции, дБ	больше 8,2	_	больше 8,2	_	_				
Уровень вводимого в волокно излучения, дБм	-30	-30	-12	-12	С оптическим усилителем передачи 1316				
При	емный опти	ческий моду.	пь, контроль	на точка <i>R</i>					
Тип фотоприемника	Ge-ЛФД в режиме номиналь- ной чувствитель- ности	InGaAs-ЛФД в режиме номиналь- ной чувствитель- ности	InGaAs-ЛФД в режиме номиналь- ной чувствитель- ности	InGaAs-ЛФД в режиме повышенной чувствитель- ности	InGaAs-ЛФД в режиме повышенной чувствителности				
Код применения	L-16.1 S-16.1	L-16.2 S-16.3	L-16.1 S-16.1	L-16.2 S-16.3	L-16.2 S-16.3				
Уровень минимальной принимаемой мощности, дБм	-27	-28	-27	-29,5	с предварительным ВОУ –37				
Уровень перегрузки, дБм	0	-6	-6	-6	-15				
Пали сонолго и		~			<b>TT TT</b>				

**Примечание**. Изготавливается оборудование СТМ-16 с источником излучения – ЛД Фабри–Перо с одной продольной модой (SLM), который уступает ЛД с распределеннойобратной связью.

# Таблица 4.4. Параметры оптических интерфейсов СТМ-64

Тип интерфейса	S-64.2a (S-64.3a)	LEY67	LEY69	LEY97	L-64.2b	L-64.3	LEY67+ b	LEY2xy (DWDM comp.)
Скорость передачи, Мбит/с	9953,28							
Типовая длина элементарной секции, км	_	40	60	40	_	_	80	_
Тип лазерного диода	-	EML	MZ	EML	-	-	_	MZ
Передающи	й оптичес	ский мо,	дуль в	контро	эльной т	очке М	IPI-S	
Рабочая длина волны, нм	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565
Значение максимальной выходной мощности, дБм	2	2	2	2	13	13	13	-4,8
Значние минимальной выходной оптической мощности, дБм	-1	-4	-1	-1	10	10	10	-6,2
Подавление боковых мод, дБ	30	30	30	30	_	_	30	35
Минимальная глубина модуляции, дБ	8,2	10	10	10	8,2	8,2	8,2	12
Значения в основном	оптическ	ом тран М	сте меж IPI-R	кду точ	ками но	рмиро	вания М	PI-S и
Диапазон								
перекрываемого затухания, дБ:								
максимальный	11	11	18	11	22	22	22	_
минимальный	7	11	10	5	16	16	16	—
Максимальная хроматическая дисперсия, пс/нм	800 (130)	800	1200	800	1600	260	1600	_
Среднее значение измеренной поляризационно-модовой дисперсии, пс	10	10	10	10	10	10	10	_
Минимальное затухание отражения в точке MPI-S, включая РОС, дБ	24	24	24	24	24	24	24	24
Максимальное дискретное отражение между точками MPI-S и MPI-R, дБ	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27

	,							
Тип интерфейса	S-64.2a (S-64.3a)	LEY67	LEY69	LEY97	L-64.2b	L-64.3	LEY67+b	LEY2xy (DWDM comp.)
Приемный оптический модуль в соответствующей точке MPI-R								
Минимальная чувствительность, дБм	-18 (-17)	-18,5	-21	-14	-14	-13	-14 (-21)	-20
Минимальная перегрузка	-8	-13	-8	-3	-3	-3	-3 (-8)	-12,5
Максимальные оптические потери, дБ	2 (1)	2	2	2	2	1	2	2
Максимальное отражение от приемника, измеренное в точке MPI-R, дБ	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27
Соотношение с/ш, дБ	_	24	24	24	_	_	24	18,5

## Окончание таблицы 4.4

# Таблица 4.5. Параметры оптических интерфейсов СТМ-256

Параметры	Величина
Код применения, NRZ	I.256-2; L.256-1; L.256-2; L.256-3
Рабочая длина волны, нм	12851330; 15301565
Максимальная ширина спектра излучения на уровне	≤ 0,52
– 20 дБ, нм	
Коэффициент подавления боковых мод, дБ	≥ 45,2
Уровень оптического излучения, вводимого	1,5
в волокно, дБм	
Минимальное затухание отражения в точке MPI-S, дБ	36
Перекрываемое затухание между пунктами	11,9
МРІ-Ѕ и МРІ-R, дБ	
Минимальная чувствительность приема, дБм	≤ - 20,1
Уровень перегрузки ПРОМ, дБм	$\geq 0$
Максимальное затухание отражения в точке MPI-R, дБ	- 42
Соотношение оптических мощностей с/ш, дБ	≥ 25
(при использовании КВОУ и ВКР-усилителей	
на линии 560 км)	

## 4.9 Недостатки одноканальных некогерентных ВОСП-ОК

Передача оптических информационных сигналов началась с момента изобретения лазера (1960 г.) и осуществлялась в открытой приземной атмосфере и в космосе. Создание многомодового оптического волокна с приемлемым затуханием положило начало бурного развития волоконнооптической одноканальной передачи сигналов второго поколения. переносимых одной оптической несущей вдоль ОВ. В таких одноканальных волоконно-оптических системах передачи (ВОСП-ОК) преимущественно используется прямая модуляция цифровым электрическим сигналом интенсивности оптического излучения (несущей) полупроводниковых лазеров или светодиодов при передаче. На приеме осуществляется прямая демодуляция принимаемой интенсивности (детектирование) (мошности) оптических сигналов с помощью фотодиодов.

ВОСП прямой модуляции и прямого детектирования могут работать как по многомодовым, так и по одномодовым оптическим волокнам в одном из трех окон прозрачности. Такие ВОСП существенно превосходят электрические системы передачи по металлическим кабелям и радиорелейным линиям связи как по дальности, так и по объему передаваемой информации. Однако, наряду с преимуществами, ВОСП второго поколения свойственны следующие недостатки:

1 при многомодовой передаче импульсные оптические сигналы в OB претерпевают большую модовую дисперсию и повышенное затухание вследствие различия длин путей распространения разных мод, что приводит к сравнительно небольшим длинам участков регенерации, определяемым как дисперсией, так и затуханием;

2 частое размещение регенерационных пунктов при сравнительно высокой скорости передачи цифровых сигналов приводит К удорожанию ВОСП в целом, удорожанию технического ее обслуживания, повышенному энергопотреблению ее электронными блоками. Последнее вынуждало строить дополнительные линии электропередачи или закладывать в оптические кабели дистанционного электропитания необслуживаемых мелные жилы для регенерационных пунктов, что, в свою очередь, приводит к необходимости принятия дополнительных мер защиты ВОСП от внешнего электромагнитного опасного влияния. Все перечисленное снижает надежность и долговечность BOCIT;

3 недостаточная чувствительность приемного оптического модуля (ПРОМ) прямого детектирования, находящаяся на уровне примерно 700 фотон/бит, где фотон (квант) – наименьшая порция электромагнитного излучения данной частоты, равный hf: h – постоянная Планка, равная  $2,1\cdot10^{-34}$  Дж·с; f – оптическая частота, Гц;

4 при использовании в ВОСП прямой модуляции и детектирования широкополосных источников оптического излучения возникает значительная хроматическая дисперсия и неэффективно используется полоса частот окна прозрачности ОВ, так как нет возможности при этом осуществлять его мультиплексирование.

## Контрольные вопросы

- 1 Когда необходимы когерентные оптические несущие при одноканальной передаче сигналов?
- 2 На какие параметры передачи сигналов влияют когерентные условия? Назовите эти условия.
- 3 Какой вид модуляции интенсивности оптического излучения (прямой или внешней) предпочтителен и почему?
- 4 Объясните, почему в электроабсорбционном модуляторе возможна скорость модуляции намного выше, чем в других описанных модуляторах?
- 5 Определите место включения вентиля в схеме рис. 4.2, сознательно опущенного для простоты изображения. Укажите его назначение.
- 6 Уровень принимаемого сигнала должен быть выше чувствительности ПРОМ на величину аппаратурного запаса до 6 дБ. Где хранится указанный запас мощности сигнала?

## 5 ОДНОМОДОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА И КАБЕЛИ ДЛЯ КОГЕРЕНТНЫХ ВОСП

#### 5.1 Изотропные одномодовые оптические волокна

Для поддержания когерентных условий передачи оптических сигналов необходим устойчивый одномодовый режим распространения первой в порядке возбуждения волны HE<sub>11</sub>.

В круглом изотропном одномодовом OB могут распространяться две взаимно-ортогональные моды  $HE_{11}^x$  и  $HE_{11}^y$ , представляющие собой почти линейно-поляризованные моды (рис. 5.1), которые поэтому можно обозначать  $LP_{01}$  [2]. Частотная область одномодового режима распространения указанных мод ограничена сверху критической нормированной частотой следующей в порядке возбуждения линейно-поляризованной моды  $LP_{11}$ ,

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA < V_{k,} \tag{5.1}$$

где *а* – эффективный радиус сердцевины OB; *NA* – числовая его апертура; λ – рабочая длина волны передачи сигналов (подробней см., например, в [2]).



Рис. 5.1. Взаимно-ортогональные поляризации моды НЕ<sub>11</sub>

Для обеспечения максимальной длины регенерационного участка требуется минимальное затухание, которое ограничивается снизу рэлеевским рассеянием. Поэтому целесообразно использовать третье и четвертое окна прозрачности, условно обозначаемые как  $\lambda = 1,55$  мкм, где обеспечивается наибольшая полоса частот пропускания при наименьшем затухании 0,2...0,25 дБ/км и может быть даже меньше.

Основными факторами, ограничивающими ширину полосы частот высокоскоростной передачи цифровых сигналов (скорости передачи) и длины участка регенерации в одномодовых ОВ, являются материальная  $\sigma_{\rm M}$  и волноводная  $\sigma_{\rm B}$  дисперсии, величины которых прямо пропорциональны ширине спектральной линии излучения лазера на передаче [2] (см. Приложение). Суммарная хроматическая дисперсия равна их сумме:

$$\sigma_{\rm xp} = \sigma_{\rm M} + \sigma_{\rm B} = \sigma_{\lambda} \left( M_{\rm M} + M_{\rm B} \right), \tag{5.2}$$

где σ<sub>λ</sub> - среднеквадратичная ширина спектральной линии излучения лазера;  $M_{\rm M}$ ,  $M_{\rm B}$  - удельные материальная и волноводная дисперсии оптического волокна соответственно.

68

### 5.1.1 Стандартное оптическое волокно

Стандартным одномодовым волокном ОВ называется волокно, у которого  $M_{\rm M} \approx 0$  вблизи  $\lambda \approx 1.3$  мкм, и которое маркируется как SF(Standart Fiber) (рис. 5.2, а). Стандартное ОМОВ типа Е2, параметры которого приведены в табл. 5.1, предназначено для работы в диапазоне длин волокон 1285...1330 нм, где коэффициент затухания составляет величину меньше или равную 0,36 дБ/км, а величина удельной по спектру хроматической дисперсии достигает минимального, близкого к нулю, значения. Возможно также использование этого ОМОВ в диапазоне длин волн 1526...1565 нм, где 0,2...0,3 затухание равно дБ/км, a указанная дисперсия достигает 16...18 пс/нм км. Используется такое волокно, как правило, для ВОСП-ОК. Возможно его использование и для многоканальных ВОСП на ограниченных по протяженности ВОЛП.

Сюда же могут быть отнесены одномодовые OB с минимизированным затуханием на длине волны 1550 нм и смещенной длиной волны отсечки до величины 1530 нм (OMOB типа  $E_4$ ), предназначенные для ВОСП-ОК. Такое OMOB имеет большую, чем у OMOB типа  $E_2$ , сердцевину, что позволяет передавать повышенную мощность, но имеют и повышенную хроматическую дисперсию (см. табл. 5.1). ОК с такими волокнами используются для прокладки на подводных линиях и непригодны для строительства многоканальных ВОСП.

### 5.1.2 Одномодовые волокна со смещенной хроматической дисперсией

Волноводная дисперсия как функция длины волны всегда отрицательна, т. е.  $M_{_{\rm B}}(\lambda) < 0$ . Обе составляющие дисперсии  $M_{_{\rm M}}$  и  $M_{_{\rm B}}$  на длине волны нулевой  $\lambda_0$ дисперсии могут быть реализованы равными по величине И противоположными по знаку. Поэтому целесообразно сместить нулевую дисперсию в область  $\lambda = \lambda_0 = 1,55$  мкм, где наблюдается минимум затухания. Необходимое смещение достигается увеличением  $|M_{\rm B}|$  на длине волны  $\lambda$  = 1,55 мкм путем уменьшения диаметра сердцевины ОМОВ (рис. 5.2, б), с одновременным увеличением количества легирующих примесей GeO<sub>2</sub> в ней, обеспечивающих увеличение концентрации поля в сердцевине. Это приводит к некоторому увеличению показателя преломления сердцевины и увеличению называется одномодовым ОВ со смещенной нулевой затухания. Такое ОВ *дисперсией* (ZDSF – Zero Dispersion – Shifted Single mode Fiber). Вследствие подавленной в середине третьего окна прозрачности дисперсии стало, казалось использовать мультиплексирование бы, возможным третьего окна прозрачности и квантовые волоконно-оптические усилители (КВОУ) на основе таких одномодовых OB, легированных эрбием Er, диапазон длин волн усиления которых простирается от 1,53 до 1,56 мкм и шире.



Рис. 5.2 – Профили показателей преломления ОМОВ и спектральне хактеристики зависимостей их удельных материальной  $M_{\rm M}$ , волноводной  $M_{\rm B}$  и хроматической дисперсий M для: а – стандартного ОМОВ; б – ОМОВ со смещенной хроматической дисперсией (нулевой или ненулевой); в – ОМОВ с двумя длинами волн нулевой дисперсии; г – многослойной оболочки ОМОВ

Таблица 5.1	. Требования к	характеристикам	OMOB
-------------	----------------	-----------------	------

Vanauranuaruua	Тип ОМОВ							
Характеристика	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$			
Геометрические характеристики								
Неконцентричность сердцевины, мкм	≤0,8	≤0,8	≤0,8	≤0,8	≤0,8			
Диаметр оболочки, мкм	$125 \pm 1$	$125 \pm 1$	$125 \pm 1$	$125 \pm 1$	$125 \pm 1$			
Некруглость оболочки, %	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2			
Диаметр покрытия, мкм	$250 \pm 15$	$250 \pm 15$	$250 \pm 15$	$250 \pm 15$	$250 \pm 15$			
Передаточные характеристики	L L			I				
Диаметр модового поля, мкм:								
$\lambda = 1310$ нм	$(9,0-9,5)\pm0,7$	_	_	_	_			
λ = 1550 нм	_	$(7,8-8,5) \pm 0,7$	$10,5 \pm 0,7$	$(8-11) \pm 0,7$	$(8-11) \pm 0,7$			
Длина волны отсечки в ОК, нм	≤1270	≤1270	≤1530	≤1480	≤1450			
Коэффициент затухания на опорной								
длине волны, дБ/км:								
λ = 1310 нм	≤0,36	_	-	_	—			
λ = 1550 нм	≤0,22	≤0,22	≤0,20	≤0,22	≤0,22			
λ = 1625 нм	_	_	_	≤0,25	≤0,25			
λ = 1383 нм	_	_	_	_	$\leq 0.35^{2}$			
λ = 1460 нм	_	_	_	_	≤0.40			
Коэффициент хроматической					- , -			
дисперсии, пс/нм км:								
$\lambda = (12851330)$ нм	≤3,5	_	_	_	_			
$\lambda = (15251575)$ нм	≤18	≤3,5	≤20	_	_			
$\lambda = (15301565)$ нм	_	_	_	$\pm(0,1-10)$	1,0–14			
Наклон дисперсионной								
характеристики в области длины								
волны нулевой дисперсии, пс/нм <sup>2</sup> ·км:								
$\lambda = (12851330)$ нм	≤0,093	_	_	_	_			
λ = (15251575) нм	—	≤0,085	≤0,06	_	_			
Коэффициент поляризационной			,					
модовой дисперсии, пс/км <sup>1/2</sup>	≤0,2	_	_	≤0,2	≤0,2			
Затухание отражения. дБ	>50	>50	>50	>50	>50			
Прирост затухання								
из-за макроизгибов								
(100 витков × Ø60 мм), дБ;	-0.5	10 7	10 <b>F</b>	10 <b>F</b>	10 <b>F</b>			
λ = 1550/1625 нм	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5			
Примечание. 1 – здесь прив	ведены обобы	щенные хара	ктеристики	OMOB pas	ных фирм-			
изготовителей, удовлетворяющие рекомендациям ITU-T: 2 – для ОМОВ с полавленным								

изготовителей, удовлетворяющие рекомендациям ПО-Т; затуханием излучения в области гидроксильного пика

Однако в области длин волн сигналов, непосредственно примыкающей к нулевой дисперсии ZDSF, появляются большие уровни шумов и нелинейные искажения сигналов из-за нелинейных эффектов, возникающих в этой области спектра, в первую очередь из-за четырехволнового смешения (см. п. 8.3). Использование такого ОМОВ (типа  $E_3$ , параметры которого сведены в таблице 5.1) возможно для ВОСП-ОК и даже ВОСП СРК (со спектральным разделением оптических каналов) при ограниченной длине регенерационного участка и ограниченной мощности оптических канальных сигналов на передаче. Кроме этого, необходимо исключать оптический канал или даже группу оптических каналов ВОСП СРК, которые попадают в спектральную зону нулевой дисперсии или рядом с нею.

Длину волны  $\lambda_0$  нулевой хроматической дисперсии в случае мультиплексирования и применения КВОУ необходимо выносить за пределы полосы длин волн усиления эрбиевого оптического усилителя. Это достигается в ОМОВ путем усложнения профиля показателя преломления. Вынос точки  $\lambda_0$  нулевой хроматической дисперсии возможен как влево, так и вправо от полосы длин волн усиления эрбиевого оптического усилителя. Такие ОМОВ называются ОМОВ с *ненулевой смещенной дисперсией* (NZDSF – Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber).

Затухание в таких ОМОВ удается уменьшить выбором оптимального преломления (современная профиля показателя технология позволяет изготовить ОВ с произвольным профилем показателя преломления). При вариации профиля изменяется не только затухание, но и чувствительность ОВ к изгибам, а также изменяется диаметр модового поля, что сказывается на величине оптических потерь в соединениях волокон. Увеличение диаметра модового поля (пятна моды HE<sub>11</sub>) дает возможность снизить удельную энергию передаваемых оптических сигналов, приходящуюся на единицу объема стекла ОВ, при заданном уровне на передаче или при заданной удельной энергии сигналов в ОВ – увеличить длину участка регенерации по затуханию. Вариацией профиля показателя преломления (ПП) получены одномодовые ОВ с затуханием 0,15 дБ/км при  $\lambda = 1,55$  мкм. На рис. 5.2, в показан сложный профиль показателя преломления, который обеспечивает нулевую дисперсию при двух длинах волн –  $\lambda_{01}$  и  $\lambda_{02}$  и сглаженную спектральную кривую дисперсии в диапазоне  $\lambda_{01} < \lambda < \lambda_{02}$ . При использовании такого OB для мультиплексирования некоторым количеством ВОСП-ОК в указанном спектре длин волн и усиления волоконно-оптического усилителя необходимо, чтобы длины волн нулевой дисперсии  $\lambda_{01}$  и  $\lambda_{02}$  были выведены влево и вправо за пределы используемого диапазона для передачи сигналов, что существенно снижает влияние нелинейных эффектов на преобразование полос частот сигналов вблизи этих длин волн и взаимное влияние между оптическими каналами (кросс-модуляцию).

Для ВОСП СРК со спектральным разделением каналов необходимо создавать ОМОВ с весьма пологой дисперсионной кривой, имеющие малую хроматическую дисперсию в широком спектральном диапазоне 1,3...1,6 мкм. Это достигается путем использования многослойной оболочки ОМОВ специального профиля ПП. На рис. 5.2, г показаны измеренные дисперсионные кривые параметра

$$D \approx -\frac{\lambda d^2 n}{c d \lambda^2}$$
в зависимости от длины волны для трех разных типов ОМОВ. Метки 1, 2 и 4 относятся соответственно к ОМОВ с одной, двумя и четырьмя оболочками. ОМОВ с четырехслойной оболочкой характеризуется низкой дисперсией ( | D | ≤ 1 пс/км⋅нм) в широкой спектральной области от 1,25 до 1,65 мкм [3].

В 1993 кампания Lucent Technologies выпустила г. первое специализированное оптическое волокно True Wave для передачи сигналов с мультиплексированием каналов (DWDM) В третьем окне плотным прозрачности  $\lambda_3 = 1530...1560$  нм. Как показано на рис. 5.3, у волокон True Wave снижен (относительно неоптимизированного одномодового ОВ типа LEAF) наклон спектральной кривой хроматической дисперсии. Длина волны нулевой дисперсии ( $\lambda_0 \leq 1523$  нм) вынесена за спектральную полосу усиления ВОУ.



Рис. 5.3. Спектральная зависимость хроматической дисперсии OMOB типов SF, ZDSF, NZDSF

Созданное позднее волокно типа NZDSF марки True Wave RS\_ способно работать в третьем –  $\lambda_3 = 1530...1560$  нм и четвертом –  $\lambda_4 = 1560...1620$  нм – окнах прозрачности при соблюдении норм ITU-T на дисперсию и на затухание. Преимуществами этого волокна (по сравнению с волокном True Wave) являются: увеличенная на 55 % рабочая ширина спектра, уменьшенный на 36 % наклон спектральной зависимости хроматической дисперсии и низкие потери на изгибах из-за многослойной специальной оболочки волокна.

ОМОВ семейства NZDSF (типа  $E_5$ , см. табл. 5.1) совместно с КВОУ позволяют внедрять технологию спектрального разделения каналов (СРК, WDM-Wavelength Division Multiplexion) и плотного спектрального мультиплексирования (DWDM-Dence WDM). Использование этих технологий мультиплексирования позволяет использовать оптические каналы шириной

спектра 100 или 50 ГГц и радикально увеличивать пропускную способность ВОСП. Значение хроматической дисперсии в рабочем диапазоне 1530...1565 нм составляют ±(0,1...10) пс/км·нм. Такая дисперсия позволяет обеспечить скорость передачи до 10 Гбит/с в каждом из оптических каналов, и в то же время она является достаточно высокой для подавления в ОМОВ нелинейных эффектов при использовании СРК-технологий.

Важная особенность данного типа волокон возможность ИХ производства с одинаковой по величине, но противоположной по знаку NZDSF<sup>+</sup>), что дает возможность в процессе (NZDSF<sup>-</sup>и дисперсией строительства компенсировать дисперсию путем группирования линии и обеспечивать суммарное значение дисперсии строительных длин ОК близким нулю на приеме сигналов без применения дополнительных устройств компенсации дисперсии (см. п. 7.11).

#### 5.1.3 Всеволновое одномодовое оптическое волокно

Волокно марки All Wave (всеволновое), впервые выпущенное той же компанией, способно работать в диапазоне длин волн от 1260 до 1675 нм с затуханием, приведенным на рис. 5.4. Этого удалось достичь путем подавления пика затухания на гидроокисном остатке воды ОН- на длине волны 1383±3 получено затухание, не превышающее 0.31 дБ/км. HM, где Неравномерность затухания в спектре 1310...1550 нм не превышает 0,1 дБ/км. Длина волны нулевой дисперсии  $\lambda_0 = 1300...1322$  нм. Максимальная крутизна нарастания хроматической дисперсии в точке λ<sub>0</sub> составляет 0,092 пс/км·нм<sup>2</sup>. Номинальная крутизна на λ<sub>0</sub> составляет 0,088 пс/км·нм<sup>2</sup>. Поляризационная дисперсия  $\leq 0,1$  пс/ км<sup>1/2</sup>. Диаметр модового поля  $9,3 \pm 0,5$  мкм на  $\lambda = 1310$  нм и 10,5  $\pm$  0,5 мкм на  $\lambda$  = 1550...1600 нм. Длина волны отсечки меньше либо равна 1260 нм (до появления волны LP<sub>11</sub>).



Весь диапазон длин волн пропускания всеволнового ОМОВ (типа *E*<sub>6</sub> табл. 5.1) решением ITU-T разбит для использования на следующие поддиапазоны:

O (original) – 12601360 нм;	C (conventional) – 15301565 нм;
E (extended) – 13601460 нм;	L (long) – 1565…1625 нм;
S (short) –14601530 нм;	U (ultra-long) – 16251675 нм.

Поддиапазон О может быть использован для мультиплексирования аналоговыми системами кабельного телевидения; спектр Е рекомендуется использовать под цифровую передачу со скоростью более 10 Гбит/с без оптического спектрального мультиплексирования. Спектры длин волн S, C, L, U могут использоваться под DWDM-трафик как в отдельности, так и в совокупности при скоростях передачи выше 2,5 Гбит/с в каждом оптическом канале.

## 5.1.4 Недостатки осесимметричных оптических волокон

В одномодовом ОВ симметричной относительно оси формы практически существуют две отдельные моды с поляризацией по двум ортогональным направлениям в плоскости поперечного сечения ОВ, условно обозначаемые НЕ<sup>е</sup> и НЕ<sup>о</sup> Если волноводная структура ОВ идеально симметрична, то обе ортогональной поляризацией имеют одинаковую постоянную моды С распространения, переносят равные значения энергий сигналов И не различаются. Именно по этой причине такие ОВ называются одномодовыми. Однако в реальных ОВ, вследствие промышленных дефектов эллиптичности и эксцентриситета сечения сердечника, возникает осевая асимметрия, при которой постоянные распространения двух ортогональных мод будут различными. Кроме того, на практике в одномодовых ОВ при изгибах волокна и возмущениях из-за температурных колебаний окружающей среды возникает анизотропия свойств OMOB вследствие происходит чего взаимное HE<sup>o</sup><sub>11</sub>, HEe преобразование энергий сигналов изменяются мод И ИХ 11 дисперсия поляризации, порождается поляризационная сигналов И межсимвольные искажения. Микрокристаллы стекла и колони легирующих ориентированные, примесей, случайно также являются причинами деполяризации мод и их взаимного преобразования, что также увеличивает поляризационную дисперсию. ПРОМ прямого детектирования неспособны устранять указанные пагубные явления. В когерентных ВОСП с гетеродинным приемным устройством флуктуации поляризации, не отслеживаемые его контроллером поляризации, снижают помехоустойчивость такого ПРОМ.

# 5.2 Однополяризационные оптические волокна с метрической анизотропией

Чтобы разрешить эту проблему на ранней стадии развития OB, увеличивали разницу  $\Delta\beta_1 = \beta_1^e - \beta_1^o$  постоянных распространения мод HE<sup>e</sup><sub>11</sub> и HE<sup>o</sup> соответственно, т. е. снимали вырождение этих мод. Получалось одномодовое OB с повышенной устойчивостью линейно-поляризованных волн, т. е. OB *с двойным лучепреломлением*. Называют его также BC с *единственной линейной поляризованной волной* однополяризационным. Устойчивость поляризации пропорциональна величине  $\Delta\beta_1$ , которая и реализуется осенесимметричным распределением профиля показателя преломления (диэлектрической проницаемости) следующими путями:

1 Введением *метрической (геометрической) анизотропии*, которая обеспечивается осенесимметричным поперечным сечением OB.

Примером таких OB с метрической анизотропией являются эллиптические OB с изотропным материалом (рис. 5.5, а, б). При этом OB могут быть с эллиптической сердцевиной и круглой оболочкой или с круглой сердцевиной и эллиптической оболочкой.

Если обозначить через  $n_1$  и  $n_2$  коэффициенты преломления соответственно сердцевины и оболочки, то эффективное значение показателя преломления определится как средневзвешенное значение для круглых сердцевины и оболочки:

$$n_{\ni \oplus} = \frac{n_1 P_1 + n_2 P_2}{P} = n_1 + (n_2 - n_1) \frac{P_2}{P},$$

где  $P = P_1 + P_2$ ,  $P_1$  и  $P_2$  – мощности, распространяющиеся соответственно в сердцевине и оболочке. Чем меньше  $(n_2 - n_1)$ , тем больше мощность  $P_2$ , и наоборот.

Для ОВ эллиптического поперечного сечения в направлениях поляризаций мод (осей х и у эллипса) эффективное значение показателя преломления  $n_{x \ э \phi} > n_{y \ э э}$ , следовательно и мощность волны, сосредоточенная в х-поляризации  $P_x = P_{1x} + P_{2x}$  больше мощности волны, сосредоточенной в у-поляризации, т. е..  $P_x > P_y$ . Значит, радиус пятна волны *x*-поляризации  $W_x$  больше радиуса пятна волны *y*-поляризации  $W_y$ ,

$$W_{\chi} \approx \sqrt{a_{\chi} \lambda \sqrt{2\Delta_{\chi}} / 2\pi n_{\chi \ni \Phi}} ; W_{y} \approx \sqrt{a_{y} \lambda \sqrt{2\Delta_{y}} / 2\pi n_{y \ni \Phi}} ;$$

где *a*<sub>*x*</sub>, *a*<sub>*y*</sub> – полуоси эллипса сердцевины;

$$\Delta_x = \frac{n_{1x} - n_{2x}}{n_{1x} + n_{2x}}; \qquad \qquad \Delta_y = \frac{n_{1y} - n_{2y}}{n_{1y} + n_{2y}}$$



Рис. 5.5. Поперечные сечения ОМОВ с метрической анизотропией

Такие ОВ маркируются EC – elliptical core (эллиптическая сердцевина) и при эллиптичности сердцевины  $(a_x + a_y)/(a_x - a_y)$ , равной 1,2...2, имеют затухание 13,4...122 дБ/км при числовой апертуре 0,14...0,28 на длине волны 0,85 мкм. Естественно, такие ОВ непригодны для использования в длинных ВОЛП.

2 Разновидностью OB с метрической анизотропией является OB, имеющее в осесимметричном поперечном сечении *различие химического состава*, т. е. неоднородные сердцевину и оболочку:

#### $n_1(r, \phi) = var; n_2(r, \phi) = var,$

реализованные, например, в виде, представленном на рис. 5.5, в, где 1 – сердцевина  $n_1$  (r,  $\varphi$ ); 2 – внутренняя оболочка  $n_2$  (r,  $\varphi$ ); 3 – внешняя оболочка, легированная  $B_2O_3$ , оказывающая из-за повышенного значения коэффициента температурного сжатия (растяжение) существенное одностороннее сжатие на внутренние сердцевину и оболочку и вызывающая повышенное значение показателей преломления в направлении сил сжатия и уменьшение коэффициента преломления в направлении, перпендикулярном силам сжатия.

3 К категории OB с метрической анизотропией относится OB, получившее название "панда" (рис. 5.5, г), содержащее две сердцевины с  $n_1 > n_2$ , параллельно уложенные в общую оболочку с  $n_2$ .

4 Можно изготовить OB с анизотропией силовых напряжений, которая может быть реализована, например, различием химических составов стекол сердцевины и оболочки, а также форм их поперечных сечений. Например, сердцевина OB круглой формы изготовлена из кварцевого стекла, легированного двуокисью германия (SiO<sub>2</sub>:GeO<sub>2</sub>), а оболочка эллиптической формы изготовлена из кварцевого стекла, легированного окисью бора (SiO<sub>2</sub>:B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), уменьшающего показатель преломления чистого кварцевого стекла (рис. 5.5, д).

В силу значительных температурных коэффициентов расширения (сжатия) стекол с окисью бора в сердцевине ОВ возникают анизотропные механические напряжения (фотоупругость) вдоль осей x и y эллипса и, как результат, – двулучепреломление ( $\beta_x \neq \beta_y$ ). Для получения волоконного модуля указанное ОВ облачается в круглую защитную оболочку. В прямолинейном ОВ получено затухание, не превышающее 0,53 дБ/км на длине волны 1,3 мкм. Однако метрическая кривизна (изгиб) существенно изменяли параметры такого ОВ, из-за чего он не мог быть использован в оптическом кабеле, подверженном воздействию окружающей среды в протяженной линии (усадка грунтов, вибрации, температурные изменения и др.).

Основными параметрами ОВ с двойным лучепреломлением являются: – модальный коэффициент двойного лучепреломления

$$B_m = \frac{\Delta \beta_1}{k} = = \frac{c\Delta \beta_1}{\omega}, \qquad (5.3)$$

где k,  $\lambda$ , c – соответственно волновое число, длина волны и скорость света в вакууме;

- *длина интерференционных биений*, создаваемых модами HE<sup>e</sup><sub>11</sub> и HE<sup>o</sup><sub>11</sub>,

$$L = \frac{2\pi}{\Delta\beta_1} = \frac{\lambda}{B_m}.$$
(5.4)

Если в OB с двойным лучепреломлением ввести линейнополяризованную волну, то внутри OB *состояние поляризации* волны будет периодически изменяться вдоль OB (рис. 5.6) от линейной – к эллиптической и наоборот. Период повторения этих состояний – это длина биений, которую можно измерить, например наблюдая снаружи OB свет. По длине биений с помощью формул (5.3) и (5.4) можно определить  $B_m$  и  $\Delta\beta_1$ .

– временная разность групповых задержек сигналов обеих поляризованных волн (разность времени распространения сигналов, поляризационная дисперия)

$$\Delta \tau \approx B_m/c$$

Важными характеристиками ОВ с устойчивой поляризацией являются продольные потери мощности и поляризационные потери, переходные затухания. Последние определяются степенью переходных (перекрестных) связей между HE<sup>e</sup> и HE<sup>o</sup> волнами.



Рис. 5.6. Изменение состояния поляризации в ОМОВ с двойным лучепреломлением (без учета поляризационных потерь, т. е.. переходных затуханий)

Например, для ОВ типа "панда" с  $\Delta = 0,34$ , диаметром сердцевины 8,9 мкм, оболочки 200 мкм на длине волны 1,55 мкм получены модальное двулучепреломление  $B_m = 2,7\cdot10^{-4}...3,7\cdot10^{-4}$ ; переходные связи составляют минус (23,6...29) дБ; минимальные потери  $\alpha = 0,25...0,28$  дБ/км. Экспериментально изготовлено ОВ типа "панда" длиной 26 км из преформы диаметром 48 мм и длиной 470 мм с вышеуказанными характеристиками. Эти цифры указывают на то, что ОМОВ типа "панда" потенциально является весьма подходящей направляющей системой для когерентных ВОСП. Однако оно оказалось весьма дорогим из-за технологических трудностей изготовления.

# 5.3 Спиральные одномодовые оптические волокна

Требования по когерентному распространению волны HE<sub>11</sub> блестяще поддерживают спирально изогнутые ОМОВ или спиральные ОМОВ, чему и посвящается этот раздел.

## 5.3.1 Анизотропия изогнутых оптических волокон

Анизотропия оптических свойств различных световодов и устройств на их основе, связанная с механическими напряжениями в них, называемая *фотоупругостью*, находит широкое применение в компонентах ВОСП, оптических кабелях, модовых фильтрах, контроллерах поляризации в гетеродинных ПРОМ, многих датчиках физических величин. Из всех деформаций наибольшее распространение получили изгибные деформации OB, особенно в спираль, так как *спиральная линия* постоянного шага является кратчайшей линией между двумя точками, расположенными на различных образующих цилиндра. Поэтому спиральная укладка OB очень хорошо внутренне связана с тем цилиндром, на котором она находится.

В процессе вытяжки из расплава кварцевого стекла ОВ получаются прямолинейными и, как правило, ненапряженными, ввиду чего материал ОВ изотропен, а относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и показатель преломления  $n = \sqrt{\varepsilon}$  – скалярные функции координат r,  $\phi$  поперечного сечения OB. У качественных OB эти функции зависят только от радиальной координаты r:

$$\varepsilon_a(r) = \varepsilon_0 \varepsilon(r);$$
  $n(r) = \sqrt{\varepsilon(r)};$   $\mu_a = \mu_0$ 

Однако в процессе изготовления оптических кабелей и других оптических устройств на основе ОВ последние изгибаются по спиральной линии при комнатной температуре. При этом в материале ОВ возникают разнонаправленные механические напряжения, изменяющие скалярную функцию  $\hat{\varepsilon}(r)$  в тензорную функцию  $\hat{\varepsilon}$ .

В материалах таких изогнутых OB связь составляющих векторов электрической индукции  $\vec{D}$  и напряженности электрического поля  $\vec{E}$  записывается в виде

$$D_i = \sum_{m=1}^3 \varepsilon_0 \varepsilon_{im} E_m,$$

где  $i = 1, 2, 3 \equiv r$ ,  $\phi$ , z или 1, 2,  $3 \equiv x$ , y, z соответственно, в зависимости от выбранной системы координат.

Девятка элементов  $\varepsilon_{im}$ , характеризующих анизотропию диэлектрических свойств материала изогнутого OB, составляет тензор диэлектрической проницаемости

$$\hat{\varepsilon}_{a} = \varepsilon_{0} \begin{vmatrix} \varepsilon_{rr} & \varepsilon_{r\varphi} & \varepsilon_{rz} \\ \varepsilon_{\varphi r} & \varepsilon_{\varphi \varphi} & \varepsilon_{\varphi z} \\ \varepsilon_{zr} & \varepsilon_{z\varphi} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix} = \varepsilon_{0} \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}.$$
(5.5)

Функции элементов  $\varepsilon_{im}$  тензоров (5.5) в полярных и декартовых координатах в общем неодинаковы.

Элементы тензора  $\mathcal{E}_{im}$  связаны с элементами тензора деформации  $g_{im}$ , которые являются различными скалярными функциями координат *r*,  $\varphi$  или *x*, *y* поперечного сечения OB, его кривизны æ и кручения V:

$$a = \frac{R}{R^{2} + (p/2\pi)^{2}} ; \quad v = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{1}{R^{2} + (p/2\pi)^{2}}, \quad (5.6)$$

где *R*, *p* – радиус и шаг оси спирально изогнутого OB, соответственно относительно оси *Z* кабельного сердечника (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Геометрия спирального изгиба ОВ

Деформации  $g_{im}$ , вызванные изгибом OB, также описываются метрическим тензором  $\hat{g}$  по форме, аналогичной (5.5).

При раскручивании OB в прямую линию диагональные элементы диэлектрического тензора  $\varepsilon_{ii}$  и метрического тензора  $g_{ii}$  становятся одинаковыми и равными соответственно  $\varepsilon(r)$  и 1, а недиагональные элементы обращаются в нули. Следовательно, элементы диэлектрических и метрических тензоров типа (5.5) можно представить в виде

$$\varepsilon_{ii} = \varepsilon(r) + (\delta\varepsilon)_{ii}; \quad \varepsilon_{im} = 0 + (\delta\varepsilon)_{im}; \quad g_{ii} = 1 + (\delta g)_{ii}; \quad g_{im} = 0 + (\delta g)_{im}.$$
(5.7)

Элементы g<sub>ii</sub>, расположенные по главной диагонали формы типа (5.5), представляют собой деформации, параллельные оси *i*, т. е. сжатие вдоль оси *i g*<sub>*ii*</sub>ИЛИ положительных численных значениях растяжение при при отрицательных значениях  $g_{ii}$  сторон dx, dy, dz элементарного кубика стекла, мысленно вырезанного в теле прямолинейного ОВ в некоторой точке с координатами x, y, z (см. рис. 5.7). Остальные элементы  $g_{im}$  при  $i \neq m$ представляют собой изменение, которое претерпевает при деформации угол, первоначально стороны которого были параллельны ОСЯМ И i m. Соответствующие элементам *g<sub>im</sub>* растяжения или сжатия приводят К уменьшению или увеличению плотности материала и диэлектрической проницаемости в соответствующих точках х у z или r  $\phi$  z поперечного сечения OB. Функциональные зависимости элементов тензоров  $g_{im}$  и  $\varepsilon_{im}$  в полярных координатах получены в следующем виде [5]:

$$g_{rr} = g_{\varphi\varphi} = 1; \qquad g_{zz} = (1 - \alpha r \cos \varphi)^2 + v^2 r^2;$$
  

$$q_{\varphi z} = vr; \qquad g_{r\varphi} = g_{\varphi r} = g_{rz} = g_{zr} = 0;$$
  

$$\varepsilon_{rr} = \varepsilon_{\varphi} \ \varphi = \varepsilon(r); \\ \varepsilon_{\varphi z} = \varepsilon_{z\varphi} = -vr;$$
  

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon(r) - 2\alpha r \cos \varphi + \alpha^2 r^2 \cos^2 \varphi + v^2 r^2;$$
  

$$\varepsilon_{r\varphi} = \varepsilon_{\varphi r} = \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{zr} = 0.$$
(5.8)

Для материала OB, изогнутого по дуге окружности, выражения для элементов тензоров получаются из выражений (5.8) при p = 0 или v = 0.

Подставив в выражения (5.8) R = 0 или x = 0 при  $p \neq 0$ , получим формулы для элементов тензоров в прямолинейном OB, скрученном относительно собственной оси z.

5.3.2 Поляризующие свойства спиральных оптических волокон

В поперечных сечениях спирально изогнутых ОВ (СОВ) возникают выделенные направления минимаксных значений деформаций или диэлектрической проницаемости, определяющие поляризацию распространяющихся волн [6]. Эти выделенные направления в поперечном сечении ОВ вращаются вдоль оси оптического кабеля Z с угловой скоростью намотки OB.

В изогнутом по дуге окружности ОВ наибольшая деформация материала будет наблюдаться вдоль оси  $\vec{x}(\zeta)$ , определяемой только элементами  $g_{zz}$  и  $\mathcal{E}_{zz}$ . Волну, поляризация которой направлена вдоль наибольшего изменения диэлектрической проницаемости, принято называть *необыкновенной*  (extraordinare) и индексировать  $HE_{11}^{e}$ , а ортогональную ей волну – обыкновенной  $HE_{11}^{o}$  (ordinare).

Деформации  $g_{\varphi z}$  в спирально изогнутом ОВ соответствует пара элементов тензора деформации  $g_{xz}$  и  $g_{yz}$  в координатах *хуz*, которые в свою очередь связаны с элементами диэлектрического тензора  $\varepsilon_{xz}$  и  $\varepsilon_{yz}$  в виде:

$$g_{xz} = g_{zx} = -vy = -v \operatorname{rsin} \varphi = -\varepsilon_{xz};$$
  

$$g_{vz} = g_{zv} = vx = v \operatorname{rcos} \varphi = -\varepsilon_{vz}.$$
(5.9)

Элементы тензоров деформации  $g_{xz}$  и  $g_{yz}$ , а также элементы диэлектрического цензора  $\varepsilon_{xz}$  и  $\varepsilon_{yz}$  характеризуют деформацию материала OB в ^ ^ углах xz и yz соответственно. Следовательно, минимаксные по координате  $\varphi$  значения диэлектрической проницаемости в спирально изогнутом OB необходимо определять для волны HE $_{11}^{e}$  из условия

$$\frac{\partial \left(\varepsilon_{ZZ}^{e} + \varepsilon_{XZ}\right)}{\partial \varphi} = 0$$

откуда следует, что угол поляризации, отсчитываемый от оси  $\vec{x}(\zeta)$ , соединяющей центры OB и цилиндра (кабельного сердечника) радиуса *R*, на котором он намотан равен [6]

$$\varphi_{\min}^{e} = -\arctan \frac{v}{2e} = -\arctan \frac{p}{4\pi R}; \qquad (5.10)$$
$$\varphi_{\max}^{e} = \varphi_{\min}^{e} \pm \pi,$$

где направлению  $\phi_{\min}^{e}$  соответствует минимальное по  $\phi$  значение функции ( $\varepsilon_{zz}^{e} + \varepsilon_{xz}$ ) в четвертом квадранте поперечного сечения OB, а направлению  $\phi_{\max}^{e}$  – максимальное значение указанной функции во втором квадранте.

Зависимость угла поляризации волны  $HE_{11}^{e}$  от соотношения  $v/æ = p/2\pi R$ представлена на рис. 5.8, кривая 1. Из этого рисунка и выражения (5.10) следует, что, изменяя, например, шаг спиральной намотки при неизменном значении *R*, можно осуществлять поворот поляризации проходящей по такому спирально изогнутому OB волны  $HE_{11}^{e}$  в пределах углов –  $\phi_{\min}^{e} = 0...\pi/2$ . Этот положен поляризационного принцип В основу работы контроллера, приемное согласующего поляризацию приходящего на **устройство** информационного сигнала гетеродинного типа с поляризацией непрерывного излучения местного лазерного генератора (гетеродина) (см. п. 7.6.2, 3).



Рис. 5.8. Зависимость поляризующих свойств спиральных ОМОВ: 1 – угла поляризации материала (волны HE<sup>e</sup><sub>11</sub>), 2 – поляризующей способности

Учитывая симметрию  $\varepsilon(r)$  относительно оси OB, минимаксные особенности по координате *r* можно найти из уравнения

$$\frac{\partial \left[\varepsilon_{ZZ}^{\mathbf{e}} - \varepsilon(r) + \varepsilon_{XZ}\right]}{\partial r} = 0,$$

которое характеризует *степень устойчивости поляризации* материала и, следовательно, волны  $HE_{11}^{e}$ . Поляризующая способность  $\pm \alpha r_{mn}$  спирально изогнутого OB в плоскости поляризации волны  $HE_{11}^{e}$ , т. е. способность удерживать линейной ее поляризацию, нормированная по единице, представлена на рис. 5.8 кривой 2.

Суммарная диэлектрическая проницаемость в плоскости поляризации, содержащей необыкновенную ось  $\vec{e}$ , уклоненную от оси  $\vec{x}_e(\xi)$  на угол  $\phi^e$ , представляется в виде

$$\varepsilon^{e} = \varepsilon^{e}_{zz} + \varepsilon_{xz} = \varepsilon(r) \mp 2\varepsilon r \sqrt{1 + \frac{v^{2}}{4\varepsilon^{2}}} + \frac{\varepsilon^{2}r^{2}}{1 + v^{2}/4\varepsilon^{2}} + v^{2}r^{2} = \varepsilon(r) \mp \Delta\varepsilon^{e},$$

где знак "–" соответствует минимуму функции  $\varepsilon^e$  в четвертом квадранте, а знак "+" – максимуму этой функции во втором квадранте поперечного сечения OB. Качественный годограф равных значений диэлектрической проницаемости необыкновенной волны  $\varepsilon^e$  в поперечном сечении спирального OB плоскостью *xy* представлен на рис. 5.9, а как функция *r* при  $v/2w = p/4\pi R = \text{const}$ , где необыкновенная ось  $\vec{e}$  указывает направление поляризации волны  $\text{HE}_{11}^{e}$ .



Рис. 5.9. Качественные годографы равных значений диэлектрической проницаемости в поперечном сечении СОВ при сечении плоскостью *ху* для волны HE<sup>e</sup><sub>11</sub> (a) и для волны HE<sup>e</sup><sub>11</sub> (б)

Диэлектрическая проницаемость для волны *HE*<sup>0</sup><sub>11</sub> в плоскости ее поляризации получена в [5] в виде

$$\varepsilon^{0} = \varepsilon_{zz}^{0} + \varepsilon_{yz} = \varepsilon(r) \mp \frac{vr(1+v/2\alpha)}{\sqrt{1+v^{2}/4\alpha^{2}}} + \frac{v^{2}r^{2}}{4(1+v^{2}/4\alpha^{2})} + v^{2}r^{2},$$

где верхний знак соответствует первому, а нижний знак – третьему квадрантам поперечного сечения ОВ.

Качественный годограф равных значений (изотонических линий) диэлектрической проницаемости обыкновенной волны в поперечном сечении спирального ОВ плоскостью *ху* представлен на рис. 5.9, б как функция *r* при  $v/2x = p/4\pi R = \text{const}$ , где обыкновенная ось  $\overline{o}$  указывает направление поляризации волны  $\text{HE}_{11}^{0}$ .

Вследствие указанной на рис. 5.9 деформации профиля диэлектрических проницаемостей  $\epsilon^e$  и  $\epsilon^o$ , вращающихся с угловой скоростью намотки волокна в ОК, вдоль СОВ будут, казалось бы, устойчиво поддерживаться линейные поляризации волн  $\text{HE}_{11}^e$  и  $\text{HE}_{11}^o$ . Однако из-за анизотропии материала СОВ в нем осуществляется невзаимное перетекание мощностей между указанными линейно-поляризованными волнами [16], вследствие чего в СОВ наблюдается

пространственный поляризационный переходной процесс, в результате которого вся мощность оказывается в устойчивой линейно-поляризованной обыкновенной волне  $\text{HE}_{11}^{o}$  [19]. Это значит, что СОВ может, при определенных значениях A, работать как поляризатор [20]. Длина СОВ установления линейно-поляризованой волны зависит от A и поляризационных условий ввода мощности излучения лазера в СОВ и может меняться в пределах от нуля до бесконечности. Последнее означает, что обыкновенная и необыкновенная волны распространяются без обмена мощностями. Такие волокна в ОК дают возможность осуществлять их поляризационное мультиплексирование [19].

Диэлектрическая проницаемость СОВ на его оси, т. е. при  $r \approx 0$ , равна  $\varepsilon(r)$ , а приращения к нему  $\Delta \varepsilon^{e}$  и  $\Delta \varepsilon^{o}$  равны нулю. Это значит, что элементарная площадка dA волнового фронта, в пределе стремящаяся к точке r = 0, пересекаемая осью  $\xi$  СОВ, распространяется вдоль оси с фазовой скоростью, равной фазовой скорости моды  $HE_{11}$  в прямолинейном ненапряженном ОВ. В точках-антиподах относительно оси  $\xi$  значения  $\Delta \varepsilon^{e}$  и  $\Delta \varepsilon^{o}$  соответственно равны по величине, но противоположны по знакам. Из-за этого, волновые фронты волн  $HE_{11}^{o}$  и  $HE_{11}^{e}$  в СОВ распространяются вдоль изогнутой его оси, поворачиваясь так, что углы пересечения их с осью  $\xi$  остаются постоянными. Вследствие этого излучения волн за пределы СОВ крайне малы.

### 5.3.3 Дисперсия сигналов в спиральных оптических волокнах

В изогнутом по спирали одномодовом ОВ существуют: материальная *дисперсия*, обусловленная частотной зависимостью диэлектрических свойств материала; волноводная дисперсия, обусловленная частотной зависимостью каждого из фазовых коэффициентов распространения волн  $HE_{11}^{e}$  и  $HE_{11}^{o}$  [2], и, наконец, поляризационная дисперсия, обусловленная анизотропией OB и, как следствие, различием  $\beta_{1}^{e}(\omega)$  и  $\beta_{1}^{o}(\omega)$  указанных волн.

Формулу для поляризационной дисперсии строго когерентных сигналов можно получить (без учета невзаимного перетока мощности из волны  $HE_{11}^{e}$  в волну  $HE_{11}^{o}$  и наоборот) как разность групповых времен распространения (задержек) необыкновенной и обыкновенной волн на единицу длины изогнутого OB, т. е.

$$\Delta \tau_{1} = \tau_{1}^{e} - \tau_{1}^{o} = \frac{\partial \beta_{1}^{e}(\omega)}{\partial \omega} - \frac{\partial \beta_{1}^{o}(\omega)}{\partial \omega};$$

$$\beta_1^e = \beta_{10} \sqrt{\frac{\varepsilon_{zz}^e + \varepsilon_{xz}}{\varepsilon(r)}}; \beta_1^0 = \beta_{10} \sqrt{\frac{\varepsilon_{zz}^o + \varepsilon_{yz}}{\varepsilon(r)}};$$
(5.11)

где  $\beta_{10}$  – фазовый коэффициент распространения моды  $HE_{11}$  в OB до изгиба. Формулы для  $\beta_1^e(\omega)$ и  $\beta_1^o(\omega)$  получены в работе [7].

Если частотный спектр частично когерентной волны не слишком широк, то задержка, отнесенная к единице частоты и единице длины вдоль пути распространения, приближенно равна  $\partial \Delta \tau_1 / \partial \omega$  [8]. С учетом формул (5.8), (5.9) и (5.11), формулу для поляризационной дисперсии сигналов можно записать в виде [9]

$$\sigma_n \approx \Delta \omega \frac{\partial \Delta \tau_1}{\partial \omega} = \frac{1}{2} \Delta \omega \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} \left( \frac{\beta_{10}}{\epsilon(r)} \right) \left[ (\nu r - 2 \alpha r) \cos \varphi + \nu r \sin \varphi + \alpha^2 r^2 \cos^2 \varphi \right], \quad (5.12)$$

где  $\Delta \omega = \Delta \omega_{\rm H} + 2\pi\Delta F$ ;  $\Delta \omega_{\rm H}$  – спектр циклических частот оптической несущей;  $\Delta F$  – спектр частот информационного (электрического) сигнала. Множитель перед квадратной скобкой равен хроматической дисперсии  $\sigma_{\rm Xp}$  в ОМОВ до его изгиба в спираль. Следовательно, поляризационная дисперсия вследствие спирального изогиба ОВ равна произведению хроматической дисперсии ОВ до изгиба и некоторой метрической функции (выражение в квадратной скобке с множителем 1/2). По этой причине полная (эквивалентная) дисперсия сигналов в одномодовом спирально изогнутом ОВ равна алгебраической сумме его хроматической и поляризационной дисперсий:

$$\sigma = \sigma_{\rm XD} + \sigma_n$$

и, следовательно, поляризационную дисперсию, обусловленную спиральной укладкой ОМОВ в ОК, необходимо суммировать по длине пути, пройденному сигналом, по закону суммирования хроматической дисперсии.

Важно отметить, что  $\sigma_n$  может приобретать как положительные, так и отрицательные значения, которые можно использовать для *коррекции сигналов*, передаваемых по спирально уложенным в оптический кабель OB, содержащим нерегулярности, вносящие искажения фазочастотных и амплитудно-частотных характеристик. Это свойство спирально изогнутых одномодовых OB можно также использовать и для полной *компенсации частично скомпенсированной* выбором параметров OB линейной дисперсии *сигналов на приеме*.

Изменяя шаг *p* или радиус *R* спирали, тем самым изменяем, в соответствии с (5.10), поляризацию принимаемой волны. Таким образом, одномодовое OB с изменяемым соотношением  $v/2x = p/4\pi R$  может быть одновременно и корректором дисперсии сигналов и контроллером

(вращателем) поляризации в когерентных ВОСП с гетеродинным ПРОМ, чувствительным к колебаниям поляризации принимаемых сигналов.

Для определения величины поляризационной дисперсии в зависимости от соотношения v/2æ необходимо записать формулу (5.12) совместно с учетом угла поляризации необыкновенной волны (5.10). Подставив (5.10) в (5.12) и учтя, что  $\cos(\operatorname{arctg} A) = 1/\sqrt{1+A^2}$ ;  $\sin(\operatorname{arctg} A) = A/\sqrt{1+A^2}$ , получим

$$\sigma_n = \frac{\Delta\omega\partial^2}{2\partial\omega^2} \left(\frac{\beta_{10}}{\varepsilon(r)}\right) \left[\frac{r}{R}G(A) + \frac{r^2}{2R^2}H(A)\right],\tag{5.13}$$

пде 
$$A = v/2 \mathfrak{x} = \rho/4\pi R;$$
  $\mathfrak{x}r = \frac{r}{R(1+4A^2)};$   $vr = \frac{2r}{R}\frac{A}{1+4A^2};$   
 $G(A) = \frac{A^2 + A - 1}{(1+4A^2)\sqrt{1+A^2}};$   $H(A) = \frac{1}{2(1+4A^2)^3}.$  (5.14)

Множитель перед квадратной скобкой в (5.13) равен хроматической дисперсии OB. Не зависящий от частоты множитель в квадратной скобке характеризует дисперсию сигналов вследствие метрической и фотоупругой анизотропии OB вместе взятых (расчет см. Приложение).

Учитывая, что  $2 \approx r \gg a^2 r^2$ , так как  $r \ll R$ , можно вторым слагаемым в квадратной скобке (5.13) пренебречь и при этом найти минимум поляризационной дисперсии по равенству нулю первого слагаемого, т. е. из уравнения

$$A^2 + A - 1 = 0,$$

положительный корень которого равен

$$A_{\min} = \sqrt{5/4} - 0.5 \approx 0.618. \tag{5.15}$$

Отсюда следует условие минимума поляризационной дисперсии при  $p_{\min} \approx 7,77 R_{\min}$ . Тогда, с учетом (5.15), остаточная минимальная дисперсия будет определяться вторым отброшенным в (5.13) слагаемым.

Необыкновенная  $\text{HE}_{11}^{e}$  и обыкновенная  $\text{HE}_{11}^{o}$  волны при условии (5.15) будут поляризованы соответственно под углами  $\varphi_{\min}^{e} = -31,72^{\circ} \pm 180^{\circ}; \ \varphi_{\min}^{o} = 58,28^{\circ} \pm 180^{\circ}; \$ относительно оси  $\vec{x}(\zeta)$ , вращающейся с угловой скоростью намотки ОВ относительно оси ОК.

Функция G(A) в (5.14) достигает максимального положительного значения 0,1564, при  $A_{\max} \approx 1,29$  и при дальнейшем увеличении значения A функция G(A) уменьшается, стремясь к нулю при  $A \rightarrow \infty$ , что соответствует прямолинейному скрученному относительно собственной оси OB.

Максимальное отрицательное значение G(A) достигается при A = 0 и равно G(0) = -1. Качественный характер зависимости поляризационной дисперсии сигналов в зависимости от A представлен на рис. 5.10. Такое поведение поляризационной дисперсии физически можно объяснить тем, что спирально изогнутое ОВ вследствие осенесимметричного распределения диэлектрических свойств действует по-разному как оптическая *линия задержки* на необыкновенную  $HE_{11}^{e}$  и обыкновенную  $HE_{11}^{o}$  волны, сдвигая во времени поразному переносимые ими сигналы друг относительно друга. Максимальный временной сдвиг наблюдается при  $A \rightarrow 0$ , что соответствует изогнутому по дуге окружности OB.



Рис. 5.10. Зависимость поляризационной дисперсии от параметра  $A = p/4\pi R$  при отсутствии связи волн  $\text{HE}_{11}^{e}$  и  $\text{HE}_{11}^{o}$ 

При условии (5.15) отсчетные моменты сигналов оказываются совмещенными на приемном конце ОВ (рис. 5.11, а). При  $A > A_{\min}$ необыкновенная волна переносит сигнал медленнее, чем обыкновенная волна, так что ее групповое время распространения  $\tau_1^e > \tau_1^o$  и сигналы раздвигаются во времени. Поляризационная дисперсия их увеличивается (рис. 5.11, б). При волна  $HE_{11}^{e}$  распространяется быстрее, чем волна  $HE_{11}^{o}$ , так что  $A < A_{\min}$  $\tau_1^e < \tau_1^o$ , и раздвигаются относительно сигналы ИХ друг друга В противоположные стороны. При этом поляризационная дисперсия также увеличивается (см. рис. 5.11, в). При  $A \to \infty$ , что соответствует скрученному ОВ, поляризационная дисперсия стремится к нулю, что, казалось бы, делает прямолинейное скрученное OB весьма привлекательным для когерентных BOCП.





Однако проблеме физической реализуемости остановимся на упругого скрученного ОВ, уложенного с запасом в прямолинейного оптический кабель. В таком ОВ действуют три механических напряжения [9]: симметричное относительно оси *z* сжатие, направленное вдоль этой оси, равное  $T_{77} = M_{ac} v^2 r^2$ , где  $M_{ac}$  – модуль упругости кварцевого стекла на сжатие, и асимметричные относительно оси *z* растяжения и сжатия материала OB в углах *xz* и *yz*, равные соответственно  $T_{xz} = -M_{a}vr\sin\varphi$  и  $T_{yz} = M_{a}vr\cos\varphi$ , численно разные в различных квадрантах поперечного сечения ВС. Под воздействием указанных напряжений свободно (с запасом) уложенное в ОК скрученное ОВ изгибается в спираль как геодезическую линию некоторого постоянного шага и радиуса так, чтобы указанные напряжения приобретали минимальные значения. Следовательно, прямолинейное скрученное ОВ нереализуемо в оптическом кабеле, предназначенном для передачи сигналов на и для традиционных методов его прокладки (с значительные расстояния продольным натяжением).

#### 5.3.4 Поляризационная дисперсия сигналов при связи волн

В предыдущем пункте рассмотрена поляризационная дисперсия в СОВ, обусловленная, в частности, только различием фазовых коэффициентов распространения волн  $HE_{11}^{e}$  и  $HE_{11}^{o}$  без учета перетекания мощности из одной волны в другую и обратно, т. е. без учета электромагнитной их связи. Однако асимметрия метрического и диэлектрического тензоров СОВ [5] приводит к невзаимной электромагнитной связи указанных волн.

Степень электромагнитной связи между волнами в СОВ оценивается переходными затуханиями на пути перетока мощностей в поперечном сечении СОМОВ [16]:

– переходное затухание между волной  $HE_{11}^{e}$  и  $HE_{11}^{o}$ ;

$$\alpha_{\Pi 1}^{eo} = 10 \lg \frac{P^{eo}}{P_{10}^{e}},$$

где  $P^{eo}$  – мощность, перетекающая из волны  $HE_{11}^{e}$  в волну  $HE_{11}^{o}$ ;

 $P_{10}^{e}$  – распространяющаяся мощность волны  $HE_{11}^{e}$  в ОМОВ до его изгиба в спираль;

– переходное затухание между волной  $HE_{11}^{e}$  и  $HE_{11}^{o}$ ;

$$\alpha_{\Pi 1}^{eo} = 10 \lg \frac{P^{oe}}{P_{10}^{o}}$$

где  $P^{oe}$  – мощность, перетекающая из волны  $HE_{11}^{o}$  в волну  $HE_{11}^{e}$ ;

*P*<sup>0</sup><sub>10</sub> – распространяющаяся мощность волны HE<sup>0</sup><sub>11</sub> в ОМОВ до его изгиба в спираль.

Зависимости указанных переходных затуханий от безразмерного параметра *A*, или от угла поляризации  $\phi^e = -arctg A$  представлены на рисунках 5.12 и 5.13 соответственно для двух значений R = 2,75 и 5 мм [16]. В соответствии с этими рисунками, перетекание мощности  $P^{eo}$  наблюдается только при 0 <  $p/4\pi R$  < 1, в то время как мощность  $P^{oe}$  может перетекать как в области 0 <  $p/4\pi R$  < 0,3, так и в области 4,17 <  $p/4\pi R$  <  $\infty$ .



Рис. 5.12. Зависимость переходного затухания между е- и о-волнами от параметра *р*/4*πR* 

В области значений 0 < A < 0,3, где, в соответствии с рис. 5.10, групповое время  $\tau_1^e$  меньше  $\tau_1^o$  и где наблюдается обоюдный невзаимный обмен

энергиями сигналов, импульс волны  $HE_{11}^{e}$  имеет тенденцию опережать импульс волны  $HE_{11}^{o}$ , однако вследствие связи этих волн импульс волны  $HE_{11}^{e}$ задерживается, передний фронт его за счет этого укорачивается. Импульс волны  $HE_{11}^{o}$  склонен отставать от импульса волны  $HE_{11}^{e}$ , но вследствие связи волн задний фронт импульса волны  $HE_{11}^{o}$  при этом укорачивается.

В результате как передний, так и задний фронты суммарного импульса ограничиваются (рис. 5.14, а). Степень ограничения фронтов сигналов определяется величинами энергий, перекачиваемых из одного сигнала в другой и обратно, а также величиной  $A = p/4\pi R$  из вышеуказанного интервала 0 < A < 0,3. В результате устанавливается средняя групповая скорость распространения суммарного сигнала и, следовательно, меньшая поляризационная его дисперсия, обусловленная только различием групповых скоростей при изолированном распространении отдельных сигналов, что представлено на рис. 5.10.



Рис. 5.13. Зависимость переходного затухания между о- и е-волнами от параметра *p*/4π*R* 

В области значений 0,3 < A < 0,618, где групповая скорость  $\tau_1^e > \tau_1^o$ , и энергия перетекает только из волны  $HE_{11}^e$  в  $HE_{11}^o$ , импульс, переносимый волной  $HE_{11}^e$  (рис. 5.14, б), имеет тенденцию опережать импульс волны  $HE_{11}^o$ , но вследствие их связи передний фронт импульса волны  $HE_{11}^e$  укорачивается.

В области 0,618 < A < 1, где  $\tau_1^e > \tau_1^o$  и переток энергии осуществляется только из сигнала е волны  $\text{HE}_{11}^e$  в сигнал *о* волны  $\text{HE}_{11}^e$ , наблюдается ограничение заднего фронта сигнала е (рис. 5.14 в).



Рис. 5.14. Схемы циркуляции мощностей в оптическом импульсе и деформация его фронтов

И, наконец, в области значений 4,17 <  $A < \infty$ , где  $\tau_1^e > \tau_1^o$ , наблюдается переток энергии только из сигнала в сигнал е [16]. Здесь будет укорачиваться передний фронт сигнала о (5.14, г).

В ОМОВ, изогнутых по спиральным линиям, при их укладке в ОК с 1 < A < 4,17 необыкновенная  $HE_{11}^{e}$  и обыкновенная  $HE_{11}^{o}$  волны распространяются изолировано друг от друга с различающимися групповыми скоростями, т. е. без обмена энергиями сигналов. Импульсный сигнал в таких СОВ будет приобретать поляризационную дисперсию, обусловленную только

различающимися фазовыми коэффициентами  $\beta_1^e$  и  $\beta_1^o$ , полученными в работе [7]. Такие ОК рекомендуется использовать в ВОСП с поляризационным мультиплексированием (см. п. 7.8).

Особый интерес предствляет ОК с ОМОВ, уложенными по спиральным

линиям с соотношением  $A \approx 0,618$ , когда скорости распростанения волн  $\text{HE}_{11}^{e}$  и  $\text{HE}_{11}^{o}$  одинаковы. Переносимые ими сигналы распространяются с одинаковыми групповыми скоростями или одинаковыми групповыми временами задержки. Иначе говоря, их поляризационная дисперсия при этом равна нулю (см. рис. 5.10). Присущая таким СОВ анизотропия вынуждает энергию сигнала е перетекать в сигнал о безвозвратно (см. рис. 5.12 и 5.13) на длине установления линейного поляризационного состояния обыкновенной волны  $\text{HE}_{11}^{o}$  [19, 20].

$$L_y = \frac{w}{\sqrt{2}} \cdot 10^{-0.1a_{n1}^{\text{eo}}}$$

где *w* – радиус модового поля (пятна) волны HE<sub>11</sub> в изотропном OMOB.

Энергия сигнала волны  $\text{HE}_{11}^{e}$  при этом обращается в 0. Если принять w = 5 мкм, R = 2,75 мм, то, в соответствии с рис. 5.12, следует  $a_{n1}^{eo} \approx 18,6$  дБ, и  $L_y$  при этом будет равно примерно 255 мкм.

Наличие нерегулярностей вдоль СОВ, поляризованных неоднородностей, случайных изменений шага спиральной укладки ОВ в ОК, мест сварок ОВ и др. приводит к частичной деполяризации волны  $HE_{11}^{o}$ . Однако на последующих однородных длинах СОВ деполяризованная волна вновь линейно поляризуется и т. д. Из-за коротких длин  $L_y$  поляризационная дисперсия в качественных ВОЛП не достигает значительной величины.

Минимальная поляризационная дисперсия в СОВ при А ≈ 0,618 обеспечивает минимум межсимвольных искажений в длинных ВОЛП. Это явление также объясняется равенством групповых скоростей е- и о-импульсов, когда перетекание энергии из одного импульса в другой происходит в створе временной длительности импульсов.

## 5.3.5 Оптимальная укладка волокон в оптический кабель

ОВ укладывается в ОК в пазы профилированного сердечника или модульные трубки с определенным запасом по длине, который необходим для предотвращения повреждения ОВ в процессе прокладки ОК и обычно составляет s = 0,001...0,005. *Неоптимальный запас* может существенно сказаться и на стабильности оптических передаточных характеристик ОВ при воздействии на ОК внешней среды (усадка грунта, вибрации, колебания температуры), изменяющей анизотропию материала ОВ. Запас длины в ОК должен быть таким, чтобы деформированный под воздействием внешних

причин ОК не изменял свободного "зависания" ОВ в пазах или модульных трубках, которое обеспечивается внутренними (в ОВ) механическими напряжениями вследствие изгиба. Под воздействием указанных напряжений ОВ, свободно, с определенным запасом уложенное в ОК, изгибается в спираль как геодезическую линию постоянного шага и радиуса.

Определим уравнение, связывающее шаг и радиус спирали с запасом длины ОВ в ОК, взаимодействием ОВ с элементами конструкции ОК, исходя из следующих соображений. Длина ОВ  $\ell$  в ОК длиной z (рис. 5.15) определяется как

 $\ell = z \sqrt{g_{zz}},$ 

где  $\sqrt{g_{zz}}$  – метрический множитель удлинения (укорочения) гипотетических линий внутри геодезически изогнувшегося OB, эквидистантно отстоящих от оси  $\zeta$ , в поперечном сечении OB определяемых координатами *r*,



Рис. 5.15. Геометрия оптимальной укладки ОВ в ОК

Второе слагаемое в знаменателе по абсолютной величине много меньше единицы. Тогда минимально допустимую длину ОВ по линии  $\ell$  соприкосновения ОВ и цилиндра радиуса (R - b) при координатном угле  $\varphi = \pi$ , отсчитываемом от подвижной оси, можно записать в виде [10]

$$\ell = z \left[ 1 + \frac{b(R-b)}{(R-b)^{2} + (p/2\pi)^{2}} \right],$$

где линия  $\ell$  на рис. 5.15 представлена штриховой линией. Отсюда следует

$$\frac{\ell - z}{z} = \frac{b(R - b)}{(R - b)^2 + (p/2\pi)^2} = s$$
(5.16)

При *s* = 0 шаги укладки в ОК модульной трубки и СОВ одинаковы. СОВ при этом будет лежать "на дне" модульной трубки (рис. 5.16). При увеличении *s* увеличивается в соответствии с (5.16) длина оптического волокна  $\ell$ , что в первую очередь приводит к уменьшению шага *p* и в меньшей степени – к увеличению *R*. Оптическое волокно при этом "привстает" со "дна" модульной трубки. Максимальная длина СОВ в модульной трубке будет при его соприкосновении с "потолком" модульной трубки, что соответствует максимальнодопустимому значению [*s*<sub>max</sub>]. При этом

$$R = R_{\mathcal{K}} + \Delta_m + d_m - b,$$

где  $R_{\kappa}$  – радиус кабельного сердечника;  $\Delta_m$  – толщина стенки модульной трубки;  $d_m$  – внутренний диаметр модульной трубки; b – радиус OB с защитным покрытием.

В конструкции ОК, не вносящего поляризационной дисперсии, должно выполняться условие (5.15), в соответствии с которым  $A = P/4\pi R \approx 0.618$ . Учитывая это, получим из (5.16) соответствующее оптимальное значение запаса длины СОВ в ОК:

$$s_{\text{опт}} = \frac{b}{R-b} \cdot \frac{1}{1+4A^2} \approx 0.4 \frac{b}{R-b}.$$

Из уравнения (5.16) следует, что строго прямолинейное скрученное с шагом р упругое OB нереализуемо, так как при наличии некоторого запаса длины OB в OK оно обязательно, в силу упругости, изгибается в спираль, радиус которой R должен удовлетворять уравнению (5.16) при условии незащемленности OB.



Рис. 5.16. Местоположение ОВ в модульной трубке в зависимости от коэффициента запаса

Если совокупность параметров R, p, b и s OB, уложенного в OK, не удовлетворяет уравнению (5.16) или наблюдается защемление OB, то при излишнем запасе длины (например, при возросшей температуре) оно будет изгибаться по длине по некоторым сложным, неустойчивым линиям, а при недостаточном запасе длины – будет приобретать дополнительные сложные деформации (напряжения) материала, изменяющие оптические передаточные характеристики OB относительно стабильных характеристик OB, изогнутого по спиральной (геодезической) линии. И первое и второе условия приводят к нестабильности параметров OB по отношению к температурным и механическим изменениям окружающей OB среды. Поэтому уравнение (5.16) можно назвать уравнением стабильности OB в OK и его характеристик.

Углы поляризации волн  $HE_{11}^{e}$  и  $HE_{11}^{o}$  в спиральном OB, определяемые в соответствии с (5.10) через *p* и *R*, следовательно, также удовлетворяют уравнению стабильности OB (5.16) и будут подвержены изменениям под воздействием внешней среды в соответствии с этим уравнением. Таким образом, внутренние поперечные размеры (калибр) модульных трубок должны быть в оптимальной конструкции OK согласованы с ожидаемыми величинами изменения *p* и *R* под воздействием внешней среды в месте прокладки OK, т. е. OB в модульной трубке должно "зависать" под действием внутренних его упругих напряжений, минимально соприкасаясь с внутренней поверхностью модульной трубки.

# 5.3.6 Оптические волокна с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла

Оптически изотропные кварцевые стекла состоят из анизотропных молекул и других структурных элементов, в частности микрокристаллов, оси которых хаотически ориентированы в пространстве. Макроскопическая анизотропия в них сглаживается лишь статистически. В результате какого-либо внешнего воздействия (механической деформации или электрического поля), создающего физически выделенное направление в пространстве, такая среда становится и макроскопически анизотропной. Индуцируемый в общем случае неоднородным внешним полем дипольный момент анизотропной молекулы не совпадает с направлением напряженности упорядочивающего поля. Поэтому и возникает момент сил, который локально поворачивает молекулу осью наибольшей поляризуемости вдоль поля. Световой волне с локальным в ŕ некоторой точке направлением колебаний вдоль внешнего поля соответствует большее (необыкновенной) значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon^{e}(\vec{r})$ , чем вдоль обыкновенной  $\epsilon^{o}(\vec{r})$ , поляризованной в

поперечном направлении, так что  $\epsilon^e > \epsilon^o$ .

Родство фотоупругих и электрооптических эффектов, с точки зрения упорядочения микроструктуры стекла OB, дает возможность использовать фотоупругие тензоры (5.8) применительно к OB, изготовленным на основе

97

электрооптических эффектов Керра и Поккельса. Предложенный авторами [11] способ позволяет изготовлять прямолинейные OB – аналоги скрученных с произвольным шагом вращения микроструктуры *p*, значение которого может теоретически изменяться от нуля до бесконечности.

На рис. 5.17 изображен общий вид круглого OB, однородного химического состава, где  $\vec{e}_{\rm M}$  – ось молекулы, локально ориентированная вдоль спиральной линии радиуса r = b и шага p. Оси других молекул, отстоящих от оси OB на произвольном расстоянии r, также ориентированы вдоль спирали радиуса r и шага p. Элементы тензора диэлектрической проницаемости такого OB получаются из (5.8) при R = 0 или  $\alpha = 0$ .



Рис. 5.17. ОВ с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла

Для линейно-поляризованных необыкновенной (+) и обыкновенной (–) волн, распространяющихся вдоль оси *z*, профили суммарных диэлектрических проницаемостей в OB с *упорядоченной внутренней микроструктурой* (УВМОВ) представляются в виде [10]

 $(\rho)$ 

$$\varepsilon^{\ell}_{0}(r,\varphi) = \varepsilon_{zz} + \begin{cases} \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{cases} = \varepsilon(r) + v^{2}r^{2} \pm vr \begin{cases} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{cases},$$
(5.17)

где *v* = 2*π*/*p* – угловая скорость вращения микроструктуры материала OB. Поляризационная дисперсия УВМОВ, в соответствии с (5.12), представляется при *æ* = 0 в виде

$$\sigma_n = \frac{vr_1}{2} (\sin\varphi + \cos\varphi) \Delta \omega \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} \left( \frac{\beta_{10}}{\varepsilon(r)} \right) = D_T (v, r_1, \varphi) \sigma_{xp}(\omega) = \left( D_T^e + D_T^o \right) \sigma_{xp}(\omega), \quad (5.18)$$

где  $D_{\rm T} = D_{\rm T}^{\rm e} + D_{\rm T}^{\rm o}$  – дисторсия пучков лучей волн  ${\rm HE}_{11}^{\rm e}$  и  ${\rm HE}_{11}^{\rm o}$  соответственно; под  $r_1$  можно понимать радиус круглого пучка лучей (пятна) w (5.5) волны  ${\rm HE}_{11}$  в изотропном прямолинейном OB;  $\sigma_{\rm xp}(\omega)$  – хроматическая дисперсия сигналов в OB до его изгиба.

Полную эквивалентную дисперсию в УВМОВ можно записать в форме

$$\sigma_{\mathfrak{H}} = \sigma_{\mathrm{xp}} \, (1 + D_{\mathrm{T}}),$$

которую можно истолковать как сумму хроматической дисперсии  $\sigma_{xp}$  в изотропном OB и приращения дисперсии, обусловленной искажением формы поперечного сечения пучка лучей волн  $HE_{11}^{e}$  и  $HE_{11}^{o}$  в УВМОВ.

Таким образом, сигналы в *физических пучках лучей* указанных волн  $(\Delta \omega \neq 0)$  испытывают порознь в УВМОВ как *частотно-временную дисперсию*  $\sigma_{xp}(\omega)$ , так и изменение их пространственной (поперечной) протяженности полосы частот, т. е. дисперсию  $D_{\rm T}$ , которая аддитивно определяет искажение поперечной формы сечения физических пучков лучей волн  ${\rm HE}_{11}^{\rm e}$  и  ${\rm HE}_{11}^{\rm 0}$  и переносимых ими оптических сигналов.

Если, в соответствии с (5.18), принять одинаковой удельную хроматическую дисперсию в поперечном сечении  $S_0$  круглого пучка лучей радиуса  $r_1$  в изотропном ОВ и в УВМОВ с некоторым эквивалентным сечением  $S_3$  радиуса  $r_{13}$ , то

$$S_{\mathfrak{I}} = S_0 (1 + D_T); \qquad D_T = \frac{\pi r_1}{p} (\sin \varphi + \cos \varphi).$$

На рис. 5.18, а представлены раздельными поперечные сечения  $S_{9}^{e}$  и  $S_{9}^{o}$ для рассматриваемых волн (соответственно sin  $\varphi$  и соз  $\varphi$ ) при р >>  $\pi r_{1}$ , где наблюдается небольшое смещение пучков лучей от оси УВМОВ в сторону уменьшения диэлектрической проницаемости и деформация форм сечения пучков лучей из-за несимметричных относительно оси *z* третьих слагаемых в выражении (5.17).

Проанализируем динамику изменения форм и размеров поперечного сечения, например пучка лучей  $S_{9}^{e}$  для волны  $HE_{11}^{e}$  в зависимости от *p*, где

$$S_{\mathfrak{H}}^{e} = S_{0} \left( 1 + \frac{\nu r_{1}}{2} \sin \varphi \right) = S_{0} \left( 1 + \frac{\pi r_{1}}{p} \sin \varphi \right).$$

При  $p = 2\pi r_1$  форма поперечного сечения  $S_3^e$  приобретает большее "смятие" справа на рис. 5.18, б и смещение к периферии ОВ в сторону уменьшения  $\varepsilon^e(r, \phi)$ , вдоль оси +*y*. При  $p = \pi r_1$  сечение пучка лучей приобретает форму "листа" (рис. 5.18, в) и смещается еще больше от центра к периферии так, что в центре УВМОВ плотность поля в физическом пучке лучей достигает нулевого значения. Точками на кривых указаны длины радиусов – векторов от оси *z*. Деформация пучка лучей при  $p = \pi r_1/2$  представлена на рис. 5.18, г, где видна заштрихованная *область гашения пучка лучей*, которая увеличивается с дальнейшим уменьшением шага *p* вращения микроструктуры материала OB. Аналогичные качественные картинки, повернутые относительно оси *z* на угол  $\pi/2$ , будут видны для пучков лучей волны  $HE_{11}^o$ . Суммарный пучок лучей  $s_3 = s_0(1 + D_T^e + D_T^o)$ . a)  $p \gg \pi r_1$ 



Рис. 5.18. Динамика изменения модового пятна от шага вращения микроструктуры стекла

Увеличение поперечного сечения пучка лучей,  $S_3$ т. е. увеличении  $A_{3\phi}$  при уменьшении шага *p* вращения молекулярной структуры в таких OB, свидетельствует об уменьшении удельной плотности мощности оптических сигналов на единицу объема стекла. Следовательно, нелинейные эффекты в УВМОВ будут проявляться в меньшей степени, чем в обычном ОМОВ.

Вдоль оси *z* УВМОВ поляризация волн вращается с угловой скоростью  $v = 2\pi/p$ . Следовательно, асимметричные поперечные сечения физических пучков лучей S<sup>e</sup><sub>3</sub> и S<sup>o</sup><sub>3</sub> также вращаются относительно оси *z* по длине УВМОВ, что обеспечивает групповую задержку оптических сигналов, переносимых указанными волнами при малых шагах *p* (оптическая линия задержки). При больших шагах *p* в УВМОВ наблюдается весьма малая поляризационная дисперсия (см. рис. 5.10), и поэтому такие ОВ перспективны для когерентных ВОСП.

Еще одно из возможных применений УВМОВ – согласование ЛД с линейным ОМОВ в качестве *корректора комы*, возникающей при стыковке

лазерных диодов с одномодовыми волокнами (см. [2]), т. е. коректора сферической аберрации и аберрации смещения.

#### 5.3.7 Одномодовый волоконно-оптический поляризатор

Такой поляризатор может быть использован в оптических измерениях, датчиках физических величин, основанных на поляризационных явлениях, а также в когерентных волоконно-оптических системах передачи информации, в волоконно-оптических кабелях связи, контроллерах поляризации и других устройствах на волоконной основе, где требуется поддерживать стационарную линейную поляризацию.

Известные классические поляризаторы на основе кристаллических пластин (турмалин, герапатит и др.), а также кристаллических призм Николя и Волластона описаны во многих учебниках по оптике, например в [2]. Однако такие устройства трудно стыкуются с оптическими волокнами из-за больших потерь, особенно с одномодовыми, способными поддерживать распространение когерентных основных волн HE<sub>11</sub> со взаимно-ортогональными поляризациями. Поэтому предложенный одномодовый волоконно-оптический поляризатор найдет широкое применение в указанной выше волоконной технике [19, 20].

Поставленная задача преобразования неполяризованного или частично поляризованного света в линейно-поляризованный осуществляется в ОМОВ при укладке его при комнатной температуре на некоторый круговой цилиндр по спиральной линии, когда в нем возникает метрическая и диэлектрическая двулучепреломлении, разных фазовых анизотропии, что проявляется в скоростях распространения основных необыкновенной HE<sup>e</sup><sub>11</sub> и обыкновенной НЕ<sup>о</sup><sub>11</sub> волн. Благодаря указанной анизотропии в спиральных одномодовых (СОМОВ) наблюдается оптических волокнах невзаимное перетекание мощностей в плоскости поперечного сечения между указанными волнами, изменяющее поляризационное состояние вдоль волокна [16, 19]. Тут же показано, что в СОМОВ с соотношением  $0 < \rho/4\pi R \le 0.3$ , что мощность перетекающая из волны HE<sup>e</sup><sub>11</sub> в волну HE<sup>o</sup><sub>11</sub> больше мощности, перетекающей из волны HE<sup>o</sup><sub>11</sub> в волну HE<sup>e</sup><sub>11</sub>. Вследствие этого на длине L<sub>v</sub> установления стационарной линейной поляризации вся мощность волны HE<sup>e</sup><sub>11</sub> перетечет в волну  $HE_{11}^{0}$ , и установится по всей дальнейшей длине СОМОВ  $L > L_{y}$ стационарная линейно-поляризованная волна HE<sup>o</sup><sub>11</sub>, где

$$L_{y} = \frac{W}{\sqrt{2}} \cdot \frac{10^{-0.1 a_{n}^{eo}}}{1 - \frac{P_{0}^{o}}{P_{0}^{e}} 10^{0.1 (a_{n}^{eo} - a_{n}^{oe})}},$$
(5.19)

W – радиус модового поля волны до изгиба OB;  $P_0^{o}$ ,  $P_0^{e}$  – мощности обыкновенной HE<sub>11</sub> и необыкновенной волн соответственно на входе

COMOB;  $a_n^{eo} = 10 \lg \frac{P_n^{eo}}{P_0^o}$ ,  $a_n^{oe} = 10 \lg \frac{P_n^{oe}}{P_0^o}$  *переходные затухания* между

необыкновенной (е) и обыкновенной (о) волнами  $\text{HE}_{11}^{e}$  и  $\text{HE}_{11}^{o}$  и наоборот соответственно;  $P_n^{eo}$ ;  $P_n^{oe}$  – мощности, перетекающие с необыкновенной волны в обыкновенную (ео) и наоборот (ое) соответственно на длине СОМОВ, равной  $L_y$ , определены в [16]. При соотношении  $0,3 < p/4\pi R < 1$  в СОМОВ наблюдается только перетекание мощности  $P_n^{eo}$  из волны  $\text{HE}_{11}^{e}$  в волну  $\text{HE}_{11}^{o}$  без возврата мощности. При этом формула (5.19), независимо от соотношения  $P_0^{o}/P_0^{e}$  переписывается в виде

$$L_y = \frac{w}{\sqrt{2}} \cdot 10^{-0.1a_n^{eo}} \,. \tag{5.20}$$

В области значений  $p/4\pi R$  наблюдается перетекание только мощности  $P_n^{eo}$  без возврата, при этом формула (5.19) принимает вид

$$L_y = \frac{w}{\sqrt{2}} \cdot 10^{-0.1 a_n^{\text{oe}}} .$$
 (5.21)

Расчеты по формулам (5.19), (5.20), (5.21) для длины волны излучения  $\lambda = 1,55$  мкм, w = 5 мкм, R = 2,75 мм и полученных в [16] значений  $a_n^{oe}$  и  $a_n^{eo}$  дают следующие величины  $L_y$  в зависимости от соотношения  $p/4\pi R$ :  $0 < \rho/4\pi R \le 0,3;$   $P_0^o / P_0^e = 0...10,$   $L_y \approx 110...1080$  мкм; (5.22)  $0.3 < \rho/4\pi R \le 1,$   $L_y \approx 220...5,600$  мкм; (5.23)

$$\rho/4\pi R > 4,17,$$
  $L_y \approx 220...5,600$  MKM, (5.24)



Рис. 5.19.Одномодовый волоконно-оптический поляризатор: а) общий вид; б) расположение  $\vec{E}^{e}$  и  $\vec{E}^{o}$  в поперечном сечении ВОП

предложенный одномодовый Конструктивно волоконно-оптический поляризатор (рис. 5.19) состоит из круглого сердечника 1 с наружной нарезкой постоянного шага p и радиуса R, в пазы которой свободно (с запасом) уложено одномодовое оптическое волокно с первичным защитным покровом 2, длиной  $L \ge L_v$ , закрепленное без пережима на концах сердечника. Для возможности изменения  $L_y$ , а также изменения направления или подстройки поляризации в пределах зон (5.22), (5.23), (5.24) соответственно указанный сердечник необходимо изготавливать из растягивающегося материала, например силиконовой резины, что позволит изменять необходимые соотношения *p*/4*πR* и, следовательно, значения переходных затуханий  $a_n^{\text{oe}}$  и  $a_n^{\text{eo}}$  (см. рис. 5.12 и 5.13). Изменения переходных затуханий вследствие изменения соотношения  $p/4\pi R$  приводит к изменению  $L_y$  в соответствии с приведенными формулами (5.19), (5.20) и (5.21) в вышеперечисленных зонах, а также к изменениям стационарной линейной поляризации на выходе поляризатора. В соответствии с [6], поляризации необыкновенной НЕ<sup>e</sup><sub>11</sub> и обыкновенной волны  $HE_{11}^{0}$ ,

направленные под углами  $\phi^e$  и  $\phi^o$  соответственно относительно оси  $\vec{x}$ , коотрая соединяет по нормали в поперечном сечении ось спирали с осью СОМОВ, где

$$\varphi^e = -\arctan p / 4\pi R \pm \pi; \varphi^o = \varphi^e \pm \pi / 2.$$

Если на вход поляризатора 3 подается частично поляризованное излучение источника, армированного розеткой оптического соединителя, а поляризатор армированн оптическим штекером (штепселем), то поворотом розетки относительно неподвижного штекера можно изменять соотношение вводимых мощностей  $P_0^o/P_0^e$  при 0 <  $p/4\pi R$  <0,3 и тем самым изменять значение  $L_y$ .

При введении в волоконный поляризатор полностью неполяризованного оптического излучения можно считать соотношение  $P_0^o / P_0^e$  равным 1.

## Контрольные вопросы

- 1 С какой целью осуществляется смещение хроматической дисперсии в ОМОВ?
- 2 Какой физический принцип лежит в основе увеличения поперечного сечения одномодового распространения (модового пятна)?
- 3 С какой целью это осуществляется?
- 4 Для какой цели создаются однополяризационные OMOB? Как реализуется однополяризационность в них?
- 5 Какими параметрами описывается хроматическая дисперсия оптического сигнала в ОМОВ?
- 6 Какой принцип положен в основу работы оптических поляризаторов?

Оптический усилитель (OУ) – это устройство, усиливающее энергию входного оптического сигнала непосредственно в оптической области, без преобразования его в электрическую форму. В отличие от регенератора, ОУ может усиливать несколько оптических сигналов, переносимых несколькими оптическими несущими частотами в пределах длин волн, называемой зоной усиления. Это позволяет наращивать пропускную способность ВОЛП без добавления новых ОВ методом частотного (спектрального), временного или поляризационного мультиплексирования. Высокая надежность и низкая энергоемкость делают ОУ весьма экономичными устройствами не только на магистральных ВОЛП, но и в аппаратуре ВОСП.

Существует несколько типов усилителей оптических сигналов. В ВОСП находят применение полупроводниковые и волоконные оптические усилители (ВОУ). Последние подразделяются на квантовые ВОУ и рамановские (ВКР) ВОУ, которые будут рассмотрены в п. 9.4.

Квантовые ОУ используют принцип индуцированного (вынужденного, стимулированного) лучеиспускания квантов света под действием входных информационных оптических сигналов, стимулирующих как во времени, так и в пространстве активной его среды начало и конец лучеиспускания. Время перехода атомов с верхнего энергетического уровня на нижний составляет  $10^{-12}$ c. менее Вследствие этого энергия квантов стимулированного лучеиспускания перекачивается в проходящий усиливаемый оптический сигнал без его искажения (подробнее механизм испускания квантов см. в п. 3.1), так как под действием поля оптического сигнала (Фурье-компонент его) атом излучает вторичную волну, у которой частота, поляризация, направление распространения фаза полностью совпадают С характеристиками И усиливаемого сигнала.

# 6.1 Полупроводниковые оптические усилители

Полупроводниковые оптические усилители по сути представляют собой лазерные диоды, оснащенные резонаторами Фабри–Перо с полупрозрачными стенками, с устройствами оптического согласования (УОС) на вводе и на выходе (см. рис. 6.1), аналогичными устройству согласования ЛД с одномодвым оптическим волокном [2 или 14].

По режиму работы полупроводниковые оптические усилители подразделяются на:

– усилители бегущей волны (УБВ), в которых световое излучение (сигнал) усиливается в активной его среде за один проход;

– усилители Фабри–Перо (УФП), в которых оптический сигнал усиливается в результате многократного прохождения активного вещества, при котором усилительный режим не должен переходить в режим генерации (самовозбуждения). Желательно в ОУ иметь широкую полосу усиления, превышающую частотный диапазон между соседними продольными модами (1...5 ГГц) (см. рис. 3.3). Увеличить полосу усиления  $\Delta f$  можно уменьшением коэффициентов отражения  $R_1$  и  $R_2$  от стенок резонатора ЛД (см. рис. 3.6), но при этом уменьшается коэффициент усиления. Таким образом, в зависимости от значений  $R_1$  и  $R_2$ , полупроводниковый оптический усилитель может работать как УБВ или УФП, т. е. как широкополосный и, соответственно, узкополосный, в любом из окон прозрачности OB.



1 – линейное ОМОВ; 2 – УОС; 3 – стенки резонатора Фабри–Перо;
4 – кристалл ЛД; 5 – металлические электроды; 6 – оптический вентиль;
• – точки соединения компонентов ПОУ; *I*<sub>н</sub> – постоянный ток накачки

Рис. 6.1. Структурная схема полупроводниковых оптических усилителей УФП и УБВ

#### 6.1.1 Усилители Фабри-Перо

УФП по сути представляют собой лазерный диод, оснащенный устройствами оптического согласования с оптическим волокном на входе и на выходе, например с помощью полусферических линз на перетяжках ОМОВ (другие устройства согласования кристалла ЛД с ОМОВ см. в [2]). В усилителях Фабри–Перо коэффициент отражения  $R_1$  и  $R_2$  от стенок резонатора больше, чем в УБВ, вследствие чего коэффициент усиления УФП выше. Максимальный коэффициент усиления УФП при многократном отражении от стенок резонатора записывается в виде

$$K_{\text{max}} = k(\omega)(1-R_1)(1-R_2)/(1-k(\omega)\sqrt{R_1R_2})^2$$

где  $k(\omega)$  – коэффициент усиления индуцированного излучения активной среды (3.7) (при одном проходе).

Полоса частот полупроводниковых узкополосных оптических усилителей на уровне 0,5 максимальной интенсивности представляется в форме

$$\Delta f_{0,5} = \frac{c}{2\pi nL} \arcsin \sqrt{\frac{(1-R_1)(1-R_2)}{4K_{\max}\sqrt{R_1R_2}}}$$

где *n* — среднее значение коэффициента преломления кристалла (3,4 ... 3,6);

 $\frac{c}{2\pi nL}$  — частотное расстояние между продольными модами (1 ... 5 ГГц).

Усилители имеют низкий уровень выходной мощности с усилением 25...35 дБ, узкую полосу частот усиления, не превышающую полосу между двумя продольными модами, но в широко перестраиваемом (до 800 ГГц) спектральном диапазоне. Кроме этого, УФП нечувствительны к поляризации входного сигнала и характеризуются сильным подавлением боковых частотных составляющих (ослабление на 20 дБ за пределами диапазона 5 ГГц). Вследствие этого УФП очень хорошо подходят для использования их в качестве демультиплексоров, поскольку они могут быть всегда перестроены током накачки для усиления спектра только одного оптического канала из входного группового линейного оптического сигнала (ГЛОС).



Рис. 6.2.Спектральный доступ к транспортной сети: а схема спектрального доступа к одному из оптических каналов; б сканирование полосы усиления ПОУ по шкале частот в пределах до 800 ГГц; 1 – ОМОВ; 2 – широкополосный направленный ответвитель; 3 – полупроводниковый оптический усилитель; 4 – ПРОМ; 5 – ПОМ; 6 – электрические сигналы

Вышесказанное дает возможность организовать спектральный доступ к ГЛОС в промежуточном пункте транспортной сети с целью вывода одного из оптических цифровых сигналов на оптической несущей  $f_k$  в спектре частот до 5 ГГц и перестройкой этого спектра по шкале частот в пределах до 800 ГГЦ без демультиплексирования всего ГЛОС. Функциональная схема спектрального доступа к транспортной сети с помощью УФП показана на рис. 6.2, а, где УФП 3 выделяет как перестраиваемый полосовой фильтр принимаемый в данном пункте цифровой сигнал на несущей частоте  $f_k$ последующим С детектированием в ПРОМ 4. Ввод цифрового сигнала в транспортную сеть на оптической несущей fk осуществляют ПОМ 5 и аналогичный УФП 3. Широкополосный направленный ответвитель 2 осуществляет пространственный вывод и ввод цифровых сигналов, содержащих полосу частоты относительно  $f_k$ .

## 6.1.2 Усилители бегущей волны

Активной (усиливающей) средой ЛД в УБВ, накачиваемой постоянным током на схеме рис. 6.1, является кристаллическая структура из GaAlAs для второго окна прозрачности (1,3 мкм) и InGaAsP+InP – для третьего окна прозрачности (1,55 мкм) OB.

Для обеспечения широкополосности усиления на входную и выходную грани прямоугольного кристалла нанесены многослойные просветляющие покрытия на рабочей длине волны. Вследствие этого усиление в УБВ производится за один проход сигнала в кристалле.

Согласование граней кристаллов УБВ с волокном осуществляется, как правило, с помощью полусферических линз на перетяжке ОМОВ [14]. Малые размеры кристаллов дают возможность интегрировать такие усилители в чипмодули вместе с другими элементами оптических интегральных схем. Кроме того, УБВ изготовляется в виде отдельного изделия. Конструктивно он выполняется в металлическом корпусе. Через боковые грани корпуса выведены входные и выходные одноволоконные оптические кабели с ОМОВ. В корпусе УБВ, кроме устройств согласования кристалла с ОМОВ, содержатся вентиль, микрохолодильник Пельтье, терморезистор и фотодиод. Электронная схема стабилизации рабочей точки ВтАХ и температуры потребляет ток не более 500 мА при напряжении 6 В. Максимальный ток, потребляемый элементом Пельтье, равен 1 А при напряжении 1,5 В. Полная электрическая мощность, потребляемая типовым УБВ, не превышает 2,25 ... 3 Вт. В табл. 6.1 приведены характеристики УБВ для основные технические окна прозрачности 1530...1565 нм.

Наименование параметра	Значение
Внутренний коэффициент усиления, дБ	31
Потери на соединениях, дБ	3
Коэффициент усиления с учетом согласования	25
волокно-волокно, дБ	
Поляризационная чувствительность, дБ	0,12
Ток накачки, мА	130
Ширина полосы на уровне 0,5, нм	38
Уровень выходной мощности насыщения, дБм	8
Неравномерность усиления в рабочей полосе, дБ	0,5
Внутренний коэффициент шума, дБ	5,8

Таблица 6.1. Характеристики полупроводникового ОУ бегущей волны

Анализ представленных характеристик показывает, что по своим параметрам УБВ практически приблизились к соответствующим параметрам волоконно-оптических усилителей, немногим уступая им по коэффициенту шума (5,8...6 дБ – для УБВ и 3...5,5 дБ – для ВОУ) и выходной мощности. Таким образом, уже в настоящее время полупроводниковые оптические усилители могут в ряде случаев потеснить волоконно-оптические усилители, например в транспондерах ВОСП-СРК (см. п. 7.5.1).
В последнее время разработан полупроводниковый оптический усилитель с выходной мощностью более 150 мВт (+20,2 дБм) при полосе усиления по уровню 0,5  $I_m$ , равной 110 нм, и коэффициенте усиления 15 дБ. Это дает возможность использовать его в ВОСП в качестве усилителя мощности на передаче, а также в качестве линейного усилителя.

#### 6.2 Квантовые волоконно-оптические усилители

Квантовые волоконно-оптические усилители представляют собой отрезки активных ОВ на основе кварцевого стекла, сердцевины которых дополнительно легированы химическим элементом, соответствующим частоте Бора (3.1) и минимуму потерь в окне прозрачности ОВ. Для третьего окна прозрачности таким химическим элементом является эрбий (Er), для второго окна прозрачности – неодим (Nd) или празеодим (Pr). Квантовые волоконнооптические усилители (КВОУ) для второго окна прозрачности не получили широкого применения.

6.2.1 Принцип работы квантового ВОУ

На рис. 6.3 представлена трехуровневая энергетическая диаграмма атомной системы эрбия и соответственно легированного им стекла сердцевины ОВ, где 1ЭУ – первый, основной стабильный энергетический уровень; 2ЭУ – второй метастабильный энергетический уровень; 3ЭУ... – третий и последующие энергетические уровни более высоких порядков.



Рис. 6.3. Трехуровневая энергетическая диаграмма атомной системы эрбия

Расширение зоны метастабильного 2ЭУ происходит вследствие эффекта Штарка, который состоит в расщеплении энергетических уровней атомов под воздействием сильного электрического поля в окрестности атомного ядра. Так как напряженность электрического поля быстро спадает по мере удаления от ядра, то наибольшему расщеплению подвергается ближайший к ядру метастабильный уровень 2ЭУ, остальные уровни расщепляются мало. Расщепление 2ЭУ происходит на несколько подуровней, вследствие чего увеличивается общая ширина зоны его действия. Время жизни электронов на разных подуровнях 2ЭУ различно. Оно уменьшается с удалением от ядра. Вследствие этого электроны, будучи выведенными на верхние уровни (подуровни) при накачке на частоте  $f_{\rm H} > f_{\rm c}$ , самопроизвольно совершают переходы на более низкие подуровни, где могут находиться до 10 мс. Часть из них случайным образом совершают переходы на основной уровень, излучая при этом кванты (фотоны) в диапазоне длин волн 1530...1565 нм, т. е. в рабочем диапазоне. Это так называемое спонтанное излучение (Spontaneous Emission). Оно происходит во все стороны в легированной эрбием сердцевине ОВ, однако числовой апертурой захватывается лишь незначительная его часть. Усиленное спонтанные излучения (ASE) является шумом для КВОУ. При возбуждении 2ЭУ излучением накачки на длине волны 1480 нм спонтанное излучение происходит в диапазоне длин волн  $\Delta\lambda \approx 80$  нм.

Если в инверсную среду, накаченную спектром длин волн относительно  $\lambda = 1480$  нм, ввести излучение информационного сигнала на длинах волн 1530...1565 нм, то каждый фотон этого сигнала будет стимулировать переход электрона на основной уровень, сопровождающийся излучением фотона с такой же частотой (фазой), поляризацией и направлением распространения, что и исходный, сигнальный фотон. Этот исходный фотон, стимулируя переход указанного выше электрона, теряет небольшую часть энергии, т. е. уменьшает частоту (энергия фотона равна  $W_{\rm theta} = hf$ , где h – постоянная Планка).

Следовательно, спектр оптического усиления уменьшается по сравнению со спектром накачки ( $\Delta \lambda_{\rm H} \approx 80$  нм,  $\Delta \lambda_{\rm c} \approx 35$  нм).

Из квантовой электроники известно, что вероятность переходов электронов на основной уровень из различных энергетически возбужденных уровней различна. Она увеличивается с ростом расстояния до стабильного уровня. Поэтому усиление оптического сигнала в пределах диапазона частот происходит неравномерно, что представлено справа на рис. 6.3. Максимальное усиление происходит в окрестности длины волны 1530 нм, далее с ростом длины волны наблюдается некоторый спад.

Метастабильный 2ЭУ имеет широкий спектр частот, вследствие чего при его накачке длиной волны 1480 нм на выходе КВОУ наблюдается повышенная величина спонтанного шума. Для уменьшения уровня шума и его спектра необходимо осуществлять накачку длиной волны 980 нм. Соответствующий шум при этом имеет на порядок более узкий спектр частот, так как промежуточный переход электронов с ЗЭУ на 2ЭУ сопровождается выделением энергии либо в виде излучения на относительно низких частотах, либо безызлучательно в виде колебаний атомов (нагрев кристалла).

Мощность накачки на длине волны 980 нм поэтому должна быть больше, чем на длине волны 1480 нм, для получения одинакового усиления сигналов при одинаковых других условиях.

### 6.2.2 Накачка квантовых ВОУ

B соответствии практически применяемой трехуровневой с энергетической диаграммой уровней атомной системы эрбия и соответственно легированного им стекла сердцевины ОВ накачка осуществляется на длинах волн 980 и 1480 нм. Технически оптическая накачка КВОУ может быть реализована через устройство объединения ОУ, в роли которого используется направленный ответвитель спектральными свойствами co (HO)или мультиплексор (оптический разделительный двухканальный оптический фильтр), по схемам прямой накачки (рис. 6.4, а), встречной накачки (рис. 6.4, б) и двусторонней накачки (рис. 6.4, в).

Недостаток схемы прямой накачки состоит в том, что вместе с полезным сигналом на выход усилителя проходит и излучение накачки. Эта схема находит применение для увеличения вводимой оптической мощности в линейное ОМОВ передающей стороне. на Если В КВОУ накачка осуществляется на длине волны 980 нм, то при распространении в линейном ОМОВ остаточное излучение быстро затухает. Однако если этого недостаточно (особенно при накачке длиной волны 1480 нм), то на выходе передающего КВОУ включается заграждающий фильтр с центральной длиной волны, соответствующей длине волны накачки.

Схема встречной накачки длиной волны 980 нм чаще всего применяется в предусилителях на приемной стороне. Эта схема применяется также с накачкой на длине волны 1480 нм, при которой максимальная инверсия и коэффициент усиления будут ближе к выходу АОВ. Это значит, что к началу АОВ накачка будет меньшей, чем у выхода, следовательно и коэффициент усиления будет также меньшим, а вероятность спонтанных переходов при этом возрастает. Этот шум будет усилен участками АОВ по мере распространения его к выходу. Следовательно, коэффициент шума при такой схеме накачки будет большим по co сравнению схемой прямой накачки. Возможно использование дистанционной подачи оптического излучения накачки с приемной станции (до  $L_v \le 100$  км) к последнему линейному КВОУ по схеме встречной накачки (рис. 6.4, в) на длине волны 1480 нм, так как на этой длине волны затухание в линейном ОМОВ ненамного больше, чем на длине волны 1550 нм. На рис. 6.4, б схемы локальной и дистанционной накачки АОВ совмещены. При локальной накачке AOB необходимо в схеме полагать  $L_y = 0$ .



Рис. 6.4 – Схемы накачки КВОУ: а – прямой; б – встречной; в – двусторонней

Схема двусторонней накачки АОВ обеспечивает повышенную мощность усиливаемых сигналов на выходе КВОУ и объединяет особенности работы схем прямой и встречной накачки.

Доказано, что для увеличения эффективности накачки активное оптическое волокно (AOB) должно иметь повышенную числовую апертуру (NA). Для этого, кроме редкоземельных химических элементов (Er, Tm, Yb), сердечник AOB дополнительно легируется окислами GeO<sub>2</sub> или AlO<sub>3</sub>. Это позволяет выравнивать частотные характеристики и расширять полосы частот усиления КВОУ.

Основное назначение КВОУ – применение в высокоскоростных ВОСП, основанных на применении одномодовых линейных ОВ. Поэтому АОВ, несмотря на большую числовую апертуру, должно оставаться также одномодовым. Для этого безразмерная частота в нем  $V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} NA$  не должна

превышать величину 2,405. Например, если NA = 0,28;  $\lambda = 1550$  нм, то диаметр АОВ при этом равен  $d_1 = 4,3$  мкм. Сравнивая геометрические размеры линейного ОМОВ –  $d_1 = 9...10$  мкм,  $d_2 = 125$  мкм и АОВ –  $d_1 = 4...6$  мкм,  $d_2 = 125$  мкм, и NA соответственно 0,003...0,005 и 0,26...0,3, возникает вопрос согласования этих волокон с помощью линзовых устройств наподобие согласования кристалла ЛД с ОМОВ или фоконов (конических OB), когда должно выполняться условие Аббе [2]:

$$n_1 d_1 \sin \varphi_1 = n_2 d_2 \sin \varphi_2$$
,

где индексы 1 относятся к линейному ОМОВ, а индексы 2 – соответственно к АОВ. С технологической точки зрения и минимизации потерь, предпочтительным является применение фоконов, которые большим диаметром свариваются с линейным ОМОВ, а меньшим – с АОВ.

При вышеуказанных размерах и длине волны накачки 1480 нм АОВ остается одномодовым. Однако при длине волны накачки 980 нм в АОВ возбуждаются до 6 мод. Это, казалось бы, должно приводить к неравномерному уровню населенностей на ЗЭУ, неравномерному усилению в поперечном сечении АОВ и к возникновению дополнительного модового шума. В действительности заметного увеличения шума, вызванного указанными причинами, не наблюдается. Связано это с тем, что длина АОВ изменяется от нескольких метров до десятков метров, укладывается в реальных КВОУ в бухточку диаметром 10...20 см. Такое устройство, состоящее из витков АОВ, является одним из видов модовых смесителей (фильтров). Поэтому в результате перемешивания мод в свернутом в бухточку АОВ распределение энергии по сечению усредняется, делается приблизительно равномерным.

Вернемся к рассмотрению процесса накачки (см. рис. 6.4). С точки зрения шумовых характеристик, лучшей является прямая накачка, зато двухсторонняя накачка обеспечивает большую выходную мощность.

Таким образом, в активном OB распространяются слабые поля входного информационного оптического сигнала и сильные поля лазера (лазеров) накачки, которые осуществляют по длине AOB накачку атомов Er, независимо от направления накачки, т. е. обеспечивают инверсию населенности  $N_2 - N_1$ . Поля информационных сигналов вызывают стимулированное лучеиспускание квантов атомов эрбия в тех местах AOB, где находятся в данный момент времени информационные сигналы, приобретающие таким образом энергию стимулированных ими квантов. Интенсивность информационных сигналов при этом возрастает, а интенсивность излучения накачки в AOB соответственно уменьшается по длине по закону Бугера:

 $I_{\rm Bbix} = I_{\rm Bx} e^{+k(\omega)Z}; \ I_{\rm HBbix} = I_{\rm HBx} e^{-k(\omega)Z},$ 

где  $I_{\rm BX}$ ,  $I_{\rm BBIX}$  – интенсивности информационных сигналов на входе и выходе AOB;  $I_{\rm HBX}$ ,  $I_{\rm HBBIX}$  – интенсивности накачки на входе и выходе AOB;  $k(\omega)$  – коэффициент усиления активной среды, определяемый по формуле (3.7).

Скорость образования инверсии населенности  $(N_2 - N_1)$  или перехода атомов в возбужденное состояние в точке *z* по длине АОВ пропорциональна интенсивности излучения накачки в этой точке. Поэтому атомы эрбия следует концентрировать, преимущественно вблизи оси ОВ, в сердцевине, диаметр которой может составлять 2...6 мкм. Чем выше концентрация атомов эрбия, тем выше усиление на единицу длины АОВ. Однако излишняя их концентрация приводит к образованию колоний ионов Ег и ухудшению работы КВОУ.

#### 6.2.3 Энергетические характеристики квантовых ВОУ

Для усиления слабого входного информационного сигнала, характерного для ВОСП, требуется небольшая мощность накачки, которую можно получить с помощью компактных полупроводниковых лазеров накачки, потребляющих токи питания в несколько сот миллиампер. На рис. 6.5, а представлена зависимость усиления от мощности прямой накачки на длинах волн  $\lambda_{c} = 1552$  нм,  $\lambda_{H} = 1480$  нм, при концентрации эрбия 2,5 · 10<sup>-3</sup> и длине АОВ – 50 м. Зависимость усиления от длины АОВ при вышеупомянутых данных представляет рис. 6.5, б при разных мощностях прямой накачки, указанных над кривыми. Длина АОВ, обеспечивающая наибольшее усиления, т. е. наибольший уровень выходной мощности оптического сигнала, не всегда оптимальна с точки зрения шумовых показателей. Для усиления слабого сигнала в зоне ненасыщенного усиления при коротких длинах АОВ и обеспечивается значительной мошности накачки достаточно большое соотношение оптических с/ш. При излишней длине АОВ и ограниченной мощности накачки накопленная мощность сигнала начинает сама принимать участие в создании инверсии населенности  $(N_2 - N_1)$ , что соответствует загибу вниз кривых на рис. 6.5, б.

Амплитудная характеристика КВОУ при вышеуказанных данных представлена на рис. 6.5, в, при двусторонней накачке лазерами мощностью по  $6\vec{4}$  мВт каждый (кривая  $6\vec{4} + 6\vec{4}$ ); при обратной накачке мощностью 64 мВт (кривая  $6\vec{4}$ ) и прямой накачке мощностью 64 мВт (кривая  $6\vec{4}$ ). Как видно из этого рисунка, выходная мощность не всегда пропорциональна входной мощности оптического сигнала, наблюдается насыщение. Это говорит о том, что мощность усиливаемого сигнала нарастает быстро, вызывая при этом стимулированное лучеиспускание с большей скоростью, чем создается инверсия, за счет чего снижается число атомов эрбия, находящихся в ограничивается возбужденном состоянии, И усиление. Неискаженному соответствует начальный усилению сигналов линейный участок характеристики на рис. 6.5, в. В режиме линейного усиления энергия, приобретаемая оптическим сигналом при прохождении активного вещества, составляет незначительную часть энергии источника накачки. Из-за низкого к.п.д. квантовые усилители, работающие в линейном режиме, применяются, как правило, в маломощных устройствах (предварительные КВОУ и линейные

КВОУ). Под к.п.д. в данном случае принимается отношение приращения интенсивности усиливаемого сигнала  $I_{\rm BMX} - I_{\rm BX}$  к интенсивности накачки  $I_{\rm H}$ .



Рис. 6.5. Зависимости энергетических характеристик КВОУ: а – усиления от мощности прямой накачки; б – усиления от длины АОВ; в – выходной интенсивности сигнала от входной при различных условиях накачки

Более высокий к.п.д. усилителя можно получить в режиме, приближающемся к насыщению, поэтому усилители мощности обычно работают в этом режиме. Изменение к.п.д. с переходом в область насыщения происходит немонотонно: сначала к.п.д. растет, а затем, по мере приближения к полному насыщению, падает. В предельном случае, когда величина входного сигнала соответствует режиму полного насыщения, к.п.д. равен нулю, так как вся энергия источника накачки расходуется на нерезонансные потери в активной среде и спонтанное излучение.

Процессы насыщения в усилителях импульсных сигналов приводят к искажению формы импульсов. Рис. 6.6 схематически иллюстрирует изменение формы входного импульса в различных режимах работы усилителя.

В режиме линейного усиления (рис. 6.6, а) выходной импульс по форме



полностью совпадает со входным, так как любая часть импульса усиливается практически одинаково.

В режиме, приближающемся к усиление насыщению, активной среды в АОВ для различных частей импульса различно. Первая часть импульса, усиливаясь в активной среде, вызывает индуцированные переходы снижает инверсию И населенностей. Усиление для последующих частей импульса становится меньше. В результате передний фронт импульса становится круче, а вершина более пологой (рис. 6.6, б).



Таким образом, при усилении в режиме насыщения (нелинейный режим) можно получить весьма короткие импульсы на выходе КВОУ.

Колебания небольшой входной мощности сигналов не вызывают нестабильности усиления из-за большего времени жизни атомов эрбия в возбужденном состоянии (0,1...1 мс и более). Так как время жизни слишком велико по сравнению с длительностью сигналов (при скоростях передачи мегабит и гигабит в секунду), то КВОУ почти не искажает сигнал, так как работает в этом случае в режиме ожидания.

## 6.3 Шумы квантовых волоконно-оптических усилителей. Меры борьбы с ними

1 Важной характеристикой КВОУ является спонтанный собственный шум, возникающий вследствие усиления спонтанного лучеиспускания атомов эрбия КВОУ. Работающий в режиме недостаточного насыщения КВОУ дает меньший уровень шумов, так как мощность излучения накачки расходуется преимущественно на усиление информационного сигнала. По той же причине уровень шумов на выходе КВОУ при наличии усиливаемых информационных сигналов, будет ниже, чем без них.

На рис. 6.7 представлена спектральная плотность шума (ASE – amplified spontaneous emission) при наличии информационного сигнала на входе КВОУ (кривая 1) и при отсутствии такового (кривая 2). Следовательно, можно сделать вывод, что КВОУ работают в режиме насыщения по отношению к выходному сигналу. Это создает естественное выравнивание уровней сигналов В оптических ВОСП СРК, что крайне желательно для линий большой Если протяженности с большим числом КВОУ. лазер на передаче, предшествующий КВОУ, излучает спектр модулированного несущего колебания  $\Delta f$  и фильтр в ПРОМ пропускает его полностью, то вклад в мощность шума на выходе ПРОМ будет равен  $ASE \times \Delta f$ .



Рис. 6.7. Спектральная плотность спонтанного шума: 1 – при наличии сигнала на входе; 2 – при отсутствии такового

Таким образом, ВОЛП с каскадом КВОУ проявляют себя лучше, когда линейный групповой сигнал представлен более узкими в спектральном отношении оптическими каналами. Так как шумовой спектр простирается далеко за пределы спектра линейного оптического информационного сигнала, то наибольшая часть спонтанного шума может быть устранена с помощью оптического полосового фильтра, включаемого на выходе каждого КВОУ.

2 Квантовый классический принцип работы КВОУ и образование спонтанных шумов в них описаны во многих литературных источниках, однако без учета электродинамических особенностей распространения взаимноортогональных волн HE<sub>11</sub> в их изогнутых активных оптических волокнах. Вместе с тем, в изогнутых АОВ упругая анизотропия материала вызывает появление в их поперечных сечениях потоков мощностей невзаимной связи между указанными взаимно-ортогональными волнами. Именно эти потоки мощностей, как доказано в работе [16], порождают дополнительные к ASE шумы в КВОУ путем стимулирования эмиссии квантов возбужденных атомов редкоземельных химических элементов (эрбия, тулия, иттербия), легирующих сердцевину АОВ. Назовем указанные шумы КВОУ *поляризационными шумами*. Одной из мер борьбы с такими шумами является укладка АОВ в плоскости по спирали Архимеда [17], исключающей перетекание мощностей между взаимноортогональными поляризованными волнами HE<sup>e</sup><sub>11</sub> и HE<sup>o</sup><sub>11</sub> (см. рис. 5.12 и 5.13). Экспериментальные данные работы [18] подтверждают теоретические результаты работ [16, 17] (подробнее см. пп. 5).

3 Уровень шумов КВОУ зависит от длины волны излучения накачки. Исследования показали, что при накачке длиной волны 980 нм шумы КВОУ меньше, чем при накачке длиной волны 1480 нм.

4 Разработаны КВОУ с АОВ на фтороцирконатной основе  $ZrF_4$ , также легированные эрбием, работающие (как и КВОУ на кварцевой основе) в диапазоне от 1530 до 1560 нм, но имеющие более раномерную спектральную характеристику мощностей сигнала и шума на выходе (см. рис. 6.8): а – для КВОУ на основе SiO<sub>2</sub>, где наблюдается завал в окрестности 1540 нм; б – для КВОУ на фтороцирконатной основе.



Рис. 6.8. Спектральные характеристики мощностей сигнала и шума на выходе: а – для КВОУ на основе SiO<sub>2</sub>; б – для КВОУ на фтор-цирконатной основе

в случае применения КВОУ Это приводит, на кварцевой основе К необходимости устанавливать эквалайзеры с целью выравнивания энергии канальных оптических сигналов разных длин волн ВОСП СРК или производить намеренное предварительное селективное ослабление входных сигналов с более ровной спектральной целью получения зависимости мощностей сигналов, а также соотношения с/ш на выходе КВОУ. Это мероприятие уменьшает кросс-модуляцию (взаимное влияние) спектров соседних каналов мультиплексировании при спектральном И, следовательно, уменьшает нелинейные шумы.

5 К вышеуказанным шумам в волоконно-оптическом тракте следует добавить также *остаточное излучение накачки КВОУ*, проникающее в линейное ОМОВ, и излучение, обусловленное отражениями от входного и выходного торцов АОВ.

6 При энергетической перегрузке в линейных ОМОВ возникают нелинейные продукты преобразования частот, которые проявляются в виде

шумов в волоконно-оптическом тракте, поражающих групповые линейные оптические сигналы (подробнее см. п. 9). Для уменьшения уровня шумов необходимо снижать уровень передачи таких канальных сигналов.

Другим направлением борьбы с нелинейными шумами в волоконнооптическом тракте вследствие нелинейных преобразований в самом ОМОВ является уменьшение удельной по поперечному его сечению мощности оптических групповых сигналов ВОСП СРК путем увеличения эффективной площади поперечного сечения ( $A_{3\phi}$ , мкм<sup>2</sup>) одномодового распространения, т. е.

увеличения диаметра модового поля (пятна) в ОМОВ.

Увеличение поперечного сечения пучка лучей, т. е. увеличение  $A_{3\phi}$ , показанное в [11], происходит в ОМОВ с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла (см. п. 5.3.6). Увеличение  $A_{3\phi}$  достигается также путем синтезирования сложных профилей показателя преломления в поперечном сечении ОМОВ. Ряд компаний уже создали ОМОВ с повышенным значением  $A_{3\phi} = 78 \text{ мкm}^2$  (Corning); 120 мкм<sup>2</sup>; 160 мкм<sup>2</sup> (Fujikura). Вследствие этого допускается увеличение мощности ГЛОС на передаче ВОСП СРК, что в свою очередь увеличивает длину усилительного участка. Применение таких ОМОВ позволяет повышать уровень оптической мощности групповых сигналов ВОСП СРК на передаче вплоть до +19, +23 и даже +30 дБм соответственно без существенного увеличения продуктов нелинейного преобразования.

#### 6.4 Применение оптических усилителей

В зависимости от применения различают: *постусилители (бустерные, booster)*, являющиеся по сути волоконно-оптическими усилителями мощности, компенсирующими потери, возникающие на стыке лазерных диодов с ОМОВ внутри ПОМ, внутри ОМОВ, внутри оптических мультиплексоров и других пассивных элементов на передаче. Включаются бустеры также перед разветвителями и после них. Накачка таких усилителей обычно осуществляется лазерами накачки на длине волны 1480 нм, так как их шумы затухают на последующей длине усилительного участка примерно также, как и сигнал в ОМОВ. Соотношение с/ш при этом остается почти неизменным.

Для оптических сетей кабельного телевидения, в схемах с разветвлением мощности КВОУ, легированные эрбием, могут развивать мощность до 10 Вт, а с примесью иттербия – 50 Вт (фирма Полюс, Россия). Для ВОСП такая большая мощность пока не нужна. Суммарная максимальная мощность на сегодняшний день, вводимая в ОМОВ систем ВОСП СРК, равна 1 Вт (+30 дБм). Коэффициент шума бустеров лежит в пределах 6...7 дБ и меньше.

В схемах с разветвлением мощности в роли постусилителей могут использоваться и полупроводниковые широкополосные УБВ-усилители. Полупроводниковые узкополосные оптические усилители Фабри–Перо используются, преимущественно, в роли канальных усилителей ВОСП СРК как на передаче, так и на приеме канальных оптических сигналов. В таких случаях в аппаратуре ВОСП СРК часто полупроводниковые усилители интегрируются вместе с другими оптическими устройствами.

*Линейные усилители (промежуточные)*, как правило, КВОУ, накачиваемые на длинах волн 980 или 1480 нм, предназначены для восстановления мощности оптических сигналов, прошедших усилительный участок ВОЛП. Созданы КВОУ с уровнем усиления 30...45 дБ в спектре длин волн 1530...1565 нм, что обеспечивает длины усилительных участков на коротких ВОЛП не менее 100 км. На очень длинных ВОЛП с большим количеством ВОУ испльзуется усиление в пределах 10...20 дБ.

В последние годы наметилась тенденция к применению дистанционной подачи оптического излучения накачки к линейному КВОУ. В этом случае накачка осуществляется на длине волны 1480 нм. Необходимая для создания инверсной населенности мощность составляет примерно 10 мВт, что обеспечивает благоприятные условия для дистанционного оптического питания (накачки) удаленных линейных КВОУ, так как излучение на 1480 нм претерпевает затухание не намного большее, чем на 1550 нм. Это дает возможность осуществлять дистанционную подачу оптической накачки по информационному волокну со стороны приемной станции. Линейный КВОУ с таким способом питания может быть удален на расстояние до 100 км от питающей станции.

Уровень мощностей излучения накачки составляет 200...500 мВт (22...27 дБм). При такой мощности накачки, с учетом наличия мощности групповых оптических информационных сигналов, уже проявляются в ОМОВ нелинейные воздействия, которые отрицательно влияют на качественные параметры оптических информационных сигналов ВОСП СРК. Для устранения таких влияний излучение накачки КВОУ подается по запасному ОМОВ. В таком случае дистанционное оптическое питание (накачка) может подаваться как со стороны приема, так и со стороны передачи или одновременно с обеих сторон.

Расширение спектра усиления АОВ в КВОУ осуществляется путем дополнительного к эрбию легирования *тулием* (Tm (69)), в периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева следующим за эрбием Er (68) и имеющим *атомную спектральную линию* (спектральную плотность)  $g(\omega)$ , сдвинутую вверх по шкале частот по отношению к атомной спектральной линии эрбия (см. рис. 6.9). Спектральная линия семидесятого химического элемента – *итербия* (Yb (70)) – сдвинута еще выше по шкале частот.

Изменяя процентное содержание элементов Er, Tm и Yb в AOB, можно синтезировать как однополосный широкополосный КВОУ (рис. 6.9, а), так и двухполосный (рис. 6.9, б). На этой основе реализованы КВОУ, позволяющие перекрывать весь диапазон пропускания ОМОВ типа All Wave.



Рис. 6.9. Качественные атомные спектральные характеристики химических элементов: ---- парциальные  $g_i(\omega)$  указанных элементов Er, Tm, Yb; \_\_\_\_\_ суммарные функции  $\sum_i g_i(\omega) = g(\omega)$ 

Опубликованы результаты экспериментальных опытных образцов КВОУ, имеющих полосы усиления 54 и 113 нм. Первый из них работает в двух поддиапазонах – (1530...1560) нм и (1580...1610) нм. Конструктивно он модулей КВОУ, параллельно соединенных состоит ИЗ двух через мультиплексоры на входах и выходах, один из которых выполнен на основе АОВ, легированного эрбием, а другой – на основе АОВ, легированного эрбием и тулием, работающим в поддиапазоне (1530...1610) нм. Второй усилитель с полосой 113 нм также состоит из двух модулей КВОУ, соединенных параллельно на входах и выходах с помощью мультиплексоров. Как и в предыдущем случае, усилитель работает в двух поддиапазонах – (1450...1480) нм и (1530...1608) нм.

Усилитель с диапазоном (1450...1480) нм содержит АОВ, легированное тулием, а усилитель с диапазоном (1530...1608) нм – кроме эрбия, еще ионами иттербия. Накачка этих усилителей осуществляется соответственно на длинах волн 1047 нм (400 мВт) и 1480 нм (160 мВт – в прямом и 100 мВт – во встречном направлениях).

В настоящее время линейные усилители на основе эрбия включают в себя компенсаторы дисперсии. Для этого длина АОВ делится пополам. Первая половина АОВ выполняет роль предусилителя и накачивается поэтому длиной волны 980 нм, а вторая половина, накачиваемая длиной волны 1480 нм, выполняет роль усилителя мощности. Между ними устанавливается компенсатор дисперсии, описанный в п. 7.11. На выходе усилителя, как правило, включаются оптический вентиль и оптический полосовой фильтр, ограничивающий полосу частот шумов.

Разработан сверхширокополосный КВОУ с шириной спектра усиления  $\Delta \lambda = 80$  нм ( $\Delta f \approx 10$  ТГц) на АОВ, легированном эрбием и туллием (Япония). Усиление оптических сигналов происходит в диапазоне длин волн 1530...1610 нм с коэффициентом усиления 20 дБ при коэффициенте шума (3...5)дБ.

В последнее время разработан полупроводниковый оптический усилитель с выходной мощностью более 150 мВт (+21,8 дБм) при полосе усиления по уровню  $0,5I_m$ , равной 110 нм, и коэффициенте усиления 15 дБ. Это дает возможность использовать его в ВОСП в качестве усилителя мощности на передаче, а также в качестве линейного усилителя.

Предварительные оптические усилители на основе легированных эрбием ОМОВ устанавливаются непосредственно перед оптическими приемными устройствами и способствуют увеличению отношения с/ш на выходе электронного каскада усиления в ПРОМ. Накачка предусилителей осуществляется лазерами на длине волны 980 нм по схеме встречной накачки (см. рис. 6.4, б).

Предусилители (preamplifiers) характеризуются большим коэффициентом усиления и малым коэффициентом шума. Рекордный коэффициент усиления КВОУ (51 дБ) был получен с использованием АОВ, легированного эрбием, длиной 22 м, мощность накачки на длине волны 980 нм составляла 180 мВт. Типовое значение коэффициента усиления – 30...45 дБ при коэффициенте шума 3...5 дБ.

В таблице 6.2 приведены технические характеристики двух промышленных моделей КВОУ, выпускаемых Институтом радиоэлектроники IRE-POLUS (Россия).

#### 6.5 Малошумящий волоконно-оптический усилитель

Малошумящие волоконно-оптические усилители могут быть использованы в технике оптической связи в качестве пост-усилителей (бустерных) для увеличения выходной оптической мощности сигналов, промежуточных линейных усилителей в волоконно-оптических линиях передачи большой протяженности и в качестве предварительных оптических усилителей, включаемых перед фотоприемными устройствами с целью увеличения чувствительности приемных устройств, когда к ним предъявляются особенно жесткие требования по уровню шумов или соотношению с/ш.

Квантовый классический принцип работы волоконно-оптических усилителей и образование спонтанных шумов в них описаны во многих источниках, однако без учета электродинамических особенностей распространения волн в их изогнутых активных оптических волокнах.

При укладке одномодовых оптических волокон (OB) на некоторый круговой цилиндр по спиральным линиям, в частности по дуге окружности, в них наблюдается метрическая и диэлектрическая анизотропии, проявляющиеся в двулучепреломлении, различающихся фазовых скоростях распространения основных необыкновенной HE<sup>e</sup><sub>11</sub> и обыкновенной HE<sup>o</sup><sub>11</sub> волн с взаимно-ортогональными поляризациями. Кроме того, вследствие указанной анизотропии, в спиральных одномодовых оптических волокнах (COMOB) наблюдается невзаимный переток мощностей в плоскости поперечного сечения между указанными волнами.

122

		Значения			
Параметры	минимальные	типичные	максимальные		
Оптические характеристики					
Зона усиления, нм	1530		1570		
Мощность насыщения <i>Р</i> вых, дБм					
при входной мощности <i>P</i> <sub>вх</sub> = – 3 дБм:					
EAU-200	_	23	23,5		
EAU-350	_	25,5	26,0		
Коэффициент усиления при малом					
входном сигнале, дБ ( $\lambda = 1545$ нм)	42	_	_		
Неравномерность коэффициента			±0,3		
усиления, дБ	_	_			
Поляризационная чувствительность, дБ	_	_	0,2		
Максимальное значение коэффициента	5,5		6		
шума, дБ		_			
Поляризационная модовая дисперсия, пс	_	_	0,2		
Оптическая изоляция вых/вх, дБ	50	_	_		
Характеристика физических интерфейсов входа/выхода					
Тип входного/выходного волокна		$SMF-28^{TM}$			
Тип оптических соединителей	FC/PC,	FC/SPC,	FC/APC		
Длина соединителя, м	1,5	—	—		
Параметры лазера накачки					
Номинальная длина волны накачки, нм	_	965	_		
Полоса накачки, нм		1x100	-		
Время наработки на отказ, ч.	$5 \cdot 10^5$		$1 \cdot 10^{6}$		
Электрические характеристики					
Рабочее напряжение, В (постоянный ток)	5	_	7		
Потребляемая мощность при 20°С, Вт	-	-	12		
Рабочий диапазон температур, °С	-30	_	+65		
Время прогрева до полной стабилизации,	-	_	3		
МИН					
Размеры, мм		115x21x165			
Масса, кг		0,3			

#### Таблица 6.2. Технические характеристики КВОУ типа EAU-200 и EAU-350

Эти потоки мощностей невзаимной связи между указанными волнами определяются координатами поперечного сечения ОВ, шага р и радиуса R изогнутой по спирали оси ОВ. Именно эти потоки мощностей порождают стимулирования основные шумы КВОУ путем В эмиссии квантов возбужденных атомов редкоземельных химических элементов (эрбия, тулия, иттербия и др.), легирующих сердцевину АОВ. Особенности невзаимных между указанными влияний волнами в зависимости от соотношения  $0 < p/4\pi R \le \infty$  исследованы в работе [16], где, в частности, показано, что в изогнутом по дуге окружности OB ( $p/4\pi R = 0$ ) невзаимные влияния между указанными волнами полностью отсутствуют (см. рис. 5.12 и 5.13), т. е. в поперечном сечении такого СОМОВ нет поперечных потоков мощностей между рассматриваемыми взаимно-ортогональными волнами, следовательно нет стимулированной ими эмиссии квантов возбужденных атомов. При этом будут минимальными шумы на выходе ВОУ.

Вместе с тем при небольших изменениях соотношения  $p/4\pi R$  в пределах  $0 < p/4\pi R \le 0.05$  относительные мощности невзаимных влияний быстро возрастают от  $-\infty$  до -20 дБ соответственно. Это сопровождается увеличением мощности шумов на выходе ВОУ до минус (22...18) дБм вследствие стимулированной эмиссии квантов возбужденных атомов.

Известны публикации с описанием и фотографиями укладки активного волокна в волоконно-оптическом усилителе в круглые бухты, в которых разброс значений радиусов АОВ составляет R = 12,9...26,4 мм, а шагов АОВ в бухте – p = 0...13,5 мм (см., например, [18]). Этот разброс обеспечивает изменения в бухте соотношения  $0 < p/4\pi R \le 0,05$ , следовательно вышеприведенные значения шумов на выходе ВОУ.

Для уменьшения уровня шумов на выходе ВОУ активное оптическое волокно предлагается укладывать в канавки (бороздки) на плоских дисках по спиралям Архимеда, прообразом которых могут быть граммофонные диски с отверстием радиуса  $r_0$  в центре [17]. Укладка АОВ на диске может быть как односторонней, так и двусторонней, правой с одной стороны и левой – с другой или наоборот, что несущественно (рис. 6.10).

Длина *L* спиральной канавки, или AOB, может быть определена как сумма длин *M* витков, уложенных на диске. Длина отдельного *i*-того витка AOB приближенно равна  $l_i = 2\pi r_i$ . Тогда вся необходимая длина AOB определяется в виде

$$L = 2\pi (r_0 + r_1 + r_2 + \dots + r_{\rm M}),$$

где  $r_0$  – минимальный радиус витка АОВ на диске, а разница радиусов соседних витков  $r_{i+1} - r_i = B$ ; радиус произвольного витка  $r_{\rm M} = r_0 + B(M-1)$ . Сумма членов в скобке, представляющих арифметическую прогрессию, равна  $M(r_0 + r_{\rm M})/2$ .

Отсюда следует, что

$$L = \pi M \left[ 2r_0 + B(M - 1) \right]. \tag{6.1}$$

С другой стороны, длина *L* АОВ определяется степенью легирования материала АОВ эрбием и мощностью накачки, т. е. необходимой величиной усиления на выходе ВОУ. Неизвестными конструктивными параметрами, таким образом, являются количество витков спирали Архимеда *M* и минимальный радиус витка  $r_0$ , который должен быть больше минимально допустимого по соображениям прочности АОВ на излом ( $r_0 > 3,413b$ , где b – наружный радиус голого ОМОВ) [23]. Тогда квадратное уравнение (6.1) относительно *M* представляется в виде

$$\pi BM^{2} + (2\pi r_{0} - \pi B)M - L = 0,$$

положительный корень которого

$$M = \frac{-(2\pi r_0 - \pi B) + \sqrt{(\cdot)^2 + 4L\pi B}}{2\pi B}$$



Рис. 6.10. Укладка АОВ на плоском диске по спирали Архимеда: а – вид в плане; б – вид с торца диска: 1 – диск с канавками с двух сторон; 2 – АОВ, уложенное в канавки с верхней стороны; 3 – место перехода АОВ с нижней на верхнюю сторону диска; 4 – АОВ на нижней стороне диска; 5 – начало АОВ; 6 – конец АОВ

Укладка АОВ на диске определяет поляризацию распространяющейся волны НЕ<sup>0</sup><sub>11</sub>, перпендикулярную плоскости диска. Поэтому плавные локальные изгибы АОВ в плоскости, перпендикулярной тонким дискам, связанные с необходимостью перехода волокна на другую его сторону, некритичны, т. е. не дополнительной связи взаимно-ортогональных вызывают волн И, следовательно, шумов. Поэтому можно увеличивать количество дисков, уменьшая их наружный радиус и увеличивая внутренний радиус r<sub>0</sub>. С учетом конструктивных неоднородностей, которые практически всегда существуют, уменьшению обмена мощностями увеличение приводит К между  $r_0$ рассматриваемыми волнами в АОВ [16, 17], что весьма существенно для минимизации шумов в нем.

Важно, чтобы при укладке в канавки на диски, АОВ не приобретало кручения, так как кручение материала волокна приводит к перетеканию мощностей между взаимно-ортогональными волокнами и, следовательно, к возрастанию стимулированных этим шумов на выходе ВОУ. Двусторонняя укладка АОВ на диск предпочтительна, так как непреднамеренное, например правое, кручение волокна на одной стороне диска может компенсироваться непреднамеренным левым его кручением на другой стороне диска.

# 6.6 Допустимое количество квантовых ВОУ на регенерационном участке

Рассмотрим процесс усиления сигнала одного из оптических каналов ВОСП СРК, а также процесс накопления шумов в волоконно-оптическом тракте, состоящей из каскада КВОУ. Каждый *i*-тый КВОУ осуществляет усиление как сигнала с коэффициентом усиления g (дБ), так и шума, внося при этом дополнительно свой собственный шум мощностью  $N_0$ :

$$g = 10 \lg \frac{P_{iBbIX}}{P_{iBX}} = 10 \lg \frac{N_{iBbIX} - N_0}{N_{iBX}},$$
(6.2)

где  $P_{iвых}$ ,  $P_{iвx}$ ,  $N_{iвыx}$ ,  $N_{iвx}$  – мощности выходного и входного сигналов, а также выходного и входного шумов соответственно по отношению к i-тому усилителю.

Оптические усилители характеризуются определенной мощностью насыщения выходного группового сигналов Р<sub>вых.н</sub>. При меньшем чем Р<sub>вых.н</sub> уровне выходного сигнала возрастает удельный вес постоянной составляющей вносимого спонтанного шума, а при большем уровне выходного сигнала происходит усиление только шума, так как мощность сигнала достигает быстро *Р*<sub>вых.н</sub> (см. рис 6.5, в). В идеально сбалансированной линии эффективная работа КВОУ достигается при такой мощности входного сигнала, когда выходная его мощность сравнима с мощностью насыщения, т. е. *Р*<sub>*і*вых</sub> ≤ *Р*<sub>вых.н</sub>. С другой лля сохранения неизменным соотношения стороны. мошностей с/ш. необходимо чтобы затухание на длине усилительного участка как сигнала, так и шума было равно *g*:

$$\alpha L = g = 101g \frac{P_{(i-1)B\rm{b}\rm{IX}}}{P_{i\rm{BX}}} = 101g \frac{N_{(i-1)B\rm{b}\rm{IX}}}{N_{i\rm{B}\rm{X}}}.$$
(6.3)

Отсюда и из (6.2) следует, что мощность шума *i*-го КВОУ  $N_{iBblx} = N_{(i-1)Bblx} + N_0$ , а значение отношения оптических мощностей с/ш (защищенность от шумов) на выходе последнего *i*-того КВОУ

$$(c/m)_i = 101g \frac{P_{BbIX,H}}{N_{iBbIX}} = 101g \frac{P_{BbIX,H}}{iN_0},$$
 (6.4)

при условии, что мощности собственных спонтанных шумов всех КВОУ одинаковы и равны  $N_0$  по всему спектру передачи группового оптического сигнала ВОСП.

Рекомендацией ITU-Т установлены минимально допустимые значения (с/ш) на оптический канал ВОСП в зависимости от скорости передачи в этом канале, рассчитанные на длину регенерационного участка, содержащего *i* волоконно-оптических усилителей.

Если мощности сигнала и шума указаны в децибелах на метр (дБм), то выражение (6.4) в расчете на один оптический канал при *i* включенных оптических усилителях переписывается в виде

$$(c/m)_i = p_{MJOII} - n_0 - 10 \lg N,$$
 (6.5)

максимально допустимое значение мощности сигнала на где  $p_{\rm MJOH}$ оптический канал, ограниченное нелинейными явлениями в ОМОВ при загрузке его ВОСП-ОК; n<sub>0</sub> – мощность шума одного КВОУ, также пересчитанная на один оптический канал; (с/ш)<sub>i</sub> – минимально допустимое значение отношения с/ш для оптического канала при его загрузке различными цифровыми ВОСП-ОК при *i* усилителях. Например, для случая использования СТМ-16 (2,5 Гбит/с)  $(c/ш)_i = 18...21$ дБ; для СТМ-64 (10 Гбит/с) (с/ш) = 28...31 дБ. Отсюда видно, что система СТМ-64 предъявляет к отношению с/ш более высокие требования, чем к СТМ-16, что ведет к меньшему допустимому количиству КВОУ при одинаковом расстоянии между ними на регенерационном участке.

Если на длине регенерационного участка, кроме линейных (промежуточных) КВОУ, включены и бустерный и предварительный усилители, то в формуле (6.5) вместо i необходимо подставить (i+2); если только один – бустерный или предварительный, то вместо i необходимо подставить (i+1).



Рис. 6.11. Диаграмма уровней оптической мощности сигнала (---) и спонтанного шума (...) на канал, а также отношения с/ш (—) в зависимости от числа КВОУ при неизменном α*L* = *g* между усилителями

Как видно из рисунка 6.11 и выражения (6.5), отношение с/ш для одного канала уменьшается с ростом количества КВОУ.

В формуле (6.5)  $n_0$  характеризует мощность шумов на выходе отдельного КВОУ в децибелах на метр, состоящую из мощности усиленного спонтанного излучения ASE, приведенной ко входу КВОУ, равной *hf* (для примера *hf* = 1,28 ·10<sup>-19</sup> Вт/Гц для  $\lambda$  = 1550 нм) в расчете на спектральную полосу 1 Гц, усиленную усилителем на *g* (дБ) и просуммированную по спектру сигнала в оптическом канале  $\Delta f = \Delta f_H + 2\Delta E$  при модуляции по интенсивности, а также с учетом *шум-фактора* (noise figure), или коэффициента шума,

$$K_{\rm III} = 101 {\rm g} \frac{({\rm c/III})_{i{\rm BX}}}{({\rm c/III})_{i{\rm BbIX}}},$$

типичное значение которого составляет 3...6 дБ (обычно указывается в ТУ на КВОУ). С учетом всего перечисленного

$$n_0 = 101g \frac{hf}{10^{-3}} + 101g \Delta f + g + K_{\rm III}, \qquad (6.6)$$

где  $h = 2\pi 1,05 \cdot 10^{-34}$  Вт/Гц; f – центральная частота оптического канала (несущей). Здесь под полосой частот  $\Delta f$  следует понимать полосу частот оптического несущего колебания  $\Delta f_{\rm H}$ , если она намного шире сигнальной (модуляционной) полосы частот  $\Delta F \approx 1,2 B$ , где B – скорость передачи (бит/с). Если на входе ПРОМ прямого детектирования имеется полосовой оптический фильтр, полоса пропускания которого шире  $\Delta f_{\rm H}$  и тем более шире сигнальной полосы частот  $\Delta F$ , то под  $\Delta f$  следует понимать полосу пропускания вышеуказанного фильтра. Если В канальном тракте включен полупроводниковый усилитель, полоса усиления которого меньше 5 ГГц, то расчет шумов следует вести по этой полосе частот (см. Приложение).

Таким образом, расчет шумов КВОУ следует вести по максимальной полосе частот с+ш в канальном тракте передачи. Если в качестве приемного устройства используется ПРОМ с гетеродинированием, то полосой  $\Delta f$  часто является полоса промежуточных частот ПРОМ. Учитывая это, из выражения (6.5) с учетом (6.6) определяется максимально допустимое количество КВОУ на регенерационный участок.

Для определения  $\alpha L_y = g$  необходимо решить (6.5), с учетом (6.6), относительно *i* и *S* в точке приема на длине одного из усилительных участков.

#### 6.7 Волоконные лазеры

Легированные эрбием одномодовые оптические волокна могут быть с успехом применены и для лазерной генерации. Для этого необходимо обеспечить накачку такого ОМОВ с целью придания ему усилительной способности и создать положительную оптическую обратную связь. На рис. 6.12 представлены две схемы волоконных лазеров (ВЛ), где используются частотно-селективные направленные ответвители (НО). Накачка успешно осуществляется с помощью полупроводникового ЛД, излучение которого ( $\lambda_{\rm H}$  = 980 или 1480 нм) вводится в одно из плеч HO. Лазерный резонатор бегущей волны ВЛ по схеме рис. 6.12, а создается из активного одномодового AOB, размещенного между двумя высокоотражающими зеркалами, обладающими спектрально-избирательными свойствами коэффициентов отражения  $R_3$  ( $\lambda$ ) и  $R_2(\lambda)$  (например многослойные также электромагнитной  $C_{23}(\lambda)$ отражательные покрытия), связью a направленного ответвителя, обладающего также частотно-избирательными свойствами в направлении плеч  $2 \stackrel{\rightarrow}{\leftarrow} 3$ . Вывод интенсивности генерации из АОВ осуществляется в плечо 4 с участием коэффициента электромагнитной связи НО  $C_{24}$  ( $\lambda$ ). Следовательно, в плечо 4 будет поступать интенсивность излучения в спектре длин волн (частот), определяемом произведением спектрально-зависимых функций, а именно:

$$|E(\lambda) \cdot g(\lambda) \cdot R_3(\lambda) \cdot R_2(\lambda) \cdot C_{23}(\lambda) \cdot C_{24}(\lambda)|^2$$
,

а также условиями активного резонатора, составленного из АОВ с зеркалом  $R_2(\lambda)$ , плечами  $2 \stackrel{\prec}{\leftarrow} 3$  НОД и зеркалом  $R_3(\lambda)$  (см. (3.6) и рис. 3.3, б).



Рис. 6.12. Схемы волоконных лазеров

Если в роли НО использовать перестраиваемый D-образный НОД, схема которого представлена на рис. 6.13, то при этом можно управлять в некоторых пределах длиной волны и полосой длин волн излучения такого ВЛ.

рассмотрении устройства Остановимся на И принципа работы перестраиваемого НОД, который состоит из двух продольно срезанных половинок ОМОВ с разными спектральными функциями показателей преломления сердцевин *n*<sub>1*b*</sub>, помещенных в оправу и тщательно *n*<sub>1*a*</sub> И притертых друг к другу. Различие  $n_{1a}$  и  $n_{1b}$  половинок ОМОВ вместе с изменяющимися формой и размерами области их пересечения при повороте их друг относительно друга приводят к изменению частотной избирательности коэффициентов электромагнитной связи между разными плечами.

В схеме ВЛ по рис. 6.12, б лазерный резонатор создается из отрезка одномодового АОВ, нагруженного на несогласованные с ним плечи НО с коэффициентами отражения  $R_2(\lambda)$  и  $R_3(\lambda)$ , с положительной обратной связью между плечами  $2 \stackrel{\sim}{\leftarrow} 3$ , пропорциональной коэффициенту электромагнитной связи  $C_{23}(\lambda)$ . Вывод лазерного излучения осуществляется из плеча 4 интенсивностью в спектре длин волн (частот), определяемой произведением спектрально-зависимых функций, а именно:

$$|E(\lambda) \cdot g(\lambda) \cdot R_2(\lambda) \cdot R_3(\lambda) \cdot C_{23}(\lambda) \cdot C_{24}(\lambda)|^2.$$

Следует заметить, что коэффициенты отражения здесь реализуются меньшими по модулю и не столь избирательными по частоте, чем по схеме рис. 6.12, а, поэтому излучение ВЛ по схеме рис. 6.12, а будет более узкополосным. Однако такие ВЛ более дорогие из-за зеркальных покрытий торцов АОВ, чего нет в ВЛ, реализованных по схеме рис. 6.12, б.



Рис. 6.13. Перестраиваемый D-образный направленный ответвитель

Характерными особенностями ВЛ на основе ОМОВ, легированных эрбием, являются:

простая накачка от полупроводниковых лазеров ( λ = 980 или 1480 нм)
 в торец AOB;

– высокий уровень накачки на единственной основной моде HE<sub>11</sub>, поддерживаемой AOMOB;

– в отличие от полупроводниковых ЛД, в ВЛ не наблюдается перескоков генерации на высшие поперечные моды резонатора при большой выходной мощности излучения, вследствие чего устанавливается одномодовый режим генерации в узкой полосе частот;

 из-за отсутствия перескоков стабильная генерация осуществляется без оптических вентилей;

– высокий уровень накачки при одномодовом режиме распространения в АОМОВ приводит к тому, что усиление в активном волокне осуществляется стабильно на большой длине и может быть распространено на весь усилительный участок. При этом уровень легирования ОМОВ эрбием становится очень низким (2·10<sup>-7</sup>...1·10<sup>-6</sup>). Наиболее эффективно накачку следует осуществлять на длине волны 1480 нм, а сами лазеры накачки размещать только по концам усилительных участков;

– ВЛ может работать в импульсном режиме, создаваемом, например, путем модуляции добротности кольцевого резонатора или применения переключателей. В частности, возможно интегрирование фазового ключа (модулятора) в кольцевой резонатор и таким путем модулировать лазерную генерацию или генерировать мощные солитонно-подобные импульсы длительностью в несколько пикосекунд (пс). Для этой цели наиболее подходят модуляторы на связанных световодах или модуляторы Маха–Цендера.

## Контрольные вопросы

- 1 Чем отличается накачка оптических полупроводниковых и волоконных усилителей?
- 2 Чем обеспечивается более широкая зона усиления в волоконных усилителях по сравнению с полупроводниковыми оптическими усилителями?
- 3 Почему уровень шумов ниже при накачке длиной волны 980 нм по сравнению с накачкой на длине волны 1480 нм?
- 4 Перечислите причины появления шумов в КВОУ.
- 5 Нарисуйте структурную схему сверхширокополосного КВОУ, зона усиления которого способна перекрыть полосу пропускания всеволнового ОМОВ.
- 6 Почему полоса частот накачки должна быть шире зоны усиления КВОУ?
- 7 Почему в волоконном лазере не наблюдается перескоков генерации?

## 7 МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Существует несколько способов увеличения пропускной способности которые волоконно-оптических систем передачи, сводятся к мультиплексированию оптических цифровых информационных сигналов нескольких ВОСП ОК в один групповой линейный оптический сигнал (ГЛОС), передаваемый по одному или паре оптических волокон. Применительно К многоканальным ВОСП методы формирования групповых информационных сигналов можно разделить на два типа: электронное мультиплексирование и оптическое мультиплексирование. Увеличение пропускной способности ВОСП путем увеличения скорости передачи канального электронного оборудования ограничивается техническими возможностями электрических компонентов.

Максимальная скорость электронного мультиплексирования достигла 40 Гбит/с. Дальнейшее наращивание скорости передачи и пропускной способности (информационной емкости) ВОСП реализуется оптическими методами мультиплексирования: спектральным (СМ), временным (ВМ) и поляризационным (ПМ) или их сочетанием. Наибольшее распространение на сетях связи в мире получило СМ. При любом из указанных методов мультиплексирования обязательным, как правило, является использование источников оптического когерентного излучения.

# 7.1 Волоконно-оптические системы передачи со спектральным мультиплексированием

В указанных системах проблема увеличения пропускной способности успешно решена помощью многоволнового (спектрального) С мультиплексирования промодулированных, как правило, по интенсивности оптических когерентных несущих длин волн лазерных источников излучения (ПОМ). Такая технология формирования группового линейного оптического сигнала (ГЛОС) называется также WDM, или DWDM. Суть этой технологии передачи информации состоит в том, что *т* информационных оптических цифровых сигналов, созданных каждый с помощью ВОСП-ОК, переносимых каждый на своей оптический несущей длине волны  $\lambda_m$  и разнесенных пространстве, объединяются с помощью оптических мультиплексоров (OM) в один линейный групповой оптический сигнал  $\lambda_{1+2+...+m}$ , который вводится в линейное оптическое одномодовое волокно (ОМОВ), входящее в состав оптического кабеля. На приемной стороне производится обратная операция оптического демультиплексирования (ОД).

Варианты структурных схем многоканальных ВОСП со спектральным разделением оптических каналов (СРК) с оптическими усилителями представлены на рис. 7.1, а, б, в, г (одно направление передачи). На рис. 7.1, д представлена схема организации двусторонней связи по одному ОМОВ с разделением передачи и приема по частоте (длине волны) с помощью циркуляторов (см п. 7.5.2.4).





- а...е электрический интерфейс
- 1...6 передающие оптические модули
- 7 транспондер
- 8 оптический мультиплексом
- 9 усилитель оптической мощноности (бустерный) 20 лазер накачки (1480 нм)
- 10 линейный ВОУ

- 11 предварительный ВОУ
- 12 оптический демультиплексор
- 13...18 приемные оптические модули
- 19 двухволновый оптический мультиплексор
- 21 оптический циркулятор

Рис. 7.1. Варианты структурных схем ВОСП СРК с оптическими усилителями: а, б, в, г – одно направление передачи; д – двусторонняя передача:



- S – контрольная точка на оптическом волокне на выходе оптическої соединителя, расположенного после ОУ или Р;

- R' – контрольная точка на оптическом волокне, на входе оптического соединителя перед ОУ или Р;

- ЛС R – контрольная точка на оптическом волокне на входе оптического соединителя непосредственно перед ОУ+ОД, в котором присутствует линейный сигна

G.692

G.694.1

-  $S_{D1}$ ...  $S_{Dn}$  – контрольные точки на выходе оптического соединителя непосредственно после ОУ +ОД

#### Рис. 7.2. Структурная схема тракта ВОСП СРК с оптическими усилителями, оптическим мультиплексором ввода/вывода и регенератором

enepurop

На рис. 7.2 изображена упрощенная структурная схема волоконнооптического линейного тракта ВОСП СРК с промежуточным регенератором Р и оптическим мультиплексором ввода/вывода (ОМВ/В) отдельных оптических каналов. Станция ввода/вывода должна содержать оптический усилитель перед ОМВ/В или быть соединенной с усилительной или регенерационной станцией. (Описание ОМВ/В см. в п. 7.5.2.3).

Регенерация оптических цифровых сигналов осуществляется поканально на приемной стороне после демультиплексирования ГЛОС (структурную схему одноканального регенератора 4.14). СМ. рис. Структурная схема многоканального регенератора Р в тракте ВОСП СРК представлена на рис. 7.3. Канальные оптические сигналы с выхода оптического демультиплексора (ОД+ОУ) подаются на канальные ПРОМ, в которых они преобразуются в электрические сигналы. Регенерация канальных сигналов осуществляется на электрическом уровне. С выхода регенераторов электрические сигналы поступают на канальные ПОМ, в которых они преобразуются снова в оптические. Оптические канальные сигналы с выходов ПОМ объединяются в групповой линейный оптический сигнал в оптическом мультиплексоре (OM+OY).



ОУ + ОД – оптический демультиплексор с оптическим усилителем; ПРОМ – приемный оптический модуль; ЭКР *N* – электрический канальный регенератор *n*-го канала; ПОМ – передающий оптический модуль; ОМ+ОУ – оптический мультиплексор с оптическим усилителем

# Рис. 7.3. Структурная схема регенератора ВОСП СРК с оптическими усилителями

В соответствии с рекомендацией ITU-Т, к ВОСП СРК предъявляются требования совместимости по оптическим стыкам (интерфейсам) с аппаратурой ВОСП-ОК синхронной цифровой иерархии (СЦИ), которыми комплектуется ВОСП СРК. Для этого утвержден план частот каналов для третьего окна прозрачности 1530...1560 нм, представляющий собой равномерную сетку частот с интервалами по 100 ГГц каждый (см. табл. 7.1). План частот состоит из

41-го оптического канала по 100 ГГц. Однако на практике используются только 32 указанных канала, поскольку крайние каналы находятся на склонах частотных характеристик эрбиевых КВОУ. Мультиплексирование каналов по 50 ГГц получило название *плотного спектрального мультиплексирования* (ПСМ  $\equiv$  DWDM).

На входы оптического мультиплексора (ОМ) должны поступать оптические цифровые сигналы, оптические несущие которых должны строго соответствовать плану частот. Для преобразования оптической несущей, не соответствующей плану частот (1,3 мкм или произвольные  $\lambda$  из третьего окна прозрачности), применяется в ВОСП СРК транспондер, на входах которого спектральные параметры оптических сигналов определены рекомендацией G.957, а на его выходах оптические сигналы должны соответствовать плану частот G.692 и G.694.1 (см. табл. 7.1).

Ширина полосы частот каждого канала в системах ПСМ является достаточно узкой. Поэтому даже небольшие смещения по длине волны в лазерах с РОС или РБО, которые используются в качестве канальных источников излучения, могут привести к недопустимому снижению уровня сигнала на входе в ПРОМ или даже полному прекращению связи. Особое внимание следует уделять подавлению боковых мод излучения канальных лазеров, поскольку они увеличивают шумы в соседних оптических каналах систем ПСМ. Этим требованиям удовлетворяют лазеры РБО и РОС.

В сетях ВОСП-ОК испольуются старые модели лазеров (рек. G.957), которые не стабилизированы по частоте и не удовлетворяют всем указанным выше требованиям. Однако в системах СМ и ПСМ можно использовать существующее оборудование сетей ВОСП-ОК. Для этого требуется заменить их ПОМ на ПОМ со стабилизированными лазерами с РОС или РБО (или поставить транспондерные модули, которые выполняют конвертирование рабочей длины волны устройства в длину волны канала плана частот (длин волн) и обратно. В некоторых случаях электрический сигнал управления лазерами можно непосредственно подавать на вход лазера с РОС или РБО, минуя транспондер. Аналогично оптический сигнал с выхода оптического демультиплексора (ОД) может быть подан на ПРОМ, минуя транспондер.

Для компенсации энергетических потерь в ОМ непосредственно на его выходе применяют бустерные КВОУ (усилители мощности), особенно если следует удлиненный усилительный участок. Промежуточные (линейные) оптические усилители требуют электрического питания и оптической накачки. Во многих случаях их установка в значительной степени увеличивает стоимость системы, а в ряде случаев может быть и невозможной (подводные системы, условия горной местности, малонаселенные территории и др.). На рис. 7.1, б представлена система с вынесенным (удаленным) КВОУ на расстояние до 100 км с подачей дистанционной оптической встречной накачки с приемной станции на длине волны 1480 нм по рабочему информационному ОМОВ с помощью двухволнового оптического мультиплексора. Уровень мощности излучени накачки равен 200...500 мВт (23...27 дБм). При такой мощности уже проявляются в ОМОВ нелинейные явления, которые отрицательно влияют на качественные параметры СРК. Для устранения таких влияний в схеме рис. 7.1, в излучение накачки КВОУ подается по запасному ОМОВ. В таком случае дистанционная оптическая накачка может подаваться как со стороны приема, так и со стороны передачи или одновременно с обеих сторон. В варианте на рисунке 7.1, д по одному ОМОВ связь ведется в обе стороны. Для этого информационные ГЛОС вводятся в ОМОВ и выводятся из него с помощью оптических циркуляторов (см. п. 7.5.2.4). По такой схеме разработана ВОСП СРК с поканальным мультиплексированием сигналами СТМ-256 (40 Гбит/с) с максимальной пропускной способностью 7 Тбит/с. В этой системе информационные сигналы СТМ-256 передаются в оптических каналах спектром 50 ГГц на расстояние до 50 км.

#### 7.2 Частотный план оптических каналов

Самым важным параметром в технологии СМ и ПСМ (WDM и DWDM) является спектральное расстояние между оптическими соседними каналами. Международный союз электросвязи ITU-Т утвердил частотный план с равномерным частотным расстоянием между соседними каналами по 100 ГГц  $(\Delta \lambda \approx 0.8$  нм) (см. табл. 7.1), кроме одного – 500/400 ГГц. Равномерное распределение каналов позволяет оптимизировать работу волновых перестраиваемых лазеров и других устройств. конвертеров, Возможно объединение нескольких оптических каналов по 100 ГГц для формирования более широкополосных каналов по ОМОВ старой прокладки или при использовании в ВОСП лазеров со сравнительно широкой полосой частот их излучения.

Реализация той или иной сетки частотного плана во многом зависит от трех основных факторов: типа используемых КВОУ (на кварцевой или фтороцирконатной основе); скорости передачи на канал (2,5 Гбит/с для СТМ-16 или 10 Гбит/с для СТМ-64); влияния нелинейных эффектов. Указанные факторы тесно взаимосвязаны. Например, для сетки из 100 ГГц с увеличением полосы частот сигнала минимально допустимое отношение с/ш также возрастает. Так, для канала СТМ-64 оно на 4...7 дБ выше, чем для СТМ-16. Следовательно, нелинейность коэффициента усиления эрбиевого КВОУ сильнее ограничивает регенерационные участки для оптических каналов СТМ-64, чем для каналов СТМ-16 и меньшей скорости, когда можно использовать практически всю зону усиления такого КВОУ (1530...1565 нм), несмотря на нелинейность.

Перспективным (рек. G.694.1) является интервал между соседними каналами 50 ГГц ( $\Delta\lambda \approx 0,4$  нм) центральные частоты оптических каналов по 50 ГГц определяются по формуле 193,1 + 0,05 *m*, ТГц, где *m* – целое положительное или отрицательное число.

Частота,	Интервал				Длина		
	110ГГп	200ГГп	400 ΓΓιι	500/400	<u>600 ГГн</u>	1000 ГГн	волны, нм
ΤГц	110114			ГГи	(только	(только	
				(только	б каналов)	4 канала)	
				8 каналов)		, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	
196,1	•	•					1528,77
196,0	•						1529,55
195,9	•	•					1530,33
195,8	•						1531,12
195,7	•	•					1531,90
195,6	•						1532,68
195,5	•	•			•	•	1533,47
195,4	•						1534,25
195,3	•	•		•			1535,04
195,2	•						1535,82
195,1	•	•					1536,61
195,0	•						1537,40
194,9	•	•			•		1538,19
194,8	•			•			1538,98
194,7	•	•					1539,77
194,6	•						1540,56
194,5	•	•				•	1541,35
194,4	•						1542,14
194,3	•	•		•	•		1542,94
194,2	•	•					1545,75
194,1	•	•					1544,55
194,0		•	•	•			1546.12
193,9	•	•	•	•			1546.92
193,0	•	•	•		•		1547.72
193.6	•	•	•				1548 51
193.5	•	•	•			•	1549.32
193.4	•			•			1550.12
193.3	•	•	•				1550.92
193,2	•						1551,72
193,1	•	•	•		•		1552,52
193,0	•			•			1553,33
192,9	•	•	•				1554,13
192,8	•						1554,94
192,7	•	•	•				1555,75
192,6	•						1556,75
192,5	•	•	•	•	•	•	1557,36
192,4	•						1558,17
192,3	•	•	•				1558,98
193,2	•						1559,79
192,1	•	•		•			1560,61
Пр	имечание.	Точками у	казаны це	нтральные час	тоты.		

# Таблица 7.1 Частотный (волновой) план каналов(G.692, G.694.1)

Более плотный частотный план по 50 ГГц на канал позволяет более эффективно использовать зону усиления ВОУ, однако ему присущи и недостатки:

– с уменьшением межканальных интервалов возрастает влияние эффекта четырехволнового смешения (см. п. 9.3), что ограничивает длину регенерационного участка при использовании ВОУ;

– малое межканальное расстояние ограничивает, казалось, возможность использования СТМ-64 из-за перекрытия спектров соседних каналов;

– возрастают требования к перестраиваемым лазерам, мультиплексорам и другим компонентам, что в свою очередь приводит к увеличению их стоимости.

Однако к настоящему времени методом спектрального мультиплексирования с применением внешней модуляции по интенсивности и кода Рида–Соломона указанные проблемы успешно решены, вплоть до размещения в оптических каналах по 50 ГГц цифровых потоков СТМ-256 (40 Гбит/с). Таким путем достигнута максимальная пропускная способность 7 Тбит/с (см. п. 10).

Для дальнейшего увеличения пропускной способности ВОСП СРК были освоены также дополнительные диапазоны длин волн всеволнового ОМОВ:

O (original) – 12601360 нм;	C (conventional) – 15301565 нм;
E (extended) – 13601460 нм;	L (long) – 1565…1625 нм;
S (short) – 14601530 нм;	U (ultra-long) – 16251675 нм.

# 7.3 Волоконно-оптические системы передачи с разреженным спектральным мультиплексированием

К настоящему времени проложено большое количество ОК на основе стандартных ОМОВ (G.652). В связи с этим в густонаселенных районах, больших городах возникает необходимость организации больших потоков информации с возможностью оперативного изменения трафиков и маршрутизации на сетях связи. Эта проблема может решаться с помощью разреженного (грубого) спектрального мультиплексирования (PCM), (CWDM – Coarse WDM), при котором интервал между оптическими каналами равен нескольким стандартным оптическим каналам по 100 ГГц (см. план частот).

Утвержден план частот для РСМ, (см. табл. 7.2), в котором спектр оптических каналов составляет 20 нм. Частным случаем РСМ является мультиплексирование третьего (1550 нм) окна прозрачности одной ВОСП-ОК при занятости второго (1310 нм) окна другой ВОСП-ОК или наоборот. При этом для систем РСМ не нужны элементы со столь жесткими требованиями, как для систем СМ/ПСМ с каналами 100/50 ГГц, что повышает гибкость их применения.

Скорость и дальность передачи в каналах РСМ, организованных по ОК старой прокладки на основе стандартных ОМОВ, определяются измерениями дисперсии и затухания в них на этапе проектирования ВОСП РСМ. По результатам измерений определяются требования к лазерам в проектируемых ПОМ (ширине спектральной линии их излучения, центральной длине волны и др.).

1270	1330	1390	1450	1510	1570
1290	1350	1410	1470	1530	1590
1310	1370	1430	1490	1550	1610

Таблица 7.2 План центральных длин волн РСМ по 20 нм (рек. G. 694.2)

#### 7.4 Характеристики серийных ВОСП СРК

1997 Начиная с года, началось широкое внедрение ВОСП co спектральным разделением оптических каналов. В настоящее время аппаратуру ВОСП СРК производят все ведущие компании мира: Lucent Technologies (США), Siemens (Германия), NEC (Япония), Nortel Networks (Канада), ALCATEL, ECI (Израиль), Хуавей (Китай), IRG (Россия) и др. Оборудование любого изготовителя имеет практически одинаковые параметры и оформление, отличается только оптическим спектром, количеством мультиплексируемых оптических каналов. Основное внимание сосредоточено на оптических каналах магистральных ВОСП СРК, предоставляемых оптическим сетям доступа. Эта проблема решается путем увеличения длины пассивных кабельных участков оптического тракта с помощью использования рамановского усиления в рабочем волокне и уменьшения за счет этого количества промежуточных ВОУ, а также применения предварительной коррекции ошибок эрбиевых (FEC) путем введения избыточности в информационный цифровой код. При этом существенно увеличивается длина регенерационного участка, что значительно снижает стоимость оптического канала ВОСП СРК.

Системный уровень некоторых ВОСП СРК отображен в таблице 7.3. Все приведенные в этой таблице ВОСП СРК поддерживают основные сервисы – IP, ATM, SDH и др.

# Таблица 7.3 Техничнеские характеристики ВОСП СРК

Тип системи (ПСМ или РСМ)	Компания призводи- тель	Количество оптических каналов	Диапазон длин волн, нм	Интервал между соседними оптическими каналами	Линейная скорость передачи
1626 Light Manager	Alcatel	96 (192)	1530–1570	50 ГГц (0,4 нм)	100 Мбит/с 2,5 Гбит/с, 10 Гбит/с
1696 Metro Span	Alcatel	32	1530–1560	100 ГГц (0,8 нм)	100 Мбит/с 2,5 Гбит/с, 10 Гбит/с
1696 Metro Span Compact	Alcatel	8	1530–1560	100 ГГц (0,8 нм)	100 Мбит/с 2,5 Гбит/с, 10 Гбит/с
1692 Metro Span Edge	Alcatel	8	1470–1610	2500 ГГц (20 нм)	100 Мбит/с 2,5 Гбит/с, 10 Гбит/с
XDM (ПСМ <sup>1</sup> )	ECI	80	1529–1561 1570–1603	100 ГГц (0,8 нм)	2,5 Гбит/с 10 Гбит/с
XDM (PCM <sup>1</sup> )	ECI	16	1291–1610	2500 ГГц (20 нм)	2,5 Гбит/с
Common Photonic Layer (CPL) <sup>2</sup>	Nortel	ПСМ-36 ПСМ-72	С-диапазон	100 ГГц (0,8 нм) 50 ГГц (0,4 нм)	10 Гбит/с
OPTera Metro 5200 OPTera Metro	Nortel Networks	ПСМ-32 РСМ-8	ПСМ C+L 1528,77– 1605,73 РСМ S+C+L	200 ГГц (1,6 нм) 2500 ГГц (20нм)	10 Гбит/с 2 5 Гбит/с
5100	~.		1470–1610		2,3101110
SURPASS 7500	Siemens	До 160 Л. 160	1520–1610 1528,77–	100 и 50 ГТц	160 × 101 бит/с
SURPASS 7540	Siemens	До 160	1607,47	5011ц	12,51 оит/с
SURPASS 7540C	Siemens	До 80	1537,39– 1563,86	50 ГГц	2,5 Гбит/с
SpectraStream 128 PCM- система	Optelecom	18 длин волн	1270–1450	20 нм	Нет данных
Система "ПУСК" ПСМ- система	НТО- ИРЭ- "Полюс"	8 длин волн 10 Гбит/с (до 160 длин волн)	1530–1605	200 ГГц (50 ГГц)	8 кан.×10 Гбит/с (до 160 кан.х10 Гбит/с)
Система "ПУСК-М" ПСМ-система	НТО- ИРЭ- "Полюс"	12 длин волн 10 Гбит/с	1548–1562	100 ГГц	12 кан.х10 Гбит/с

#### Примечания:

1 Платы оборудования ПСМ встраиваются в линейку оборудования XDM – 400/500/1000/2000, а платы оборудования PCM – в линейку оборудования XDM – 100/200. 2 В оборудовании CPL используется перестраиваиемая частотно-фазовая модуляция (чирпинг), который может изменяться в зависимости от расстояния между транспондерами, типа OK, величин нелинейных явлений и др. Использование управляемой модуляции позволяет полностью отказаться от применения модулей компенсации дисперсии. В таблице 7.4 приведены более полные технические характеристики одной из ВОСП СРК, использующей частотный план 100/50 ГГц, производства фирмы Ciena Corp. (модель Multi Wave Sentry 4000). Аналогичными являются технические характеристики ВОСП СРК других фирм изготовителей.

#### *Таблица 7.4.* Технические характеристики ВОСП СРК модели Multi Wave Sentry TM 4000

Наименование	Значения
Системнь	ий уровень
Емкость, Гбит/с	100 (40 каналов х 2,5 Гбит/с)
Формат	OC-48/(STM-16)/OC-48 c/STM-16c
Частотный план	50 ГГц
Возможные конфигурации	5 пролетов х 25 дБ (500 км)
	2 пролета х 33 дБ (240 км)
Системная частота появления ошибок (BER)	меньше 10 <sup>-15</sup>
Канальные	интерфейсы
Формат	Короткие/промежуточные дистанции
	СТМ-16/G.957. L.16 и S.16.1,
	внутриофисные приложения
Уровень входного сигнала, дБм	От -18 до -3
Уровень выходного сигнала, дБм	$-5 \pm 0,5$
Длина волны вводимого излучения, нм	12501600
Сетевое у	правление
Система управления	WaveWatch <sup>TM</sup> производства CIENA по
	SNMP или TMN
Стандартный интерфейс	VT 100 <sup>тм</sup> , асинхронный RS-232, удаленный
	доступ через Telnet, ITU < TMN, TL-1,
	SNMP
Мониторинг работоспособности каналов	Канальные оитовые ошиоки через ВІ
	заголовка SDH, контроль оптическои
	мощности в каждом канале
Улаленные интерфейсы	RS-422/X.25 (TL-1 интерфейс), IP/802.3
	yepes 10 Base-T
Оптический служебный канал	2,048 Мбит/с на длине волны 1625 нм
Характеристи	ки по питанию
Напряжение питания, В, постоянный ток	От минус 48 до минус 58
Потребляемая мощность при 40 каналах, Вт	800 (типичное), 925 (максимум) – стойка 1,
	1000 (типичное), 1250 (максимум) – стойка 2

## 7.5 Компоненты ВОСП СРК

Компонент ВОСП – это изделие оптики, оптоэлектроники или оптикомеханическое изделие, являющееся частью ВОСП, которое может быть выделено как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации, и предназначенное для выполнения одной или нескольких функций по формированию, передаче, распределению (объединению), преобразованию и обработке оптических сигналов. Компонентами ВОСП-ОК являются: ПОМ, ПРОМ, ОВ и ОК, РОС, направленные ответвители, оптические вентили, полупроводниковые и волоконные оптические усилители, оптические фильтры и др. Дополнительно к перечисленному, к компонентам ВОСП СРК относятся: транспондеры, оптические мультиплексоры/демультиплексоры и оптические мультиплексоры ввода/вывода (вывода более мелких цифровых потоков из/в более крупные линейные оптические сигналы в промежуточных пунктах транспортной сети связи, оптические фильтры и др.

К компонентам ВОСП СРК можно отнести и некоторые сетевые оптические устройства: коммутаторы оптических каналов, конвертеры канальных оптических сигналов, циркуляторы и др.

## 7.5.1 Оптический транспондер

Это устройство предназначено для изменения нестандартных оптических несущих длин волн мультиплексируемых оптических сигналов на передаче, удовлетворяющих рекомендациями G.957, в соответствующие оптическим каналам плана частот G.694.1 и снова, в случае необходимости, на приеме (см. рис. 7.1). Транспондеры – набор последовательно соединенных пар ПРОМ и ПОМ, количество которых равно количеству мультиплексируемых оптических сигналов одноканальных ВОСП-ОК.

Выходы транспондера на передающем конце включаются на соответствующие входы оптического мультиплексора. Для каждого из оптических каналов транспондер содержит на входе ПРОМ, детектирующий цифровой оптический сигнал на произвольной длине волны, соответствующей G.957, в электрический, который потом модулирует в ПОМ оптическую несущую длину волны, соответствующую одному из оптических каналов плана частот по 100 ГГц или по 50 ГГц. Набор транспондеров (ПРОМ + ПОМ) формируется по количеству оптических каналов на стойке.

В таблице 7.5 приведены некоторые основные характеристики одного из набора транспондеров.

Параметр	Значение
Диапазон входных длин волн, нм	12201600
Диапазон мощностей входных сигналов, дБм	-15+3
Диапазон выходных длин волн, нм	15301560
Точность установки длины волны, нм	0,1
Ширина спектральной линии (макс.), нм	0,3
Выходная мощность, дБм	0+1
Вносимое затухание (типовое), дБ	10
Скорость передачи данных, Гбит/с	2,488 (OC-48/STM-16)
Емкость стойки	До 6-ти транспондеров +2 блока питания
Рабочая температура, °С	065
Влажность, %	085

Таблица 7.5 – Технические характеристики стойки транспондеров
Некоторые транспондеры могут дистанционно, программно или вручную перестраиваться на одну из четырех длин волн. Для обеспечения защиты каналов на уровне ПСМ, а также изменения конфигурации сети существует возможность использования в транспондере встроенного оптического коммутатора оптических каналов.

Возможно как локальное, так и дистанционное управление параметрами транспондера: переключение резервный транспондер, изменение на конфигурации сервисов (все варианты SDH, Ethernet, ATM, IP, PDH) и др. Транспондер может поддерживать предварительную коррекцию ошибок (FEC – Forward Error Correction), автоматическое отключение лазера (в случае, например, несанкционированного доступа), защиту оптических каналов путем отключения за время меньше или равное 3 мс, перевод каналов на резерв в течение меньше или равное 50 мс и др. Некоторые транспондеры дают автоматической перенастройки возможность его В зависимости OT оборудования конечного пользователя (протокола): автоматической настройки скорости передачи от 50 Мбит/с до 2,7 Гбит/с; центральной длины волны канала, регенерации и усиления входного сигнала в режиме 2R- без ресинхронизации, а в режиме 3R- с ресинхронизацией. В транспондерах некоторых фирм эти функции совмещены и могут выполняться по команде оператора.

### 7.5.2 Оптические мультиплексоры/демультиплексоры

Оптический мультиплексор (OM) – пассивное линейное устройство, объединяющее пространственно разделенные оптические информационные сигналы плана частот, переносимые оптическими несущими  $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_m$ , из отдельных ОМОВ в один групповой линейный оптический сигнал (ГЛОС) с общим направлением в одном ОМОВ спектром  $\lambda_{1+2+...+m}$ .

Благодаря линейному преобразованию сигналов и принципу взаимности это же устройство способно выполнять обратную функцию оптического демультиплексирования (ОД) и обеспечивать вывод оптических сигналов  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , ...,  $\lambda_m$  в отдельные волокна из группового линейного оптического сигнала  $\lambda_{1+2+...,+}\lambda_m$ , представленного множеством канальных сигналов, распространяющихся по одному волокну.

По характеру решаемой задачи ОМ можно разделить на два типа: малоканальные (не более 4-х) и многоканальные (более 4-х, как правило, кратные 4).

### 7.5.2.1 Малоканальные ОМ/ОД

Этот тип ОМ/ОД основан на многослойных диэлектрических структурах (МСД), толщиной слоя от 0,025 до 0,5 $\lambda$ , наносимых на торец градиентного ОВ или градиентно-стержневой линзы, скошенных под углом 30... 45<sup>°</sup> или 90<sup>°</sup>. На рис 7.4 представлены возможные схемы построения таких ОМ/ОД,

использующих изменение углового отклонения лучей в градиентно-стержневых линзах (ГСЛ), а также отражение лучей от границ сопряжения таких ГСЛ с МСД, указанных утолщенными линиями.

Прохождение электромагнитных волн сквозь МСД рассмотрено в [2]. Подбором материалов и толщин слоев в МСД можно выбрать волновую зону прозрачности для длины волны  $\lambda_1$  и ширину этой зоны, в то время как для длины волны  $\lambda_2$  МСД будет отражающем зеркалом и наоборот. МСД обладают малыми потерями, но имеют низкую избирательность. В то же время при достаточно большом числе слоев коэффициент отражения может быть подобран для некоторой длины волны как угодно близким к единице. В большинстве случаев такие ОМ/ОД имеют следующие основные технические характеристики: рабочие (центральные) длины волн 1305±0,005 нм; 1552 ±0,005 нм; 980 нм и 1480 нм; вносимые потери меньше либо равны 0,4 дБ; перекрестное затухание более 30 дБ. Мультиплексоры этого типа широко применяются в малоканальных ВОСП СРК и КВОУ.



Рис. 7.4. ОМ/ОД на основе угловой дисперсии и МСД

Для мультиплексирования OB двумя системами передачи по одной во втором и третьем окнах его прозрачности используются направленные ответвители (HO) на связанных световодах, обладающие спектральными свойствами, принцип работы которых описан в [2]. С помощью таких HO возможно реализовать спектральное объединение и разделение двух систем передачи как в оконечных (рис. 7.5, а, б), так и промежуточных (рис. 7.5, е) пунктах (спектральный доступ). По таким схемам можно организовать как в однонаправленном, так и во встречном режимах передачу оптических PCM сигналов с разделением их направленными ответвителями в местах регенерации. Ввиду низкой крутизны характеристик НО в области расфильтровки такие схемы непригодны для организации ПСМ в третьем окне прозрачности.



Рис. 7.5. Схемы ОМ/ОД на основе направленных ответвителей со спектральными свойствами

7.5.2.2 Многоканальные ОМ /ОД

Оптические мультиплексоры/демультиплексоры такого типа основаны на интерференции оптических лучей, дифрагированных на дифракционных решетках, описанных в [2], или их модификациях (набор ОМОВ или полосковых световодов различной длины) со сравнительно небольшим числом интерферирующих лучей с большой постоянной разностью фаз между ними при расстоянии между спектральными каналами 0,4...1,6 нм.

Наиболее наглядной модификацией дифракционной решетки может служить набор полосковых световодов разной длины на подложке (рис. 7.6, а) и на волокнах (рис. 7.6, б), уложенных на плоской основе, обеспечивающих на выходе одинаковый сдвиг фаз между лучами, исходящими из соседних световодов.



Рис. 7.6. Модификация дифракционных структур для оптических мультиплексоров/демультиплексоров

В результате интерференции таких лучей получаются разделенными в плоскости главные максимумы интенсивности излучения на разных длинах волн (рис. 7.6, в) при падении широкополосной плоской волны на вход этих устройств (см. подробнее интерференцию лучей на решетках в [2]).

Типовая схема мультиплексора/демультиплексора С зеркальным отражателем показана на рис. 7.7, а. Рассмотрим его работу в режиме демультиплексирования. Приходящий групповой оптический линейный мультиплексный сигнал со спектром  $\lambda_{1+2+m}$  попадает на центральный входной порт. Затем этот сигнал проходит через волновод-пластину, дифрагируя на молекулах стекла В ней, распределяется ПО множеству световодов, представляющих дифракционную структуру. По-прежнему в каждом из световодов сигнал остается мультиплексным, а каждый спектральный канал  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ ) остается представленным во всех световодах. Далее происходит поля сигналов зеркальной поверхности, интерференция отражение ОТ отраженных И падающих полей в волноводе-пластине и образование разнесенных интерференционных максимумов пространственно интенсивности, соответствующих разным каналам (λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub>, ..., λ<sub>m</sub>). Геометрия волновода-пластины, В частности расположения выходных световодов дифракционной структуры рассчитываются так, чтобы интерференционные главные максимумы совпадали с выходными полюсами (рис. 7.7, в). Мультиплексирование происходит обратным путем.

Другая реализация оптического мультиплексора базируется не на одной, а на паре волноводов-пластин (рис. 7.7, б). Принцип действия такого устройства аналогичен предыдущему, за исключением того, что здесь для фокусировки ( $\Delta n \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ ) и интерференции используется дополнительная пластина-двойник, повернутая на 180 град относительно первой.





Рис. 7.7. Типовые схемы ОМ/ОД: а – с зеркальным отражателем; б – на основе двух волноводов-пластин; в – общий вид волновод-пластины; г – мультиплексор ввода/вывода; д – общий вид 32-канального терминального оптического мультиплексора

Групповой линейный сигнал  $\lambda_{1+2+...+m}$ , приходящий на один из центральных входных портов волновода-пластины 1, дифрагируя в ней на молекулах стекла, как и в предыдущем устройстве (см. рис. 7.7, а), распределяется по множеству световодов, соединяющих ее с волноводом-пластиной 2. Длины и радиусы изгибов этих световодов различаются так, чтобы разность фаз между соседними световодами оставалась постоянной. Для этой цели необходима подстройка, которая проще всего реализуется подстройкой поляризации поля. На рис. 7.7, б, г жирной линией отображена полуволновая кварцевая кристаллическая пластина, главная ось которой размещена под углом 45 град к поверхности световодов, которая преобразует направление поляризации ТЕ- и TH- волн, а также согласует эффективные показатели преломления этих волн, т. е. уравнивает время распространения указанных волн в каждой из половинок ОВ, расположенных между волноводами-пластинами для получения наиболее эффективной картины интерференции в пластине-волноводе 2. В каждом из ОВ, соединяющих пластины 1 и 2, сигнал остается мультиплексным, но с постоянным сдвигом фаз в соседних ОВ. В пластине-волноводе 2 происходит интерференция поступающих из ОВ полей и образование пространственно разнесенных интерференционных главных максимумов интенсивности, соответствующих разным каналам ( $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_m$ ).

Геометрия волновода-пластины 2, в частности расположения выходных CB (рис. 7.7, в), рассчитываются так, чтобы интерференционные максимумы совпадали с выходными портами. На рис. 7.7, в представлена волновод-пластина с указанием размеров световодов в пластине: длины отростков для подсоединения волоконных световодов-портов h = 6,5 мкм; ширина световодов

w = 4,5 мкм; расстояние между вводными световодами a = 20 мкм; длина дисперсионного элемента p = 6,1 мм. Материал подложки – кремний  $(n_2)$ , материал световодов – легированное кварцевое стекло с  $n_1 = 1,469$  и  $\Delta n = n_1 - n_2 = 0,015$ .

Указанные устройства работают в линейном режиме. Следовательно, если на выводные порты волновода-пластины 2 (см. рис. 7.7, б) подвести сигналы от нескольких ВОСП-ОК на длинах волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , ...,  $\lambda_m$ , то поля этих сигналов, интерферируя между собой, образуют мультиплексный линейный сигнал  $\lambda_{1+2+...+m}$ , который будет направлен во входной порт волноводапластины 1. Общий вид 32 канального терминального оптического мультиплексора представлен на рис. 7.7, д.

### 7.5.2.3 Оптические мультиплексоры ввода/вывода

Рассмотренные устройства мультиплексоров/демультиплексоров – двустороннего действия. По этой причине, с целью обеспечения ввода/вывода сигналов на входе и на выходе волноводов-пластин, делается одинаковое число портов (полюсов) (см. рис. 7.7, г). Такое устройство ОМ/ОД можно использовать в качестве мультиплексора ввода/вывода в определенном пункте транспортной сети со спектральным мультиплексированием. Ввод и вывод оптических каналов по схеме рис. 7.7, г осуществляется на соответствующих портах слева и справа от волноводов-пластин 1 и 2. Для организации транзита оптических каналов, например канала  $\lambda_1$ , необходимо соединить оптическим шнуром (пигтейлом) одноименные порты  $\lambda_1$  на входе и выходе волновод-пластин 1 и 2 соответственно.

Мультиплексоры/демультиплексоры вносят большое затухание в канальный сигнал, которое достигает иногда 10...12 дБ. Из-за этого возникает необходимость установления оптического усилителя перед и (или) после мультиплексора.

Приведем некоторые параметры ОМ/ОД ввода/вывода на 16 оптических каналов со спектральным разрешением 200 ГГц в области спектра 25,6 нм. Вносимое затухание волокно-волокно 5±2 дБ, переходное затухание между каналами 35 дБ. Количество входных/выходных каналов 16/16. Общий размер устройства 4,2х1,7 см.

При когерентных условиях передачи ПСМ сигналов и гетеродинном приеме ввод и вывод сигналов одной системы передачи в промежуточном пункте (спектральный доступ) можно организовать по схеме рис. 7.5, в путем гетеродинной подстройки на приеме к одному из оптических каналов, а оптическая несущая ПОМ на передаче в точке доступа должна соответствовать данному оптическому каналу плана частот.

По схеме рис. 7.5, в можно осуществлять вывод оптических сигналов из одного из оптических ПСМ каналов, используя ПРОМ прямого детектирования, как более экономичный по сравнению с гетеродинным ПРОМ. Однако для этого на входе в ПРОМ прямого детектирования необходимо

включать оптический полупроводниковый усилитель Фабри–Перо, полоса частот усиления которого равна частотному расстоянию между соседними продольными модами ЛД (1...5 ГГц) и перестраивается в спектре до 800 ГГц. Следовательно, такой полупроводниковый оптический усилитель используется в роли перестраиваемого полосового оптического фильтра. Поместив такой же усилитель Фабри–Перо на выходе ПОМ по схеме рис. 7.5, в, можно осуществить ввод сигналов в необходимый оптический канал ВОСП СРК.

Реализованные ОМ/ОД на количество оптических каналов больше 4 на основе волоконных дифракционных структур, рассмотренные выше, с целью стабилизации их параметров снабжены кондиционерами температуры двух типов: с подогревом и с охлаждением. При первом типе температура дифракционной структуры с точностью  $\pm(1...2)$  °С поддерживается на уровне 100 °С, при втором – на уровне 25 °С с помощью микрохолодильника Пельтье. Энергетические характеристики кондиционеров таких ОМ/ОД приведены в таблице 7.6. Оптические характеристики некоторых мультиплексоров/ демультиплексоров представлены в таблице 7.7.

	= = = = = = = = = = = = = = = = = = =		
Параметр	Кондиционер температуры		
	подогреваемого типа	охлаждаемого типа	
Потребляемая мощность	меьше 3 Вт, 5 В постоянного	меньше 5Вт, 5 В постоянного	
	тока	тока	
Сопротивление	138 Ом на 100 °С	10 кОм на 25 °С	
терморезистора			
Температура	070	060	
окружающей среды, °С			

*Таблица 7.6.* Характеристики кондиционеров температуры оптических мультиплексоров/демультиплексоров

Оптический мультиплексор ввода/вывода может быть реализован на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР), представляющей оптический интерферометр, встроенный в волокно. Волокно, легированное GeO<sub>2</sub>, может изменять свой показатель преломления под воздействием ультрафиолетового света. Если облучить такое волокно ультрафиолетовым излучением с определенной пространственной (продольной) периодичностью, то волокно превращается в своего рода дифракционную решетку. Иначе говоря, это волокно будет практически полностью отражать свет определенного, наперед заданного диапазона длин волн, и пропускать свет всех остальных длин волн (на рис. 7.8 представлено отражение  $\lambda_1$ ).

ВБР в последнее время стали использоваться в устройствах ОМ/ОД ввода/вывода вместе с интерферометрами Маха–Цендера (рис. 7.8, а). ВБР в плечах интерферометра располагаются со сдвигом по фазе так, чтобы отраженные от них волны  $\lambda_1$  синфазно суммировались в точке "вывод  $\lambda_1$ " и противофазно гасились в точке "ввод  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,...,  $\lambda_N$ ". Волна  $\lambda_1$  справа на рис. 7.8, а, разделяясь в х-разветвителе пополам, отражается от ВБР в плечах

интерферометра так, что обе половины волны суммируются синфазно в точке "вывод  $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N$ " и противофазно в точке "ввод  $\lambda_1$ ".

Параметры	Величина	Примечания
Диапазон длин волн, нм	15001600	Точность < ±0,05
Количество каналов	8, 16, 24, 32, 40, 48,	
Частотный интервал между	0,4; 0,8; 1,6; (50, 100, 200	Соответствует сетке
каналами, нм	ГГц)	частот 1ТИ-Т
Вносимые потери, дБ	меньше 6 (волоконный тип)	На уровне 3 дБ
	меньше 9 (полосковый тип)	центральной длины
		волны
Ширина полосы	30 % канального интервала	На уровне 1 дБ
(волоконный тип)	60 % канального интервала	На уровне 3 дБ
Ширина полосы	50 % канального интервала	На уровне 1 дБ
(полосковый тип)	75 % канального интервала	На уровне 3 дБ
Изоляция между соседними	меньше -39	-
каналами, дБ		
Поляризационно-зависимые	меньше 0,5	На уровне 3 дБ
потери, дБ		центральной длины
		волны с РС разъемом
Обратные потери, дБ	больше 35	На уровне 3 дБ
		центральной длины
PROT		волны с РС разъемом
8600		ввод λ1
$\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_N$		
	PED	$\sim$
	DDF	$\square$
	$\setminus$ /	
вывод $\lambda_1$		
	$\land$	вывод
	х-разветвители	
a)	-	$\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_N$

*Таблица 7.7.* Оптические характеристики мультиплексоров/демультиплексоров на основе световолных структур





Всеволновая волна на рис. 7.8, б полностью проходит через левый циркулятор и ВБР, кроме длины волны  $\lambda_1$ , которая отражается ВБР и направляется в точку "вывод  $\lambda_1$ ". Введенная волна  $\lambda_1$  в правый циркулятор отражается от ВБР и направляется на "вывод  $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N$ ".

Центральная длина волны на основе регулярной ВБР определяется ее периодом, а полоса пропускания – обратнопропорциональна длине (количеству периодов решетки). Оба эти параметра зависят от температуры, поэтому такие устройства должны быть помещены в термостат или другое устройство, контролирующее температуру.

### 7.5.2.4 Оптические циркуляторы

Эффект вращения плоскости поляризации Фарадея, рассмотренный применительно к работе вентилей (изоляторов) [2], применяется еще в одном волоконно-оптическом устройстве – оптическом циркуляторе. В отличие от двух портовых оптических вентилей, оптические циркуляторы изготовляются 3- или 4-портовыми, т. е. они могут иметь один вход и два выхода, или два Распределение два выхода. оптического излучения входа И между упомянутыми портами определяется направлением невзаимного распространения. На рис. 7.9, а и б представлены схемы соответственно 3- и 4портовых циркуляторов.



Рис. 7.9. Схемы оптических циркуляторов

Циркулятор, представленный на рис. 7.9, а (Y-циркулятор), обладает следующими свойствами: оптическое излучение (сигнал), входящее в порт 1, проходит к порту 2, однако излучение, введенное в порт 2, не возвращается в порт 1, а проходит в порт 3; излучение, введенное в порт 3, проходит в порт 1, но не проходит в порт 2. Циркулятор такого типа использован в схеме ВОСП, работающей в двухполюсном режиме по одному ОМОВ, представленной на рис. 7.1, д.

Циркулятор, выполненный по схеме рис. 7.9, б, обладает следующими свойствами: оптический сигнал, введенный в порт 1, проходит к порту 2;

сигнал введенный в порт 2, выходит из порта 3; сигнал, введенный в порт 3, проходит в порт 4, а введенный в порт 4 – выходит из порта 1.

Принцип работы оптического циркулятора аналогичен принципу работы вентиля (изолятора).

Оптические циркуляторы имеют следующие характеристики: вносимое затухание меньше 1,2 дБ, изоляция больше 40 дБ, перекрестные помехи менее минус 59 дБ, обратные отражения менее минус 50 дБ, поляризационная чувствительность меньше 0,2 дБ.

# 7.6 Передача и прием групповых линейных оптических сигналов ВОСП СРК

### 7.6.1 Формирование групповых линейных оптических сигналов ВОСП СРК

Функциональная схема передающей части многоканальной ВОСП СРК изображена на рис. 7.10, где, в частности, представлен канальный лазерный излучатель 1 канала К, генерирующий непрерывное излучение на произвольной длине волны  $\lambda_{\kappa}$  из спектра 1220...1600 нм (см. п. 7.5.1).



Рис. 7.10. Функциональная схема передающей части ВОСП СРК

Оптический изолятор (вентиль) 2 в схеме рис. 7.10 предназначен для изоляции обратного оптического потока, возникающего в результате отражений сигнала от канальных модулятора 3, приемного оптического модуля 4 и передающего оптического модуля 6 в стойке транспондеров 5, оптического мультиплексора 7, оптического бустерного усилителя (мощности) 8 и разъемного оптического соединителя 9.

Длины волн канальных ПОМ (слева от транспондеров) могут не соответствовать плану длин волн (частот) таблицы 7.1. Поэтому канальные оптические сигналы детектируются в электрические сигналы в широкополосных канальных ПРОМ 4 в транспондере, которые потом модулируют когерентные оптические несущие частоты, соответствующие плану частот в канальных передающих оптических модулях 6 в транспондере 5. Дополнительные к указанному функциональные возможности транспондера, описанные в п. 7.5.1, условно изображены на рис. 7.10 жирной стрелкой в

пределах обозначения транспондера 5. Точками на рисунке представлены соединения отдельных элементов схемы.

Сформированные таким образом канальные оптические сигналы с выходов транспондеров поступают на входы оптического мультиплексора 7, где формируется оптический групповой линейный сигнал спектром  $\lambda_{1+2+...m}$ , поступающий в ОМОВ через бустерный ВОУ 8 и РОС 9. Бустерный ВОУ необходим для компенсации потерь в оптическом вентиле, транспондере, оптическом мультиплексоре, в разъемных и неразъемных соединениях в волоконно-оптическом тракте, особенно, если следует удлиненный усилительный участок. Такой ВОУ должен обладать широким спектром широкополосных групповых линейных усиления оптических сигналов. направляемых в ОМОВ.

В ВОСП СРК с частотными интервалами между спектральными каналами 100 ГГц, и особенно 50 ГГц, применение прямой модуляции излучений лазеров становится затруднительным из-за чирпинга. При таком методе модуляции рабочая точка на ватт-амперной характеристике лазера поддерживается в заданном положении – чаще всего в начале линейного участка (см. рис. 4.2, б). Стабилизация рабочей точки осуществляется с помощью электронной схемы с петлей отрицательной обратной связи, в которую включается фотодиод, встроенный в корпусе лазера (см. рис. 3.6). Кроме того, постоянной также поддерживается температура лазера не хуже ±1 °С.

В системах передачи ВОСП СРК значительной протяженности (больше или равной 150...180 км) применяется внешняя модуляция излучения, когда с выхода лазера немодулированное излучение направляется на внешний модулятор. Существует несколько типов внешних модуляторов, использующих разные физические принципы: электрооптические модуляторы Фабри–Перо, модуляторы на связанных СВ, на основе интерферометра Маха–Цендера, электроабсорбционные модуляторы (см. п. 4.2...4.5).

Разработчики ВОСП СРК для организации канала служебной связи, телеконтроля и управления приняли длину волны 1510 или 1625 нм. Для этой цели производят лазеры, имеющие следующие параметры: мощность излучения 2 мВт, спектральная ширина 0,1 нм, диапазон длин волн 1505...1515 нм, подавление боковых мод – более 30 дБ, пороговый ток – 8 мА, ток модуляции от 10 до 45 мА, частота модуляции – более 800 МГц.

Зарубежной промышленностью налажено производство полупроводниковых лазеров не только для передачи информации, но и для накачки волоконно-оптических усилителей. Например, российское предприятие NOLATECH выпускает лазеры накачки типа ПОМ-25, имеющее следующие параметры: длина волны излучает 975... 985 нм, спектральная ширина 1...5 нм, выходная мощность излучения 50...100 мВт, пороговый ток от 10 до 20 мА, рабочий ток от 100 до 200 мА. Аналогичные лазеры выпускают и фирмы LASERTRON (США), PIRELLI (Италия), NEC (Япония). Лазеры накачки для длины волны 1480 нм выпускаются с мощностью от 140 до 180 мВт.

#### 7.6.2 Прием оптических сигналов ВОСП СРК

## 7.6.2.1 Демультиплексирование групповых линейных оптических сигналов

Групповой линейный оптический сигнал (ГЛОС), прошедший каскад линейных КВОУ, вместе с остатками излучения их накачки на длине волны  $\lambda_{\rm H1} = 1480$  нм, поступает ослабленным на приемный конец участка регенерации, производится детектирование. Учитывая, что пассивный его где 10...12 дополнительно демультиплексор 6 вносит затухание до дБ. информационные ГЛОС могут усиливаться предварительным ПВОУ 4. Однако перед предварительным ПВОУ необходимо вывести из волоконно-оптического накачки линейных КВОУ ( $\lambda_{H1} = 1480$  нм), что тракта остатки излучения выполняет пространственно-частотный разделительный фильтр 3 (ОФ1) на основе МСД, который необходим и в случае отсутствия предварительного ПВОУ (см. рис. 7.11). Излучения лазеров накачки линейных КВОУ могут модулироваться различными электрическими контрольными частотами с целью контроля технического состояния и качества работы КВОУ по выделенному на приеме и продетектированному остаточному излучению накачки λ<sub>н1</sub>.



Рис. 7.11. Функциональная схема фильтрации шумов и демультиплексирования ГЛОС

На приеме может, в случае необходимости, использоваться предварительный ПВОУ 4, накачиваемый длиной волны накачки λ<sub>н2</sub> = 980 нм.

Если в схеме приема рис. 7.11 нецелесообразно использовать ПВОУ, то широкополосные оптические шумы, возникшие в волоконно-оптическом тракте и поступившие на прием, должны быть удалены оптическим полосовым фильтром с полосой пропускания 1530...1565 нм, реализуемым на основе интерференционных многослойных диэлектрических структур [2] и схематически представленным на рис. 7.12. В таком случае в схеме приема на рис. 7.11 элементы 3 и 4 должны быть заменены одним оптическим полосовым фильтром.



Рис. 7.12. Оптические фильтры на основе МСД: а – неперестраиваемый; б – перестраиваемый

Отфильтрованный от спонтанных шумов и остатков излучения накачки и усиленный (в случае необходимости) ГЛОС разделяется в оптическом демультиплексоре 6 на канальные оптические сигналы, соответствующие частотному плану  $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_m$ , которые по выходным портам оптического демультиплексора поступают на соответствующие приемные устройства 8. Дальнейшая обработка таких канальных оптических сигналов может осуществляться в приемных устройствах по одной из схем: прямого детектирования оптических сигналов или гетеродинного их преобразования и последующего детектирования электрической промежуточной частоты.

Если некоторый оптический канальный сигнал  $\lambda_m$  с выхода оптического демультиплексора 6 подлежит дальнейшей передаче по ВОСП-ОК с нестандартной оптической несущей длиной волны на значительное расстояние, то он должен быть подвергнут транспондированию.

Рассмотрим более детально указанные принципы обработки оптических сигналов на приеме.

### 7.6.2.2 Прямое детектирование канальных оптических сигналов

Принцип такого детектирования и схема ПРОМ рассмотрены подробно в п. 4.6. Дополнительно к рассмотренному следует указать, что ослабленные оптические сигналы в волоконно-оптическом тракте после их разделения в демультиплексоре могут быть усилены в каждом из частотных оптических каналов с помощью полупроводниковых оптических усилителей. Кроме того, из-за шумов оптических усилителей волоконно-оптического тракта на входе ПРОМ необходимо использовать оптический полосовой фильтр, задачей которого является частотное ограничение шумов спонтанного излучения линейных КВОУ, продуктов нелинейных преобразований в ОМОВ, а также защита ПРОМ от проникновения остатков излучения накачки КВОУ. Функцию такого оптического канального полосового фильтра может выполнять оптический полупроводниковый усилитель Фабри-Перо, если спектр частот сигнала не превышает (1...5ГГц), или усилитель бегущей волны, если спектр частот превышает (1...5 ГГц). Вторую фильтрацию шумов осуществляет электрический фильтр нижних частот, включаемый после детектора и

электрических усилителей в ПРОМ (см. рис. 4.6). Такая схема ПРОМ называется *двухфильтровой*.

ПРОМ с Работа прямым детектированием зависит ширины ОТ спектральной линии излучения канального лазера на передаче И широкополосности оптического полосового фильтра. Каждому значению полосы частот канального сигнала соответствует оптимальная ширина полосы пропускания фильтра.

Шумы частотной модуляции (фазовые шумы) расширяют спектр оптического сигнала. Следовательно, чем больше ширина полосы частот оптического сигнала, тем больше должна быть оптимальная ширина полосы пропускания оптического полосового фильтра. Если полоса пропускания фильтра больше оптимальной, приемное устройство регистрирует излишний шум спонтанной эмиссии – и работа системы ухудшается. Снизить влияние этого излишнего шума помогает электрический фильтр, включенный после детектора в ПРОМ. Если же полоса пропускания оптического полосового фильтра меньше оптимальной, то спектр модулированной оптической несущей ограничивается, что приводит к искажению формы сигнала, т. е. к увеличению его дисперсии. Таким образом, полоса пропускания оптического фильтра шире оптимальной менее опасна, чем более узкая. Однако и она заметно снижает чувствительность приемного устройства.

### 7.6.2.3 Гетеродинный прием оптических сигналов ВОСП СРК

*Гетеродинирование* – это преобразование полосы частот модулированных, в частности, оптических колебаний (сигналов)  $\Delta \omega_c$  в электрические колебания промежуточной частоты  $\Delta \omega_n$  на нелинейном элементе (фотодиоде) при воздействии на него колебаний  $\Delta \omega_{\Gamma}$  местного лазерного генератора (гетеродина). В результате смешивания оптических колебаний  $\Delta \omega_c$  и  $\Delta \omega_{\Gamma}$  после детектирования возникают разностные колебания  $\Delta \omega_c - \Delta \omega_{\Gamma} = \Delta \omega_n$ . Величина  $\Delta \omega_n$  для данного приемного устройства постоянна. Поэтому частота  $\Delta \omega_{\Gamma}$  лазерного гетеродина должна перестраиваться так, чтобы разность  $\Delta \omega_c - \Delta \omega_{\Gamma} = \Delta \omega_n$ . Величиного ПРОМ перед ПРОМ с прямым детектированием, на что будет указано ниже.

Рассмотрим функциональную схему гетеродинного ПРОМ одного из каналов, указанную на рис. 7.13.



Рис. 7.13. Структурная схема гетеродинного приема оптических сигналов ВОСП СРК

Групповые линейные оптические сигналы *m*-каналов поступают из ОМОВ на демультиплексор 1, разделяются пространственно на *m* частотных оптических каналов, усиливаются в канальных оптических полупроводниковых предусилителях 2 и поступают со стабильной линейной или медленно меняющейся поляризацией через направленный ответвитель 3 на нелинейный фотодетектор 4. Сюда же подаются колебания  $\Delta \omega_{\rm r}$  местного лазерного гетеродина 10, поляризацией поля ГЛОС. Функцию подстройки поляризации поля сигнала местного гетеродина выполняет поляризационный контроллер 11, принцип работы которого рассмотрен ранее (см. п. 5.3.3).

Электрические колебания  $\Delta \omega_n$  усиливаются в предусилителе 5, основном усилителе 6, ограничиваются по спектру полосовым фильтром 7, демодулируются демодулятором 8 и подаются на решающее устройство 12. Демодуляция сигналов промежуточной частоты  $\Delta \omega_n$ , как и модуляция (формирование на передаче электрического сигнала для модуляции оптической несущей), могут осуществляться по амплитуде, частоте и фазе.

Для обеспечения стабильности частоты генерации местного лазерного гетеродина 10 и удержания значения разностной частоты  $\Delta \omega_n$  в пределах частотной полосы усилителя промежуточной частоты и полосового фильтра 7 используется устройство автоматической подстройкой частоты 9, которое является пиковым детектором, обеспечивающим постоянное напряжение управления частотой гетеродина 10 и АРУ основного усилителя 6.

Излучение лазерного гетеродина, как и лазера ПОМ, должно быть также узкополосным, что делает ПРОМ с гетеродинированием более дорогим, чем ПРОМ с прямым детектированием.

Кратко рассмотрим основные достоинства когерентных ВОСП с гетеродинным приемом.

1 Чувствительность гетеродинных ПРОМ ограничивается только уровнем дробовых шумов излучения местного лазерного гетеродина и превосходит чувствительность ПРОМ прямого детектирования на 20...25 дБ.

- 2 В когерентных ВОСП с гетеродинным приемом может использоваться перспективная техника модуляции/демодуляции по промежуточной полосе частот, в частности ЧМ, ФМ и ФРМ, что улучшает чувствительность ПРОМ.
- 3 Возможность спектрального мультиплексирования/ демультиплексирования с очень точным частотным разделением каналов, вследствие чего эффективно отфильтровывается нежелательный шум из спектра оптического сигнала, ПРОМ становятся менее чувствительными к влиянию мощности широкополосного усиленного спонтанного излучения КВОУ. Следовательно, при этом обеспечивается большая длина межрегенерационного участка, чем при прямом детектировании.
- 4 Высокая спектральная селективность оптического когерентного детектирования дает возможность применять полупроводниковые оптические усилители 2 с улучшенными шумовыми характеристиками.
- 5 Высокая спектральная селективность дает возможность более плотно паковать спектральные оптические каналы, т. е. применять ПСМтехнологию, чем в случае применения технологии прямого детектирования, где для выделения спектрального канала и подавления шумов КВОУ приходится применять оптические фильтры.
- 6 Гетеродинный ПРОМ позволяет, вследствие перестройки частоты местного генератора Δω<sub>г</sub>, обеспечивать выбор и детектирование любого оптического канального сигнала без демультиплексирования всего группового линейного оптического сигнала ВОСП СРК, т. е. осуществлять оптический спектральный доступ к оптическим каналам транспортной сети через направленный ответвитель (см. рис. 7.5, в).

### 7.7 ВОСП с оптическим временным мультиплексированием

Появление и развитие новых видов услуг связи требует не только увеличения информационной емкости, или объема передаваемой информации, но и увеличения скорости передачи, например, о быстро протекающих процессах в реальном масштабе времени. Так, для передачи одного телевизионного сигнала высокой четкости в цифровом виде без сжатия необходимая скорость передачи составляет 994.3 Мбит/с (при сжатии – 135 Мбит/с). Для формирования оптических цифровых потоков высокой скорости передачи используется оптическое временное мультиплексирование (OTDM – Optical Time Division Multiplexing). Высокие скорости необходимы также для формирования цифровых потоков сверхскоростных солитонных ВОСП, когда в одномодовом оптическом волокне создаются специальные нелинейные условия передачи импульсных сигналов (см. п. 9.2 или п. 10.6 в [2]). Вместе с тем оптическое временное мультиплексирование используется и для формирования высокоскоростных цифровых потоков по одномодовым оптическим волокнам в линейном режиме передачи.

Схема реализации метода оптического временного мультиплексирования представлена на рис. 7.14. Импульсный лазер 1 синхронизируется от

эталонного таймера мультиплексируемых электронных систем СЦИ СТМ-N. Поток оптических импульсов от импульсного лазера с длительностью  $\tau$  и периодом следования T через оптический усилитель 2 подается на оптический разветвитель 3, пространственно разделяющий по энергии световой поток лазера, например восемь равных частей, каждая из которых поступает на входы оптических модуляторов 4...11. Электрические сигналы СТМ-N модулируют оптические импульсы в соответствующих оптических модуляторах 4...11. С выхода каждого из модуляторов промодулированные импульсы проходят через соответствующие отрезки оптических волокон, играющих роль оптических линий задержки.



Рис. 7.14. Функциональная схема ВОСП ВРК

При этом время задержки с выхода первого модулятора 4 выбирается очень малым, таким, что его можно считать равным нулю. После выхода модулятора 5 оптические импульсы задерживаются на Т/8 и т. д., а после модулятора 11 – на время 77/8. С выходов всех оптических линий задержки потоки импульсов поступают на входы сумматора 12 (это такое же устройство, как и 3, но включенное обратно), с выхода которого объединенный групповой поток после усиления в волоконно-оптическом усилителе 13 подается в линию, т. е. в одномодовое волокно оптического кабеля. С выхода линейного ОМОВ оптический групповой сигнал усиливается усилителем 14 и подается на оптический временной демультиплексор 15, синхронизируемый устройством 16. Таким образом, в описанной схеме методом оптического временного мультиплексирования передаются, например, цифровых восемь информационных потоков 10 Гбит/с (СТМ-64) по одномодовому ПО

оптическому волокну в диапазоне длин волн усиления эрбиевого КВОУ 1530...1560 нм. В системе использованы полностью оптические элементы – лазер, оптические разветвлители, модуляторы Фабри–Перо, выполненные на основе электрооптических кристаллов из LiNbO<sub>3</sub>, оптические усилители и оптические линии задержки. Это полностью укладывается в перспективную концепцию создания полностью оптических сетей и систем передачи. Такая волоконно-оптическая система передачи информации со скоростью 80 Гбит/с на расстояние 168 км описана в [15] и показала полную работоспособность при температуре окружающей среды более +50 °С.

Созданы ВОСП ВРК и на другие скорости передачи. В частности, из литературных источников известно о создании ВОСП ВРК с рекордной для этого метода скоростью передачи 1,28 Тбит/с на расстояние 70 км. В этой системе применена фазовая модуляция оптической несущей и компенсация хроматической и поляризационной дисперсий.

перспективной ВОСП Наиболее можно считать c оптимальным формирования группового линейного оптического сочетанием сигнала методами как спектрального, так и временного мультиплексирования. В одном из вариантов такой ВОСП на 4-х длинах волн, т. е.. 4-х спектральных каналах, по 160 Гбит/с. сформированных временным передается методом мультиплексирования. Длина тракта передачи равна 240 км (3×80 км).

### 7.8 ВОСП с оптическим поляризационным мультиплексированием

Оптическое мультиплексирование цифровых сигналов, переносимых различными оптическими несущими, поля которых имеют различные линейные поляризации в поперечном сечении ОМОВ, называется мультиплексированием по поляризации, или поляризационным мультиплексированием (ПМ), (PDM -Multiplexing). Как известно, Polarization Division оптические волокна укладываются в ОК по спиральным линиям. Из-за изгиба в материале ОВ возникает анизотропия диэлектрических свойств. проявляющаяся В двулучепреломлении. В таких ОМОВ поэтому могут распространяться только две взаимно-ортогональные волны – обыкновенная HE<sup>o</sup><sub>11</sub> и необыкновенная HE<sup>e</sup><sub>11</sub> (см. 5.3). Ориентация указанных п. поляризаций определяется выражением (5.10), т. е. соотношением шага спирали p и ее радиуса R. Ориентация поляризаций указанных волн определяет главное условие ввода, например модулированного излучения лазера, являющегося также линейнополяризованным, которое состоит в обязательном совмещении поляризации вводимого в ОМОВ промодулированного излучения лазера с поляризацией одной из взаимно-ортогональных волн HE<sup>o</sup><sub>11</sub> или HE<sup>e</sup><sub>11</sub>, поддерживаемых волокном. Несовмещение поляризаций при вводе порождает поля помех в ортогональной волне во всем спектре частот вводимого излучения.

Кроме сказанного, переносимые оптические сигналы во взаимноортогональных волнах в ОМОВ не должны обмениваться своими энергиями. В работе [16] определены условия (соотношения  $p/4\pi R$ ), при которых взаимноортогональные обыковенная и необыкновенная волны распространяются в OMOB автономно, т. е. без взаимного обмена энергиями переносимых ими оптических сигналов. Спустя два года после опубликования работы [16] в сентябре 2006 года компания NTT (Япония) экспериментально подтвердила такую возможность, объединив поляризационно по 70 спектральных оптических каналов в каждой из двух поляризаций по 7 Тбит/с, и достигла максимальной информационной емкости в 14 Тбит/с.

ПМ позволяет объединять оптические цифровые потоки, полученные и спектральным и временным мультиплексированием. Возможная схема ВОСП ПРК с организацией двусторонней передачи по одному ОМОВ с использованием оптических циркуляторов, представлена на рис. 7.1, д.

### 7.9 Определение длин усилительных и регенерационных участков ВОСП СРК по затуханию и шумам КВОУ

Длина регенерационного участка по шумам при *N* последовательно включенных линейных КВОУ равна

$$L_{\rm pm} = (N+1)L_{\rm y},\tag{7.1}$$

где *L*<sub>v</sub> – длина усилительного участка.

Если на длине регенерационного участка, кроме N линейных КВОУ, включены и бустерный и предварительный квантовые волоконно-оптические усилители, то в этой формуле необходимо заменить N+1 на N-1; если же включен только один – бустерный или предварительный усилитель, то следует заменить множитель N+1 на N.

Затухание на длине усилительного участка  $\alpha L_y$  для каждого оптического канала определяется как разность максимально допустимого уровня сигнала  $p_{\text{maxdon}}$  на выходе і-того КВОУ и минимального допустимого уровня сигнала  $p_{\text{min}}$  на входе (*i*+1)-того КВОУ с учетом затухания  $2a_{\text{poc}}$  в РОС и сварных соединениях  $a_{\text{BB}}$  при их числе *S*, а также запаса энергетического потенциала  $p_3$ 

$$\alpha L_{y} = p_{\max \text{dom}} - p_{\min} - 2a_{\text{poc}} - a_{\text{BB}}S - p_{3}, \qquad (7.2)$$

где  $p_3 = 2...6$  дБ – запас энергетического потенциала на длину *i*-того усилительного участка (величина не нормирована и взята равной для ВОСП-ОК с регенераторами).

Минимальный уровень мощности группового линейного оптического сигнала  $p_{\min}$  на входе (*i*+1)-того КВОУ ограничен уровнем мощности шумов ( $n_0 + 10 \, \lg i - g_i$ ) в этой точке с учетом допустимого значения защищенности (с/ш):

$$p_{\min} = n_0 + 10 \lg i - g_i + (c/\text{III}). \tag{7.3}$$

Если принять величину усиления  $g_i$  равной величине затухания  $\alpha L_y$  на длине усилительного участка (7.2), то, исходя из формул (7.2) и (7.3),

допустимое значение затухания на длине одного из *i*-тых усилительных участков для рассматриваемого оптического канала, принадлежащих участку регенерации с *N* линейными КВОУ, равно или меньше:

$$[\alpha L_y] \le p_{\max \text{don}} - 2a_{\text{poc}} - a_{\text{BB}} S - p_3 - 10 \lg (hf_k) / (10^{-3}) - 10 \lg \Delta f_k - K_{\text{III}} - (c/\text{III}) - 10 \lg N, \quad (7.4)$$

где  $f_k$  – центральная частота канала k;  $\Delta f_k$  – спектр сигнала+шума в этом канале;  $K_{\rm III}$  – коэффициент шума КВОУ (см. п. 6.6) (см. Приложение).

Величина максимально допустимой мощности  $p_{\rm maxgon}$  на передаче на один оптический канал ВОСП СРК с учетом нелинейных явлений (например только четырехволнового смешения) может быть определена по графикам рис. 9.4 для OMOB типа SF, NZDSF и ZDSF. В случае использования в ВОСП СРК специальных волокон NZDSF с увеличенной площадью одномодового распространения A<sub>эф</sub>, например 78; 120; 160 мкм<sup>2</sup>, суммарная максимальная мощность группового оптического сигнала ВОСП СРК, соответственно вводимая в указанные ОМОВ, ограничена значениями 50 мВт (+17 дБм), 200 мВт (+23 дБм) и 500 мВт (+27 дБм) в зависимости от размеров A<sub>эф</sub> в равномерного распределения ee предположении по спектру всех задействованных оптических каналов. В этом случае максимально допустимая мощность на передаче не должна превышать соответственно 50/m; 200/m или 500/т мВт на один оптический канал, где т – количество задействованных каналов в ВОСП СРК.

# 7.10 Определение длины регенерационного участка ВОСП СРК по дисперсии

Протяженность волоконно-оптического тракта для *m*-того оптического канала ВОСП СРК между двумя соседними регенераторами ограничена также суммой хроматической и поляризационной дисперсий, которая определяется в ОК алгебраически (см. п. 5.3.3).

Длина участка регенерации по хроматической дисперсии определяется для *m*-того оптического канала ВОСП СРК по формуле

$$L_{\rm pg} = 1/\left(4\Delta\lambda_m M_{\rm xpm} B_m\right),\tag{7.5}$$

где  $\Delta\lambda_m$  – ширина спектра промодулированной оптической несущей в нм, соответствующая  $\Delta f_m = \Delta f_{Hm} + 2\Delta F_m$ , Гц;  $B_m$  – скорость передачи в *m*-том оптическом канале, бит/с;  $M_{xpm}$  – удельная хроматическая дисперсия в этом же канале, с/км·нм, которая нормируется наклоном кривой в точке нулевой хроматической дисперсии  $\lambda_0$  для данного OMOB ( $\leq$ tg  $\varphi$ , с/км·нм<sup>2</sup>)(см. табл. 5.1). Значение  $M_{xpm}$  для OMOB типа NZDSF с  $\lambda_0$ , расположенной слева (справа) от зоны усиления КВОУ, определяется соответственно в виде

$$(\lambda_m - \lambda_0)$$
 tg  $\phi$ , c/km·hm;  $(\lambda_0 - \lambda_m)$  tg  $\phi$ , c/km·hm;

где  $\lambda_m$  – центральная длина волны канала *m* (см. план частот, табл. 7.1).

Для ОМОВ типа True Wave существует две точки нулевой хроматической дисперсии относительно зоны усиления КВОУ, например: слева  $\lambda_{01} = 1525$  нм и справа  $\lambda_{02} = 1565$  нм с наклонами кривых в этих точках tg  $\varphi_1$ , с/км·нм<sup>2</sup> и tg  $\varphi_2$ , с/км·нм<sup>2</sup>. Тогда значения дисперсии в *m*-том канале относительно  $\lambda_{01}$  или  $\lambda_{02}$  соответственно определяются в виде

 $(\lambda_m - \lambda_{01})$  tg  $\varphi_1$ , c/km·hm;  $(\lambda_{02} - \lambda_m)$  tg  $\varphi_1$ , c/km·hm.

Если по результатам расчета оказывается, что  $L_{pd} < L_{pu}$ , то в процессе строительства ВОЛП необходимо осуществлять компенсацию дисперсии в первую очередь путем группирования строительных длин ОК с ОМОМ типа NZDSF<sup>+</sup> и NZDSF<sup>-</sup> или использовать специальные компенсаторы дисперсии, или, в крайнем случае, сокращать соответствующие длины участков регенерации путем ограничения скорости передачи в каналах.

Длина участка регенерации нормируется ITU-Т по максимально допустимым значениям на оптический канал удельной по спектру дисперсии  $|L_{\rm p}(M_{\rm xp} + M_{\rm H})|$ , пс/нм, которая не должна превышать значений:

10500 пс/нм – для СТМ-16 (2,5 Гбит/с);

16000 пс/нм – для СТМ-64 (10 Гбит/с);

Эти нормы могут быть использованы также и для определения максимально допустимого значения ширины спектра излучения канального ПОМ при заданном значении длины  $L_p$ , например по шумам, как при новом строительстве ВОСП СРК, так и при реконструкции существующих ВОСП.

Длину участка регенерации по шумам  $L_{\rm put}$  также можно максимизировать выбором малошумящих КВОУ ( $K_{\rm ut} \leq 3$  дБ), минимально возможной шириной спектра излучения ПОМ ( $\Delta\lambda_m \leq 0,01$  нм), минимально возможным значением затухания  $\alpha$  в ОМОВ, максимальным значением  $A_{\rm 3\phi}$ , что позволяет увеличить максимально допустимую мощность на передаче и, следовательно, длину усилительных участков и др.

#### 7.11 Компенсация дисперсии на регенерационном участке

Полная дисперсия в ОМОВ в спектре частот произвольного *m*-того оптического канала ВОСП СРК представляется в виде

$$\sigma = \Delta \lambda_m (M_{xpm} + M_{\Pi m}) L_p,$$

где  $\Delta\lambda_m$  – ширина спектра, промодулированной несущей, нм, соответствующая спектру передаваемого оптического сигнала в канале *m*,  $\Delta f_m = \Delta f_{\rm Hm} + 2\Delta F_m$ ;  $M_{\rm xpm}$ ,  $M_{\rm IIm}$  – удельные хроматическая и поляризационная дисперсии соответственно, с/км·нм.

Как следует из рис. 5.3, полная дисперсия, в соответствии с (5.2) и (5.13), может быть по спектру длин волн как положительной, так и отрицательной, в

зависимости от типа применяемого ОМОВ. Поэтому наиболее радикальным путем компенсации дисперсии является использование канальных ПОМ с узкой спектральной линией излучения, гасящей как положительную, так и отрицательную величины дисперсии сигналов.

Минимальное значение ширины спектральной линии излучения лазеров ПОМ обеспечивает также и минимальное значение спонтанных шумов в КВОУ (см. (6.5)), что, в свою очередь, позволяет увеличивать длины  $L_y$  и  $L_{put}$ .

При использовании в ОК одномодовых оптических волокон с положительной хроматической дисперсией во всем диапазоне длин волн передачи сигналов накопленая дисперсия на одном линейном участке может быть скомпенсирована на другом участке линии укладкой строительных длин ОК с отрицательной дисперсией так, чтобы суммарная величина хроматической дисперсии оставалась достаточно малой вдоль всех усилительных участков и стремилась к нулю только в конце участка регенерации, т. е. в месте приема сигнала (см. рис. 7.15). Такое мероприятие обеспечивает также и минимальные нелинейные искажения сигналов, особенно вследствие четырехволнового смешения.



Рис. 7.15. Распределение дисперсии по длине *L*<sub>p</sub> после ее компенсации группированием строительных длин *l*<sub>ст</sub> OK с волокнами типа NZDSF<sup>+</sup> и NZDSF<sup>-</sup>

Поляризационная дисперсия может быть частично минимизирована группированием по длине трансляционного участка строительных длин оптических кабелей с однотипными ОМОВ, но с разными относительно p = 7,77 R шагами их спиральной укладки в ОК, когда знаки поляризационной дисперсии будут противоположными (см. рис. 5.10).

Поляризационная дисперсия, кроме искажения формы оптического импульса, опасна порождением ею межсимвольных искажений независимо от ее знака. Поэтому этот вид дисперсии необходимо поддерживать у нулевых значений вдоль всего волоконно-оптического группового тракта как путем минимизации спектров излучений всех канальных ПОМ, так и особой укладкой ОМОВ по спиральным линиям в строительные длины ОК [9]. При этом удается сделать поляризационную дисперсию ОК как положительной, так и отрицательной (см. п. 5.3.3, рис. 5.10). Минимизировать поляризационную дисперсию в процессе строительства ВОЛП необходимо путем размещения по всей длине линии строительных длин ОК с оптимальной в них укладкой ОМОВ с соотношением p = 7,77 R, когда поляризационная дисперсия минимальна или равна нулю, где p – шаг укладки волокон в ОК по спирали радиуса R. При этом будут обеспечиваться и минимальные межсимвольные помехи, так как при этом соотношении p/Rскорости распространения обыкновенной и необыкновенной волн (сигналов) одинаковы.

Для компенсации хроматической дисперсии могут быть использованы специальные отрезки оптического волокна типа DCF (Dispersion Compensating Fiber) с отрицательной хроматической дисперсией, которая обеспечивается вследствие уменьшенного диаметра его сердцевины. Недостатком таких OB, которые включаются как дополнительные элементы в линию, является увеличение затухания примерно на 30 %.

Перспективным компенсатором хроматической дисперсии является брэгговское волокно с периодически изменяющимся по длине показателем преломления сердцевины, подключаемое через циркулятор к линейному ОМОВ 1 и 3 (рис. 7.16). Ввиду переменного периода такой брэгговской решетки 2, создаются разные длины оптических путей и мест отражения в ней для разных длин волн сигнала  $\Delta\lambda$  (разных частот), что приводит К укорочению импульсного сигнала. Решетка длиной 5 длительности см может компенсировать дисперсию ВОСП с внешней модуляцией по интенсивности длиной до 300 км и скоростью передачи 10 Гбит/с.



Рис. 7.16. Компенсатор хроматической дисперсии

Недостатками компенсатора дисперсии является следующее:

– решетки изготовляются фотоспособом из фоточувствительных (GeO<sub>2</sub>) материалов в OB, поэтому со временем под действием световых сигналов происходит разрушение решетки;

– для нормального функционирования устройства необходима стабилизация температуры, что увеличивает его стоимость.

Существуют компенсаторы дисперсии на дифракционных структурах как на полосковой основе, так и на волоконной, в том числе и на брэгговском волокне. Роль компенсаторов дисперсии могут играть полосовые фильтры, если

сдвинуть центральную частоту сигнала относительно центральной частоты пропускания оптического фильтра (канального порта оптического мультиплексора).

### Контрольные вопросы

- 1 Для какой цели в ВОСП СРК используются транспондеры?
- 2 Какие общие функции могут выполнять транспондеры?
- 3 Какие требования предъявляются к канальным лазерам в ВОСП СРК?
- 4 Как осуществляется дистанционная накачка линейных КВОУ в ВОСП СРК?
- 5 Чем ограничивается использование оптического канала спектром 50 ГГц?
- 6 Каково принципиальное отличие методов спектрального и временного мультиплексирования?
- 7 Возможна ли реализация ВОСП с гибридным, в частности спектральным и временным мультиплексированием?
- 8 То же, что и в п. 7, со спектральным, временным и поляризационным мультиплексированием?
- 9 Нарисуйте функциональные схемы ВОСП по пп. 7 и 8.

### 8 ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ ВОСП СРК

Полностью оптические сети (ПОС, или AON – All Optical Networks) собой представляют сети, В которых передача, спектральное мультиплексирование, усиление, фильтрация, коммутация оптических сигналов (каналов) осуществляются на оптическом уровне. Такие сети перспективны, нашли широкое применение ввиду большой их информационной емкости и удельной экономичности. Большинство оптических устройств и элементов, применяемых в ПОС, используют цифровую передачу оптических сигналов с модуляцией по интенсивности, при которой бинарной 1 соответствует передача света большой интенсивности, а бинарному 0 – передача света низкой интенсивности. Последнее объясняется тем, что КВОУ вносят дополнительный шум в усиление оптического сигнала. Остановимся на оптических устройствах, применяемых на ПОС, и не рассмотренных ранее, в том числе и в [2]. К их спектральные (волновые) числу относятся конвертеры И оптические коммутаторы.

### 8.1 Коммутаторы оптических каналов

Коммутатор оптических сигналов (каналов) – это один из наиболее важных компонентов ПОС, без которого немыслимо строить сеть большой архитектуры.

Коммутация оптических сигналов (каналов) является одной из основных операций в системах оптической обработки и передачи информации. коммутирующих оптических устройств Разработка тесно связана С повышением степени интеграции большинства монолитных и гибридных оптических интегральных схем для обработки информации, а также с более возможностью объединения таких схем сложные В многофункциональные гибридные оптические схемы (с токопроводниками и световодами на единой подложке).

Основными параметрами коммутатора являются: *перекрестные помехи*, вносимые помехи, скорость переключения, управляющее напряжение.

В настоящее время разработаны и используются разнообразные типы оптических коммутаторов – направленные ответвители (ключи), мостовые балансовые интерферометры, коммутаторы на скрещивающихся световодах, на разветвляющихся световодах с направленной связью, а также с управляемой связью, на брэгговских ответвителях в матричных коммутаторах и др.

Оптические коммутаторы имеют достаточно высокое быстродействие (частота переключения порядка нескольких сотен мегагерц), высокую эффективность переключения (свыше 0,99), хорошую защищенность от переходных влияний между соседними каналами (до -25 дБ) и низкие вносимые потери (меньше 5 дБ с учетом потерь на стыковку с одномодовым OB). Переключение каналов выполняется потенциалами постоянного тока 0 и  $\pm U = (5...25)$  В.

В основе работы оптических коммутаторов лежит *линейный* электрооптический эффект Поккельса, который заключается в изменении показателя преломления кристалла (преимущественно ниобата лития) пропорционально напряженности электрического поля.



# Рис. 8.1. Коммутаторы оптических каналов ВОСП СРК на основе элементов 2х2: а – ячейка Поккельса (элемент 2х2); б и в – схемы коммутаторов NxN (без конвертеров)

Реализация разветвителя-коммутатора 2×2, состоящая из двух одномодовых последовательных *X*-разветвителей, представлена на рис. 8.1, а.

Если эта конструкция реализована на полосковой основе с квадратным сечением световодов и 3-децибельными расщепителями в точках I и II, то при выключенной ячейке Поккельса, когда U = 0, волны разных поляризаций проходят равные оптические пути и распространяются синфазно сквозь разветвители. При этом сигнал (канал)  $f_{\rm k}$  со входа 1 поступает на выход 3 с той же поляризацией; со входа 2 – соответственно сигнал  $f_m$  поступает на выход 4 с неизменной поляризацией. Оптические сигналы после прохождения по разным плечам при включенной ячейке, когда  $U \neq 0$ , интерферируют во втором разветвителе в зоне II с разными фазами и перенаправляются, в зависимости от этого, в плечо 3 или 4 или одновременно в оба плеча. При определенном значении напряжения осуществляется полная перекачка сигнала из плеча 1 в плечо 4 или из плеча 2 в плечо 3. Если к ячейке подано полуволновое напряжение, при котором разность фаз между волнами ортогональных поляризаций в зоне II составляет  $(2m \pm 1)\pi$ , где m – целое число, то на выходе второго разветвителя поле будет отсутствовать в обоих плечах 3 и 4, т. е. схема будет полностью заперта. Таким образом, путем изменения напряжения на электродах можно регулировать разность фаз между приходящими во второй разветвитель сигналами и тем самым влиять на характер интерференции (ключмодулятор Маха–Цендера) и направление переключения канала  $f_{\kappa}$  на выходы 3 и4.

Совокупность разветвителей-коммутаторов  $2\times2$ , состыкованных с линейными волокнами по схемам рис. 8.1, б, в, дает возможность реализовать оптический  $N\times N$  – коммутатор. Такие схемы – двустороннего действия. Известны и другие схемы и реализации оптических коммутаторов.

### 8.2 Оптические волновые конвертеры

при коммутации оптических В полностью оптических сетях связи сигналов (каналов) появляется необходимость перенесения отдельных каналов или их группы по спектру частот (длин волн). Эту функцию призваны выполнять волновые конвертеры (см. рис 8.1, б, в). Принцип действия нелинейном взаимодействии конвертера основан на входного оптического излучением информационного сигнала с лазера накачки определенной длины волны, в результате которого информационный сигнал преобразуется (переносится) по спектру в новую длину волны за счет комбинационного преобразования Преобразование частот. полностью прозрачно по отношению к спектру частот модуляции и не вносит задержки. Реализован такой конвертер участием прозрачного С кристалла С ферроэлектрической периодической структурой, содействующей скорейшему преобразованию оптического сигнала, представленный на рис. 8.2, а по схеме нелинейного по первой комбинационной частоте  $f_{\rm H} - f_{\rm c}$  преобразования. Например, входной информационный оптический сигнал на длине волны  $\lambda_{c} = 1535$  нм под воздействием излучения накачки на длине волны  $\lambda_{H} = 770$  нм переносится при сохранении спектра информационного оптического сигнала на

172

конвертированную длину волны  $\lambda_{\kappa} = 1545$  нм (рис. 8.2, б). Длина волны лазера накачки может перестраиваться в пределах до 100 нм. Следовательно, и сигнал способен перемещаться в пределах этого диапазона длин волн. На выходе конвертера остатки входного сигнала  $\lambda_c$  и сигнала накачки  $\lambda_{\rm H}$  удаляются оптическим фильтром, так что остается только сигнал на конвертированной длине волны  $\lambda_{\kappa}$ .



Рис. 8.2. Оптический волновой конвертер

Другой реализацией конвертера может служить ZDSF OMOB с нулевой дисперсией в зоне усиления ВОУ, когда из-за нелинейных явлений в самом ОМОВ длины волн входного сигнала  $\lambda_c$  и лазера накачки  $\lambda_{\rm H}$  порождают конвертированную длину волны сигнала  $\lambda_{\rm K}$ . Такое преобразование происходит на длине ОМОВ порядка 2 км.

### 8.3 Архитектура полностью оптических сетей

Общая структура глобальной полностью оптической сети связи на основе ВОСП СРК представлена на рис. 8.3. Оптический уровень сети связи может подразделяться на подуровни.

Оптический терминал (OT) – это узел сети, на котором уже заканчивается полностью оптическая сеть (ПОС), где применяются уже оптоэлектронные преобразователи, переводящие электрические сигналы в один из оптических каналов в соответствии с частотным планом из окна 1,55 мкм и обратно. ОТ оснащается узкополосными лазерными ПОМ, перестраиваемыми оптическими фильтрами, системами спектрального мультиплексирования и др. Здесь находятся интерфейсы каналов доступа.

Хотя ОМОВ обеспечивает огромную полосу пропускания, оптические каналы доступа обычно рассчитаны на меньшую скорость. Терминалы СТМ-64 разработаны для создания стержневых магистралей и допускают подключение менее скоростных потоков синхронной цифровой иерархии только двух типов – СТМ-4 и СТМ-16. В случае необходимости организации доступа по менее скоростным каналам, например на основе СТМ-1 или на основе трибных интерфейсов плезиохронной иерархии *E*1, *E*2, *E*3 и т. д., наряду с терминалом СТМ-64, потребуется дополнительный отдельный сетевой элемент, который

будет связываться с терминалом СТМ-4 или СТМ-16. В то же время сетевые элементы на каналы СТМ-16 и более низкие допускают реализацию прямого доступа. В табл. 8.1 приведены допустимые низкоскоростные интерфейсы для терминалов СТМ-16 и СТМ-64.



Рис. 8.3. Архитектура полностью оптической сети

*Таблица 8.1.* Низкоскоростные интерфейсы для терминалов СТМ-16 и СТМ-64

Интерфейсы	CTM-16	СТМ-64 (9953,28 Мбит/с)
Возможность прямого	Дa	Нет
ввода/вывода оптических		
каналов		
СТМ-16 (2488,32 Мбит/с)	_	Да
СТМ-4 (622,488 Мбит/с)	Дa	Дa
СТМ-1 (155,52 Мбит/с);	Дa	Нет
ПЦИ 140 Мбит/с		
<i>Е</i> 3 (34,368 Мбит/с)	Дa	Нет
<i>E</i> 1 (2,048 Мбит/с)	Дa	Нет

Уровень 0 определяет пассивную ПОС локального масштаба с небольшим числом оконечных узлов сети. Характерными элементами этого уровня являются комбайнеры (объединители)/разветвители, фильтры и др.

Уровень 1 определяет ПОС с пассивной волновой (частотной) маршрутизацией, содержащей устройства спектрального мультиплексирования и демультиплексирования, транспондеры входа и выхода, содержащие в случае необходимости коммутаторы оптических каналов, способные видоизменять структуру ПОС.

Уровень 2 полностью оптической сети допускает активную спектральную маршрутизацию. Характерными элементами сети этого уровня являются устройства транспондирования, спектрального мультиплексирования И демультиплексирования, спектральные (волновые) конвертеры и оптические коммутаторы – коммутация может происходить либо на основе чтения заголовков пакетов, либо на основе внешнего управления (активная каналов, см. п. 8.1). Коммутаторы выполняют коммутация функцию диспетчеров, перенаправляя потоки на разные выходные порты по задаваемой схеме, сохраняя или изменяя несущую длину волны. Если информационный сигнал поступает на узел на одной длине волны, а должен покинуть этот узел на другой длине волны, то в этом случае он должен пройти сквозь волновой конвертер, который размещается здесь (см. рис. 8.2, б, в).

На всех уровнях рассматриваемой полностью оптической сети может, в случае необходимости, осуществляться усиление оптических сигналов с помощью КВОУ или полупроводниковых ОУ, регенерация сигналов и коррекция дисперсии.

### Контрольные вопросы

- 1 Назовите достоинства полностью оптической сети.
- 2 Возможно ли построение единой ПОС для ВОСП СРК и ВОСП ВРК?
- 3 Возможно ли построение ВОСП с гибридным методом мультиплексирования, например СРК и ВРК?
- 4 Возможна ли коммутация оптических каналов ВОСП СРК и ВОСП ВРК на уровне ПОС?

### 9 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ТРАКТЕ

#### 9.1 Самофокусирование, фазовая само- и кросс-модуляции

Отклик любого диэлектрика на световое воздействие становится нелинейным в сильном электромагнитном поле. Возникновение нелинейного отклика связано с негармоническим движением связанных электронов при воздействии приложенного светового поля  $\vec{E}$ . В результате индуцированная поляризация  $\vec{P}$  электрических диполей уже не является линейной, а удовлетворяет более общему соотношению:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 (\chi^{(1)} \vec{E} + \chi^{(2)} \vec{E^2} + \chi^{(3)} \vec{E^3} + ...), \qquad (9.1)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\chi^{(j)}$ , (j = 1, 2, ...) – восприимчивость *j*-того порядка. Главный вклад в  $\vec{P}$  вносит линейная восприимчивость  $\chi^{(1)}$ . Она определяет показатель преломления и постоянную затухания  $\alpha$ , рассмотренные в [2, раздел 6]. Так как в кварцевых стеклах молекула SiO<sub>2</sub> обладает центром симметрии инверсии, то  $\chi^{(2)} \approx 0$ . Поэтому нелинейные эффекты низшего порядка в ОМОВ возникают из-за восприимчивости третьего порядка, которая ответственна за такие явления, *как нелинейное преломление, вынужденное комбинационное рассеяние, генерация третьей гармоники, четырехволновое смешение* и др. эффекты.

Большинство нелинейных эффектов в ОМОВ возникает из-за нелинейного преломления, т. е. зависимости показателя преломления от интенсивности:

$$\overline{n}(\boldsymbol{\omega}, \left|\boldsymbol{E}\right|^2) = n(\boldsymbol{\omega}) + n_2 \left|\boldsymbol{E}\right|^2, \tag{9.2}$$

где  $n(\omega)$  – показатель преломления в линейном режиме передачи;

 $n_2$  – нелинейный показатель преломления, измеренное численное значение которого для световодов из кварцевых стекол на длине волны 1,55 мкм равно  $(2,2...2,3)\cdot 10^{-22}$  (м/В)<sup>2</sup>. Несмотря на малость величины  $n_2$ , нелинейные эффекты могут наблюдаться при относительно низких мощностях (интенсивностях) вследствие малого размера модового пятна волны HE<sub>11</sub>, чрезвычайно низких потерь и дисперсии.

Зависимость показателя преломления от интенсивности приводит к множеству интересных нелинейных эффектов, три из которых – это самофокусирование, фазовая самомодуляция (ФСМ) и фазовая (перекрестная) кросс-модуляция (ФКМ).

Самофокусирование – это поперечное сужение светового пучка при его распространении в нелинейной среде (волокие). При больших значениях

176

Eполя световой волны показатель электрического преломления  $\bar{n}(\omega, |E|^2)$  максимален у оси светового пучка (волокна), вследствие чего диаметр модового поля уменьшается. Увеличение напряженности поля, вызванное самофокусированием в ОМОВ, может сильно влиять на протекание других оптических эффектов, зависящих от интенсивности световой волны. В частности, за счет самофокусирования сильно снижается порог вынужденного комбинационного рассеяния.

ФСМ обусловлена самонаведенным набегом фазы, который оптическое поле приобретает при распространении в нелинейном ОМОВ. Величину ФСМ можно получить, умножив (9.2) на  $k_0$ , в виде

$$\phi = \bar{n}k_{0}L = (n + n_{2}|E|^{2})k_{0}L, \qquad (9.3)$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda$  – волновое число в вакууме и *L* – длина ОМОВ.

Зависящий от интенсивности набег фазы  $\phi_{NL} = n_2 k_0 L |E|^2$  обусловливает ФСМ, что проявляется в изменении частот в импульсе и искажении его формы.

Действительно, мгновенное значение напряженности поля в импульсе

 $E(z,t) = E(0,t) \cdot \exp[i\phi_{NL}(z,t)],$ 

где E(0,t) – мгновенное значение амплитуды поля при z = 0.

Изменение фазы импульса во времени означает сдвиг мгновенной оптической частоты от основной частоты ω<sub>0</sub> при перемещении вдоль импульса. Изменение частоты BO времени можно рассматривать как частотную модуляцию импульса, наводимую ФСМ. Иначе говоря, генерация новых частотных составляющих происходит непрерывно, по мере распространения вдоль нелинейного ОМОВ, вызывая уширение частотного спектра импульса. Следовательно, ФСМ приводит к спектральному уширению импульсов (снижению длительности) и к возможности существования оптических солитонов в области аномальной (отрицательной) дисперсии групповых скоростей ОМОВ, где  $\partial^2 \beta / \partial \lambda^2 < 0$ . На рис. 9.1 представлено изменение длительности импульса Т/Т<sub>0</sub> от расстояния при различных уровнях мощности источника излучения, где  $T_0$  – начальная длительность импульсного сигнала.

Начальная частотная модуляция также может приводить к существенным изменениям спектров импульсов, уширенных вследствие ФСМ. Начальная частотная модуляция может привести к качественным изменениям в частотном уширении, вызываемом ФСМ, что может быть использовано в коррекции передаваемых оптических импульсов.

Вызванная в оптическом канале модуляция зависит от вариации показателя преломления, определяемого, преимущественно интенсивностью световой волны на этом канале, и классифицируется как ФСМ.



Рис. 9.1 Изменение длительности импульса по длине пройденного расстояния при различных уровнях вводимой мощности.

При СМ или ПСМ с большим количеством каналов данный эффект на канале вариации показателей преломления зависит ОТ из-за ОДНОМ интенсивности сигналов других каналов, усиливая ФСМ, и носит название перекрестной (кросс) фазовой модуляции (ФКМ). Следовательно, эффект ФКМ возникает, когда два оптических поля распространяются одновременно и действуют друг на друга посредством зависимости показателя преломления от интенсивности. Нелинейная связь, вызванная ФКМ, может иметь место не только тогда, когда два излучения на разных длинах волн вводятся в ОМОВ, но также и вследствие взаимодействия между ортогонально-поляризованными компонентами одного излучения в двулучепреломляющем ОМОВ, т. е. между обыкновенной и необыкновенной волнами.

В случае распространения в ОМОВ излучений двух разных длин волн индуцируемая ФКМ-связь может вызвать *модуляционную неустойчивость* в области нормальной дисперсии групповых скоростей  $\partial^2\beta/\partial\lambda^2 > 0$ . Эффект ФКМ совместно с ФСМ и дисперсией групповых скоростей может привести к *несимметричным спектральным и временным изменениям формы сигналов*.

На практике эффект ФКМ в ВОСП СРК с использованием стандартного ОМОВ может быть существенно уменьшен путем увеличения интервалов длин волн между отдельными оптическими каналами. Вследствие дисперсии ОМОВ постоянные распространения этих каналов  $\beta_i$  изменяются – и импульсы, соответствующие отдельным каналам, удаляются друг от друга, что имеет место, например, при канальных интервалах 100 ГГЦ. Однако в ОМОВ со смещенной нулевой дисперсией импульсы в разных каналах не удаляются друг от друга, так как они распространяются с приблизительно равными групповыми скоростями. Следовательно, ФКМ может стать существенной проблемой в высокоскоростных системах (10 Гбит/с и выше) на ОМОВ со смещенной нулевой дисперсией (ZDSF). Поэтому нецелесообразно закладывать в проекты нового строительства ВОСП СРК оптические кабели с волокнами

ZDSF. При модернизации ВОСП-ОК с подобными волокнами для использования под ВОСП СРК необходимо исключать оптические каналы, примыкающие к длине волны  $\lambda_0$  нулевой дисперсии. Возможно при этом использовать технологию разреженного спектрального мультиплексирования по каналам, как можно далеко отстоящих от  $\lambda_0$  (см. табл. 7.2)

Для уменьшения ФСМ и ФКМ необходимо уменьшать интенсивности сигналов или увеличивать площадь поперечного сечения модового поля  $A_{\rm 3d.}$ . Волокно, компенсирующее дисперсию (DCF), имеет меньшую величину  $A_{9\varphi}$  и характеризуется более вследствие этого выраженными нелинейными явлениями. Поэтому необходимо располагать ОК с такими волокнами с целью компенсации дисперсии на второй половине регенерационного (усилительного) участка, примыкающего к приемной станции или к КВОУ. В процессе нелинейного рассеяния энергия передается от одного светового сигнала к другому сигналу с более высокой длиной волны (или низкой энергией), а энергия, находящаяся вне сигнальных частотных полос передачи, поглощается молекулярными колебаниями, что приводит к увеличению затухания сигнала.

Влияние указанных нелинейных явлений может быть снижено также путем *уменьшения расстояний между КВОУ*. Это может упростить требования к КВОУ (требуется меньше усиление), однако количество их увеличится, что приведет к возрастанию стоимости системы. Реализацией этой идеи является распределенное по всей длине ОМОВ усиление, что наблюдается при рамановском усилении (см. п. 9.4).

### 9.2 Вынужденные неупругие рассеяния

Рассмотренные выше нелинейные эффекты, связанные С восприимчивостью третьего порядка, можно назвать упругим рассеянием света, в том смысле, что не происходит обмена энергией между электромагнитным полем и диэлектрической средой. Второй класс нелинейных эффектов вызван вынужденным неупругим рассеянием, при котором оптическое поле передает часть своей мощности нелинейной среде. Это эффекты вынужденного комбинационного рассеяния Рамана (ВКР) и вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). ВКР связано с рассеянием света на тепловых колебаниях молекул стекла (оптические фононы). Под действием света большой интенсивности происходит поляризация в стекле молекулфононов O-Si-O, совершающих акустические колебания (ВРМБ). Пол действием этого явления сам падающий свет частоты ω (накачки) испытывает как рэлеевское рассеяние на этой частоте, так и рассеяние на комбинационных стоксовых частотах  $\omega - \omega_{\rm M}$  и антистоксовых  $\omega + \omega_{\rm M}$ , где  $\omega_{\rm M}$  – собственная частота колебаний молекул (микрочастиц). Именно комбинационные рассеяния приводят к поперечным помехам между каналами в мультиплексном сигнале ВОСП СРК. При этом осуществляется перенос на длине dz интенсивности поля волны накачки частоты  $\omega_{\rm H}$  в стоксовую волну частоты  $\omega_{\rm H} - \omega_{\rm M}$  величиной

$$dI_{S} = g_{R}I_{H}I_{S}dz,$$

где  $I_S$  – интенсивность стоксовой волны;  $I_H$  – интенсивность накачки и  $g_R$  – коэффициент ВКР-усиления Рамана.

Такое же уравнение имеет место и для ВРМБ, если заменить  $g_R$  на коэффициент ВРМБ-усиления  $g_{MB}$ .

Эффекты ВКР и ВРМБ являются пороговыми, т. е. существенное преобразование интенсивности накачки в интенсивность ВКР- или ВРМБволны происходит только тогда, когда интенсивность накачки превышает некоторый пороговый уровень. Величина порога ВКР наблюдается при мощности накачки примерно 500 мВт. Коэффициент ВРМБ-усиления  $g_{\rm MB}$  более чем на два порядка величины больше величины  $g_R$ , поэтому обычная величина порога ВРМБ меньше примерно 10 мВт.

Хотя ВКР и ВРМБ по своей природе очень похожи, различия дисперсионных свойств акустических и оптических фономов приводит к некоторым принципиальным различиям между ними. Основное различие заключается в том, что ВРМБ в ОМОВ порождает оптические поля, распространение которых происходит только в обратном направлении по отношению к падающей основной волне сигнала, а ВКР порождает в ОМОВ оптические поля, распространяющиеся преимущественно по направлению распространения. В случае с ВРМБ в процесс вовлекаются акустические фононы и взаимодействие в третьем окне прозрачности при  $\lambda = 1.55$  мкм имеет место в очень узкой полосе частот  $\Delta f \approx 20$  МГц. Таким образом, ВРМБ не вызывает взаимодействия между различными частотами до тех пор, пока интервалы между ними превышают 20 МГц. Однако в пределах одного оптического канала ВРМБ может создать большие искажения, так как создает усиление в направлении, противоположном направлению распространения сигнала. В результате оно искажает информационный сигнал и порождает мощный сигнал, направленный обратно к передатчику, вызывая необходимость защиты от него изолятором (вентилем). Коэффициент усиления ВРМБ приблизительно равен  $g_{\rm MB} = 4 \cdot 10^{-11}$  м/Вт и не зависит от длины волны.

Если в ОМОВ вводится два или более сигналов различных длин волн, ВКР вызывает перекачку мощности от сигналов с низкой длиной волны к сигналам с более высокой длиной волны, т. е. коротковолновый сигнал служит накачкой для длинноволнового сигнала. На рис. 9.2 показана зависимость коэффициента рамановского (ВКР) усиления от интервалов частот  $\Delta f$  (длин волн  $\Delta \lambda$ ) между сигналами. Спектр ВКР-усиления очень широкий,  $\Delta f_R \approx 30$  ТГц. Максимум усиления при длине волны стоксового сигнала в кварцевых волокнах в районе  $\lambda \approx 1,55$  мкм составляет  $g_R \approx 10^{-14}$  м/Вт и находится на интервале частот, смещенном на 13 ТГц. Однако уже в системах с интервалом между оптическими сигналами  $\Delta \lambda \leq 125$  нм (15 ТГц) влияние ВКР будет сказываться как в прямом по спектру, так и в обратном направлениях только тогда, когда в обоих каналах передается бит 1.

Мощность, перекачиваемая вследствие ВКР из данного оптического канала в другие каналы, возрастает с увеличением длины линии и количества оптических каналов. Это устанавливает ограничение на передаваемую в данном
канале мощность в зависимости от длины линии и количества оптических каналов при заданном энергетическом запасе, обусловленном этим явлением.



Рис. 9.2. Зависимость рамановского усиления накачиваемой волны от интервалов частот.

На рис. 9.3 приведена зависимость от длины линии связи максимально допустимого значения мощности при запасе в 1 дБ, которая может быть передана в оптическом канале, обусловленная ВКР, при различном количестве каналов [15].

Для ослабления влияния ВКР в ВОСП СРК можно использовать оптические каналы, расположенные как можно ближе друг к другу (см. рис. 9.2), а также снижать уровень мощности на передаче КВОУ, что приводит к сокращению расстояний между оптическими усилителями и снижению их спонтанных шумов  $ASE \cdot \Delta f$ .



Рис. 9.3. Зависимость допустимой ВКР мощности сигнала на канал от длины линии при различном количестве залействованных каналов ВОСП СРК

### 9.3 Четырехволновое смешение

Нелинейное явление обусловлено восприимчивостью третьего порядка, которая ответственна за генерацию третьей гармоники нелинейной поляризации

$$P_{NL}(z,t) = \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3(z,t).$$
 (9.4)

В случае спектрально мультиплексированных сигналов, представляемых для простоты в каждом канале в виде плоских монохроматических волн, выражение для E(z, t) можно записать в форме

$$E(z,t) = \sum_{i=1}^{N} E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z + \phi_i), \qquad (9.5)$$

где *N* каналов с угловыми частотами  $\omega_1...\omega_N$  с соответствующими фазовыми постоянными распространения  $\beta_1...\beta_N$  представляют поле группового линейного оптического сигнала ВОСП СРК;  $\varphi_i$  – произвольная фаза косинусоидального колебания в каждом канале (необязательно синхронизируемом). Подставив (9.5) в (9.4), получим новые поля на частотах 3  $\omega_i$ ; 2  $\omega_i \pm \omega_j$ ;  $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$ . Наиболее опасными для канальных сигналов ВОСП СРК являются поля частот  $\omega_i + \omega_j - \omega_k$ , где *i*,  $j \neq k$  ( $\omega_i$ ,  $\omega_j$  – необязательно совпадающие).

Например, если частоты в системе ВОСП СРК расположены близко друг к другу или же расположены рядом с нулевой дисперсией ОМОВ, тогда β почти постоянна для этих частот и условия фазового соответствия (синхронизма) почти выполняются. В этом случае мощность, генерируемая на этих частотах, может быть довольно значительной. Для частот

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k, \ i \neq k; \ j \neq 0$$
(9.6)

пульсирующий сигнал, вследствие различных значений  $\beta_i + \beta_j - \beta_k$ , может быть очень близким по частоте к одному из канальных сигналов, что приводит к значительным перекрестным помехам в этом канале. В многоканальных системах с *N* каналами это приводит к большому количеству  $N(N - 1)^2$  помех, соответствующих изменению *i*, *j*, *k* от 1 до *N*.

Явление смешения четырех волн зависит от фазового соотношения между взаимодействующими негармоническими сигналами. Если все взаимодействующие сигналы распространяются с одной и той же групповой скоростью, что происходит при отсутствии дисперсии вблизи  $\lambda_0$  в ZDSFволокне, это явление усиливается. В системах с дисперсией отличие групповых скоростей больше, когда каналы расположены дальше друг от друга по шкале волн проявляется частот. Смешение четырех И BO внутриканальных перекрестных помехах.

Мощность четырехволнового смешения возрастает с увеличением длины линии. Это устанавливает ограничение на передаваемую мощность для каждого канала в зависимости от ее длины при обеспечении необходимого запаса мощности, обусловленного этим явлением. Такое ограничение отражено на рис. 9.4 при запасе 1 дБ как для стандартного одномодового волокна (SF) с

дисперсией 17 пс/км·нм, так и для волокон NZDSF со смещенной ненулевой дисперсией и ZDSF со смещенной в середину передаваемой спектральной полосы 1530...1565 нм с коэффициентом наклона кривой дисперсии dD/dλ, равным 0,055 пс/км·нм<sup>2</sup> (непрерывная линия – 8 каналов с интервалом 100 ГГц; штриховая линия – 32 канала, 100 ГГц; штрих-пунктирная линия – 32 канала, 50 ГГц). Как следует из рисунка, максимальная допустимая передаваемая мощность на канал соответствует волокну SF и наименьшая - волокну ZDSF хроматической дисперсии меньшего значения В последнем из-за И соответственно большего значения мощности смешения. Ограничение мощности существенно зависит от уменьшения интервалов между каналами, так как мощность смешения четырех волн при этом увеличивается из-за уменьшения Δβ. Это и привело к созданию волокон NZDSF, т. е. с ненулевой смещенной дисперсией в пределах полосы длин волн КВОУ и с нулевой дисперсией, вынесенной влево или вправо за пределы указанной полосы.



Рис. 9.4. Зависимость допустимой четырехволновым смешением мощности сигнала на канал от длины линии при различном количестве задействованных каналов ВОСП СРК

На рис. 9.5 качественно представлено разрушение гауссового импульса длительностью  $T_0$  (рис. 9.5, а) большой мощности, подаваемой в ОМОВ, рассмотренными нелинейными эффектами в процессе его распространения. На рис. 9.5, б для наглядности представлен деформированный этими эффектами спектр импульса в соответствии с приведенным их описанием. Вершина импульса, и особенно его фронты по краям спектра, подвергнуты разрушению

эффектом ФСМ (левая и правая стороны его). Правая сторона вершины импульса соответствует разрушению эффектом ФКМ, где показан перенос части энергии импульса за пределы невозмущенной его спектральной плотности (см. рис. 9.5, а). Левый и правый края спектра начального импульса, соответственно ( $\omega - \omega_{\rm H}$ ) и ( $\omega + \omega_{\rm H}$ ), деформированы продуктами ВКР, которые также могут выносить энергию за пределы невозмущенного импульса, расширяя частотный спектр его, где  $\omega_{\rm H}$  – частота накачки. Продукты ВРМБпреобразования условно представлены мелкими кружками как вне, так и на фоне самого спектра импульса и распространяются в противоположном направлении. И. наконец, продукты четырехволнового смешения (преобразования) представлены на рис. 9.5, в в виде поля, осцилляции спектральной плотности которого носят случайный характер, а спектр частот простирается влево и вправо далеко за пределы спектра невозмущенного импульса.



Рис. 9.5. Графическое представление разрушения мощного гауссова импульса продуктами нелинейного преобразования в ОМОВ

### 9.4 Рамановские волоконно-оптические усилители

Увеличение длины усилительного участка ВОСП принципиально достижимо путем увеличения мощности линейного оптического сигнала, вводимого в ОМОВ, повышения чувствительности ПРОМ, использования ОМОВ с предельно низкими затуханием и дисперсией, а также использования предварительной коррекции ошибок при передаче цифровых сигналов. Одним из методов решения поставленной задачи, кроме перечисленных, является использование для усиления сигналов оптического нелинейного явления в кабельном волокне, составляющем оптический тракт ВОСП, известного как вынужденное комбинационное рассеяние Рамана (ВКР), или стимулированное рамановское рассеяние (SRS-Stimulated Raman Scattering). Такое усиление распределено по всей длине кабельного ОМОВ на усилительном участке, поэтому происходит при минимальном уровне спонтанного шума. Последние поколения ВОСП СРК для длинных линий содержат в своем составе рамановские лазеры накачки (500...1000 мВт и более) и устройства ввода излучения в ОМОВ для создания в нем ВКР. Поэтому такие ВОУ называют также ВКР-усилителями.

### 9.4.1 Принцип работы рамановских усилителей

два основополагающих рассеяния фотонов (квантов) Рассмотрим в кварцевом стекле ОМОВ – рэлеевское и рамановское. Рэлеевское рассеяние относится к упругому рассеянию, поскольку, сталкиваясь с микрочастицами вещества, фотоны не теряют своей энергии, а изменяют только траекторию движения. В обычных условиях рэлеевское рассеяние преобладает над рамановским. В результате рамановского рассеяния (при большом уровне накачки ОМОВ) фотоны не только изменяют свою траекторию, но и отдают часть своей энергии микрочастице в соответствии со стоксовым соотношением  $h\omega_{\rm S} = h\omega_{\rm H} - h\omega_{\rm M} = h(\omega_{\rm H} - \omega_{\rm M})$ , где  $\omega_{\rm H}$  – частота фотона накачки;  $\omega_{\rm M}$  – частота собственных колебаний микрочастицы; частота  $\omega_{\rm S} = \omega_{\rm H} - \omega_{\rm M} -$  частота нового фотона (стоксова), возникшего в результате нелинейного взаимодействия фотона накачки частотой ω<sub>н</sub> и фотона микрочастицы ω<sub>м</sub>. Увеличивая мощность накачки, мы тем самым увеличиваем количество фотонов с энергией  $h\omega_{\rm H}$ . При этом возрастает также и вероятность возбуждения ранее невозбужденных Ориентация вектора поляризации возбужденных микрочастиц. частиц (молекул) в ОМОВ определяется направлением стоксова фотона, т. е. вдоль вектора электрического поля накачки. Ориентация возбужденных молекул из хаотических превращается в преимущественно упорядоченную. В результате этого процесса стоксовы фотоны не рассеиваются и поле этой частотной компоненты становится когерентным, направленным вдоль ОМОВ. Все это происходит ценой уменьшения энергии фотона накачки на величину *h*ω<sub>м</sub>.

Если в возбужденную среду ОМОВ ввести информационный сигнал частотой  $\omega_c$ , равной частоте стоксовых фотонов  $\omega_S = \omega_H - \omega_M$ , то он стимулирует

рождение стоксовых фотонов, частота, фаза и направление которых совпадают с такими же параметрами сигнальных фотонов, которые при этом своей энергии не теряют. Таким образом, в оптически возбужденной среде созданные излучением накачки стоксовы фотоны не только компенсируют потери энергии сигнала, но и усиливают его. В ОМОВ вектор Умова-Пойнтинга сигнальной волны ориентирован почти вдоль его оси. В этом же направлении ориентированы и векторы поляризации возбужденных молекул. Следовательно, вследствие ВКР-процесса в ОМОВ создается упорядоченная направленная вдоль оси его усиливающая среда. Увеличение усиления такой среды определяется соотношением количества возбужденных и невозбужденных молекул, т. е. рамановским коэффициентом усиления  $g_R$ , представленным на рис. 9.2. Величина  $g_R$  зависит от частоты оптического сигнала (Фурьекомпоненты его) и от свойств среды. Для кварцевого стекла максимальное значение g<sub>R</sub> сдвинуто относительно частоты накачки на 13 ТГц. На рис. 9.6 представлена кривая зависимости рамановского усиления g<sub>R</sub> от длины волны информационного сигнала. Из рисунка видно, ЧТО эта зависимость неравномерна, ее максимум находится на длине волны 1550 нм, а диапазон длин волн по оси абсцисс выбран совпадающим с диапазоном усиления квантового эрбиевого ВОУ.



Рис. 9.6. Зависимость рамановского усиления от длины волны информационного сигнала

Коэффициент передачи *G<sub>R</sub>* волокна длиной *L* с рамановской накачкой определяется как [3]

$$G_{R} = \exp\frac{g_{R}P_{\rm H}L}{A_{\rm 3\phi}},\tag{9.7}$$

где  $g_R$  – рамановский коэффициент усиления (см. рис. 9.2);  $P_{\rm H}$  – мощность накачки;  $A_{\rm эф}$  – эффективная площадь поперечного сечения одномодового распространения (модового поля, пятна).

Коэффициент передачи ОМОВ длиной *L* в пассивном режиме, т. е. без рамановской накачки, согласно закону Бугера,

$$K_{\Pi} = \exp(-\alpha_{\rm c}L), \qquad (9.8)$$

где α<sub>с</sub> – коэффициент затухания сигнала в волокне (в абсолютных единицах 1/км). Между коэффициентом затухания в дБ/км и в абсолютных единицах существует соотношение

$$\alpha_{\rm c}(1/{\rm KM}) = 0.23 \alpha ({\rm g}{\rm E}/{\rm KM}).$$
 (9.9)

Сравнивая формулу (9.7) с формулой (9.8), можно видеть, что они отличаются знаками в показателях экспонент. Согласно закону Бугера, мощность оптического сигнала по мере распространения в волокне убывает по экспоненте, а при ВКР-усилении мощность сигнала возрастает по экспоненте. Это значит, что потери мощности сигнала, обусловленные рэлеевским рассеянием, могут быть скомпенсированы или усилены с помощью ВКР-усиления.

### 9.4.2 Реализация рамановского распределенного усиления в ОМОВ

В современных ВОСП СРК с использованием ВКР-усиления накачка вводится в ОМОВ, образующее оптический тракт, на стороне приема, т. е. используется встречная схема накачки РВОУ.



Рис. 9.7. Схема рамановской накачки ОМОВ (жирная линия)

На рис. 9.7 представлена схема ввода излучения рамановской накачки и получения рамановского распределенного усиления, где  $OM_R$  – двухканальный оптический мультиплексор рамановской накачки, подключаемый на входе оптического эрбиевого предусилителя ПВОУ (если такой необходим); РЛН – рамановский лазер накачки. Излучение накачки мощностью примерно 25 дБм практически не проходит на вход предусилителя, поскольку  $OM_R$  его отфильтровывает. Напомним, что частота излучения накачки выше частоты сигнала на 13 ТГц (для первой стоксовой частоты).

Для компенсации потерь с помощью ВКР-усиления достаточно выполнить условия (см. (9.7) и (9.8)):

$$K_{\Pi} \cdot G_R = \exp(-\alpha_{\rm c}L) \cdot \exp\frac{g_R P_{\rm H}L}{A_{\rm 2\Phi}} \ge 1.$$
(9.10)

Если  $K_{\mu} \cdot G_{\mu} = 1$ , то тогда справедливо равенство

$$\frac{g_R P_H L}{A_{3\phi}} - \alpha_c L = 0 \quad \text{или} \quad g_H P_H = A_{3\phi} \alpha_c \;. \tag{9.11}$$

Мощность накачки  $P_{\rm H}$  на длине волокна L определяется затуханием, вносимым этой длиной ОМОВ с коэффициентом затухания  $\alpha_{\rm c}$  на длине волны накачки. Это соотношение позволяет определить величину мощности накачки  $P_{\rm H}$ , достаточную для компенсации потерь мощности в оптическом волокне на длине L от приемной стороны.

На рис. 9.8 представлена диаграмма уровней оптического сигнала по длине усилительного участка с ВКР-усилением и без него.



Рис. 9.8. Диаграммы уровней оптического сигнала без ВКР-усиления (штрихи пунктира правее точки  $R_0$ ) и с включенным рамановским усилением

Начальной точке отсчета соответствует входной стык на передаче (MPI-S) и входной уровень мощности  $p_{\rm BX}$  квантового БВОУ. Точка A

соответствует минимально допустимому уровню мощности оптического сигнала на стороне приема (на выходе усилительного участка) для случая отсутствия ВКР-усиления. Линии правее точки A соответствуют случаю компенсации потерь и поддержанию уровня сигнала  $P_{\text{доп}}$  на длинах  $L_{\text{доп}} = L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$  в зависимости от величины мощности накачки ВКР-усилителя.

При  $g_R = 4 \cdot 10^{-14}$  км/Вт,  $A_{3\phi} = 50$  мкм<sup>2</sup> и мощности накачки  $P_{\rm H} = 0,5$  Вт для стандартного ОМОВ типа SMF-28<sup>TM</sup> дополнительная длина усилительного участка  $L_2 \approx 29$  км; для  $P_{\rm H} = 1,0$  Вт –  $L_3 \approx 39$  км; для  $P_{\rm H} = 1,5$  Вт –  $L_4 \approx 46$  км.

Если же дополнительную длину оставить равной  $L_2$  для всех перечисленных мощностей накачки, то на выходе усилительного участка  $(L_1+L_2)$  уровень оптического сигнала соответственно возрастает до  $p_{c2}$  и  $p_{c3}$ .

Следует отметить, что оптимальное значение мощности накачки находится в пределах 0,5...1,0 Вт, так как при дальнейшем увеличении  $P_{\rm H}$  приращение длины замедляется.

Обратимся к зависимости рамановского коэффициента  $g_R$  от длины волны, представленной на рис. 9.6. Отсюда видно, что она весьма неравномерна. Для выравнивания амплитудно-частотной характеристики, а также расширения полосы усиления накачку следует производить не на одной длине волны, а на двух-трех длинах волн. Для перекрытия всего диапазона 1530...1570 нм накачка осуществляется от двух лазеров с длинами волн соответственно 1445 и 1456 нм. Для дальнейшего расширения полосы усиления применяют еще длины волн накачки 1427 и 1462 нм и др.

В качестве лазеров накачки ВКР-усилителей используются иттербиевые волоконные лазеры (см. п. 6.7), которые способны обеспечить необходимую мощность накачки 0,5...0,8 Вт и больше на вышеуказанных длинах волн (полупроводниковые лазеры на указанных длинах волн способны генерировать мощность не более 0,2 Вт). Для получения мощности накачки порядка 0,5...0,8 Вт на необходимых длинах волн используются многокаскадные схемы преобразования излучения 1100 нм от иттербиевых волоконных лазеров (мощностью несколько Вт) в стоксово излучение на требуемых длинах волн, например 1455 нм. На рис. 9.9, а представлена схема такого каскадного преобразования.

Во входной торец ОМОВ вводится излучение иттербиевого лазера на длине волны 1060...1100 нм (справа от его АОВ). Поскольку мощность иттербиевого лазера достаточна для возбуждения нескольких стоксовых частот рамановского излучения, то, распространяясь в ОМОВ с брэгговскими решетками, излучение накачки последовательно возбуждает стоксовы составляющие на необходимых длинах волн. Обеспечить это можно с помощью оптических селективных зеркал в виде дифракционных решеток Брэгга, нанесенных на боковой поверхности ОМОВ. Длины волн настройки зеркал указаны на рис. 9.9, а. При подобном каскадном включении фильтров-зеркал длина волны излучения на выходе рамановского лазера составляет 1455 нм. Это излучение вводится в один из вводов оптического мультиплексора OM<sub>R</sub> (см. рис. 9.7).



Рис. 9.9. Схема каскадного преобразования длины волны излучения иттербиевых волоконных лазеров 1100 нм в стоксово излучение: а – на длине волны 1455 нм а); б – схема накачки РВОУ

Поскольку АОВ иттербиевого волоконного лазера может обеспечивать лазерное усиления в обе его стороны и мощность излучения его достаточно велика, то такой лазер может осуществлять рамановскую накачку двух  $OM_R$ , принадлежащих двум разным ВОСП СРК, работающих на отдельных ОМОВ. С другой стороны, мощности излучения, снимаемые с разных концов АОВ в виде взаимно-ортогональных поляризаций с помощью схемы рис. 9.9, б могут подаваться через поляризационный мультиплексор 1 на рамановский мультиплексор OM<sub>R</sub> и обеспечивать повышенную накачку линейного OMOB. Оптический фильтр ОФ в этой схеме осуществляет выравнивание усиления.

Источником накачки рамановского лазера служит широкополосный полупроводниковый лазер, излучающий на центральной длине волны 980 или 1060 нм мощность несколько ватт.

9.4.3 Шумы в волоконно-оптическом тракте с рамановским усилением сигналов

Ранее было указано, что накачка при ВКР-усилении вводится в рабочее ОМОВ на приемной стороне навстречу информационному сигналу. При отсутствии информационного сигнала излучение ВКР на стоксовой частоте распространяется в противоположную сторону от ПРОМ. При этом в ОМОВ, кроме излучения накачки и ВКР, присутствуют излучения рэлеевского рассеяния обоих видов излучения. Однако спектр рэлеевского рассеяния накачки находится за пределами полосы пропускания ОМ<sub>*R*</sub> и оптического предусилителя и поэтому может не учитываться. Рэлеевское рассеяние

излучения ВКР попадает в полосу пропускания  $OM_R$  и предусилителя. Уровень мощности рэлеевского рассеяния в спектре ВКР ниже уровня мощности рассеяния исходного излучения накачки на 40...50 дБ в зависимости от длины волны, поскольку эта мощность обратнопропорциональна  $\lambda^4$ . Следовательно, величина 50 дБ относится к длинноволновой части оптического спектра, т. е. к диапазонам *C* и *L*. Учитывая, что при больших уровнях мощности накачки, вся она может перейти в мощность ВКР, которая достигает 1 Вт, или 30 дБм, максимальный уровень рэлеевского рассеяния в спектре ВКР может быть равным примерно минус 25 дБм. Однако, в отличие от ВКР, рэлеевское рассеяние направлено по всем направлениям в том числе и обратно. Большая часть его выходит из ОМОВ, и только несколько процентов проходит в направлении, совпадающем с направлением информационного сигнала. Следовательно, даже если вся мощность накачки переходит в ВКР, уровень рэлеевского рассеяния, попадающего на вход  $OM_R$ , не может быть больше минус 40 дБм.

Существует также вероятность спонтанного комбинационного (нестимулированного) излучения, которое также усиливается и является источником шума рамановских усилителей. Это излучение, как и рэлеевское, широкое угловое распределение, поэтому В сторону имеет приема распространяется лишь незначительная его часть.

Коэффициент шума рамановского распределенного усилителя определяется из выражения (с учетом обеих поляризаций)

$$K_{\rm IIIR} = 2 / \ln G_R = \frac{2A_{\rm s}\phi}{g_R P_{\rm H}L},$$

где  $G_R$  определяется из (9.7), откуда следует, что коэффициент шума уменьшается с ростом  $G_R$  или увеличением мощности накачки. Однако с увеличением мощности накачки может возникнуть стоксово излучение, не связанное с сигналом, т. е. паразитное излучение (шум).

На рис. 9.10 представлены кривые зависимости отношения оптических мощностей с/ш от длины усилительного участка для двух случаев – без ВКРусиления и с включенным ВКР-усилением.



Сравнение кривых показывает, что с увеличением длины линии, т. е. затухания сигнала, с/ш без ВКР-усиления линейно уменьшается от 58 дБ до примерно 37 дБ, а при включенном ВКР-усилении с/ш уменьшается медленнее и, начиная, примерно, с 90 км, уменьшение прекращается. При этом защищенность с/ш с включенным ВКР-усилением примерно на 7 дБ выше защищенности с/ш при выключенном ВКР-усилении.

В частности на рис. 9.11 показан оптический спектр ВОСП СРК с 32 – мя загруженными оптическими каналами ПСМ (DWDM), где отмечены защищенность с/ш для волокна LEAF длиной 125 км при двух вариантах усиления:

1) гибридное усиление с каскадом рамановского усиления и усиления КВОУ (EDFA);

2) использован только эрбиевый КВОУ (EDFA).

Из рис. 9.7 видно, что гибридная схема усиления обеспечивает на 4,2 дБ большую защищенность с/ш. Максимальное усиление при этом одинаково, тогда как пороговый пьедестал у гибридной схемы на 4,2 дБ ниже.



с 32 – мя загруженными оптическими каналами

Таким образом, использование ВКР-усилителей в ВОСП совместно с КВОУ существенно увеличивает длину усилительного участка и длину регенерационной секции, позволяет уменьшить число промежуточных КВОУ при одной и той же длине линии либо увеличить общую протяженность ВОЛП при том же количестве промежуточных КВОУ.

9.4.4 Дискретный рамановский волоконно-оптический усилитель

В таких оптических усилителях в качестве накаченного активного оптического волокна АОВ, как среды ВКР-усиления, используется не линейное волокно, а отдельное уложенное в бухту ОМОВ, входящее конструктивно в состав дискретного рамановского ВОУ (см. рис. 9.12). Принцип ВКР-усиления

в таком усилителе полностью совпадает с описанным ранее. Накачка ОМОВ осуществляется рамановским лазером накачки РЛМ. Подключается к волоконно-оптическому тракту такой дискретный рамановский волоконно-оптический усилитель (ДРВОУ) с помощью оптического циркулятора Ц. Групповой линейный оптический сигнал, выделенный циркулятором из линейного тракта, совместно с излучением рамановского лазера накачки РЛН через двухканальный оптический мультиплексор ОМ подается в бухту активного оптического волокна АОВ. Второй конец АОВ подключается к волоконной брэгговской решетке ВБР с переменным периодом. Вследствие этого ВБР селективно отражает составляющие сигналов различных длин волн с разной их временной задержкой (см. рис. 7.16) и осуществляет компенсацию (коррекцию) хроматической дисперсии информационного сигнала.



Рис. 9.12. Схема дискретного рамановского волоконно-оптического усилителя – компенсатора хроматической дисперсии

Как правило, в ДРВОУ используется уложенное в бухту АОВ с повышенной нелинейностью, ввиду малой площади эффективного сечения (малого радиуса сердцевины) и высокой концентрации легирования ее GeO<sub>2</sub>. Такое АОВ обладает отрицательной хроматической дисперсией (DCF). При этом требуется относительно малая длина АОВ – всего порядка трех км. ДРВОУ обеспечивает Применение DCF в эффективное усиление компенсацией хроматической дисперсии импульса, вследствие неоднакового усиления в АОВ как в прямом, так и обратном направлении с участием отраженных различных частотных составляющих в ВБР. Подстройка коррекции импульса осуществляется перестройкой длины волны излучения лазера накачки. которой изменяется характеристика усиления при рамановского ВОУ (см. рис. 9.6).

### 9.5. Пороговые и мультистабильные устройства

Оптические бистабильные или мультистабильные устройства широко применяются в качестве ячеек памяти, логических элементов аналоговых и цифровых преобразователей И т. Д. Для получения бистабильности необходимы нелинейная среда с показателем преломления И (или) коэффициентом поглощения, зависящими от интенсивности падающего излучения и устройства обратной связи, которая может быть как оптической (в

нелинейном резонаторе), так и электрической (в гибридных схемах, содержащих световодные дорожки и металлические токопроводники).

Оптическим бистабильным устройством принято называть устройство, в котором интенсивность выходящего света имеет гистерезисную зависимость от интенсивности входящего, а коэффициент пропускания – два устойчивых значения.

9.5.1 Нелинейный резонатор Фабри-Перо

Одним из первых элементов, в котором наблюдался эффект бистабильности, является резонатор Фабри–Перо, заполненный нелинейной средой, возникающей вследствие обратной связи (рис. 9.13, а).



Рис. 9.13. Блок-схема бистабильных устройств на основе резонатора Фабри–Перо (а) и направленного ответвителя на связанных СВ (б): 1 – электрический усилитель; 2 – фотодетектор; 3 – электрооптический кристалл; 4 – резонатор Фабри–Перо; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – направленный ответвитель; 7 – управляющие электроды

При низкой интенсивности вводимого в резонатор света частота настройки резонатора отличается от частоты падающего лазерного пучка мощностью  $P_{\rm Bx}$ . При этом происходит многократное отражение, которое быстро ослабляет интенсивность, и излучение практически не выходит из резонатора. С увеличением интенсивности лазерного излучения увеличивается показатель преломления кристалла 3 (увеличивается оптическая толщина кристалла), в результате чего частота настройки резонатора становится близкой к частоте лазерного излучения, увеличивается коэффициент прохождения и наступает момент, когда возникает резонанс (рис. 9.14, а).

Соотношение между коэффициентом пропускания T и изменением фазы света показано кривой 1. С другой стороны, семейство прямых 2 показывает зависимость изменения фазы от  $P_{\rm BX}$  (изменение фазы прямо пропорционально показателю преломления). Коэффициенты пропускания для различных мощностей входящего света показывают точки пересечения кривой 1 и совокупности прямых 2. Увеличение интенсивности света соответствует уменьшению наклона прямых 2, и система проходит через состояния A, B, C с

низким коэффициентом пропускания, а из состояния *C* "перескакивает" в состояние *D* с высоким коэффициентом пропускания. Если теперь уменьшать интенсивность света, то система пройдет через состояния *E*, *D*, *F*, а из *F* "перескочит" в *B*. Соответствующая гистерезисная зависимость показана на рис. 9.14, б. Отсюда видно, что при основном освещении система сохраняет состояние "нуль", обозначенное точкой *P*, но под действием дополнительного импульса света она переходит в состояние "единица", обозначенное точкой *Q*. При резком уменьшении основного освещения система вновь возвращается в состояние "0" (точка *P*). Это явление назвали бистабильным оптическим эффектом. Оно может стать основой для хранения одного бита информации.



Рис. 9.14. Характеристика оптического бистабильного элемента: а – нагрузочная; б – кривая гистерезиса, в – характеристики  $I_{\rm Bbix}$  ( $I_{\rm Bx}$ ) при различных значениях  $\Phi_0$  и R

Кроме того с помощью таких перескоков между различными состояниями можно осуществить логические функции И, ИЛИ, НЕ в цифровых и логических оптических системах, регенерацию коротких оптических импульсов. Бистабильный оптический элемент имеет короткое время перехода из одного состояния в другое и потребляет мало энергии.

Коэффициент пропускания нелинейного резонатора Фабри-Перо можно записать в виде

$$T = \frac{I_{\rm BMX}}{I_{\rm BX}} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4\pi \sin^2 \Phi}; \qquad \Phi = \Phi_0 + aI_{\rm BMX},$$

где R – коэффициент отражения от стенки резонатора;  $\Phi_0$  – половина фазового сдвига света после его прохождения через резонатор в прямом и обратном направлениях без вспомогательной обратной связи; а – постоянная. Величина *аІ*<sub>вых</sub> – это изменение фазы, создаваемой электрооптическим приложено электрическое кристаллом, когда К нему напряжение пропорциональное І<sub>вых</sub>. С помощью этого выражения можно построить зависимости I<sub>вых</sub> (I<sub>вх</sub>) для различных значений  $\Phi_0$  и R, в частности представленные на рис. 9.14, в. Из этого рисунка видно, что при соответствующих условиях такое устройство будет обладать бистабильностью, дифференциальным усилением ( $g = dI_{BMX}/dI_{BX}$ ) и оптическим ограничением. Действительно, для некоторых областей входной интенсивности интенсивность на выходе является многозначной величиной и не может быть определена однозначно (гистерезисная кривая рис. 9.14, б). Значение интенсивности на выходе зависит от того, каким путем изменялась интенсивность на входе. Иными словами, выходная интенсивность светового пучка при данной интенсивности на входе зависит от предыстории работы устройства. Переключение между состояниями с высоким и низким коэффициентом пропускания можно осуществлять либо кратковременным увеличением (уменьшением) интенсивности на входе либо изменением напряжения смещения модулятора (см. рис. 9.13, а), так как Ф<sub>0</sub> зависит от напряжения смещения. Особый интерес представляет кривая рис. 9.14, в, соответствующая  $\Phi_0 = 0.6 \pi$ , поскольку она обладает свойствами, характерными для большого дифференциального усиления. Если входная интенсивность оказывается вблизи скачка кривой, то небольшая модуляция входной интенсивности будет приводить к большой модуляции интенсивности на выходе. Существует много других интересных возможностей использования таких устройств, например для формирования импульсов и ограничения мощности.

Резонатор Фабри–Перо не является обязательным элементом бистабильных устройств. Оптическая бистабильность может быть реализована в модуляторах, выполненных в виде интегральной планарной структуры на основе волноводов с электрическим управлением распределенной оптической связью.

Типичная гибридная схема *бистабильного устройства безрезонаторного типа* представлена на рис. 9.13, б. Безрезонаторное устройство выполнено на основе переключателя-ответвителя с распределенной оптической связью.

#### 9.5.2 Нелинейные оптические интегральные схемы

При мультиплицировании отдельных элементов интегральной оптики возможно построение более сложных устройств обработки информации. Так, на основе двух мультиплексоров Маха–Цендера разработан оптический мультивибратор. На рис. 9.15 показана схема интегрально-оптического мультивибратора на основе двух электрооптических переключателей. Время переключения таких устройств не превышает 10<sup>-9</sup> с. В рабочем режиме устойчивые состояния двух переключателей противоположны: один включен так, что пропускание его максимально, а у другого оно минимально. Внешний сигнал изменяет знак обратной связи, тем самым обеспечивая управление соответствующим оптическим бистабильным устройством.



Рис. 9.15. Функциональная схема ИО-мультивибратора и принципиальная схема (электрическая) включения его элементов:  $u_1$ ,  $u_2$  – источники напряжения смещения;  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{22}$  – нагрузочные сопротивления; 1,2 – фотодетекторы

Волноводный интерферометр Маха–Цендера, управляемый электрическими и оптическими сигналами, может найти применение не только как сверхбыстродействующий оптический логический элемент, но и как устройство для кодирования и декодирования оптических цифровых сигналов и для других целей обработки сигналов (рис. 9.16).

ОИС работает следующим образом. На центральный входной CB поступает непрерывная последовательность оптических импульсов, управляющие оптические импульсы подаются на первый или второй входной CB или на оба одновременно. Дополнительно на интерферометр подается напряжение смещения  $U_{\rm cm}$ , обеспечивающее получение сдвига фаз волн между двумя плечами интерферометра и установку нулевого сигнала на его выходе.



Рис. 9.16. Схема логической ОИС с оптическим управлением: 1 – полупроводниковый лазер с синхронизацией мод; 2 – подложка с ОИС; 3 – волноводный интерферометр; 4 – фазосдвигающие электроды; 5 – поляризатор

Каждый оптический управляющий сигнал распространяется только в одном плече интерферометра, изменяя вследствие нелинейности материала показатель преломления СВ. При этом для устранения интерференции между управляющим и управляемым сигналами они должны иметь ортогональные поляризации (например, управляющие – ТЕ, управляемый – ТМ). На выходе интерферометра помещен поляризатор, пропускающий только моду с ТМ поляризацией.

Для нормальной работы ОИС оптические импульсы должны быть соответствующим образом синхронизированы друг с другом. Интенсивность выходного сигнала  $I_{\rm Bbix}$  определяется разностью фаз волн в плечах интерферометра  $\Phi = \Phi_0 + \Delta \Phi$ , определяемой из условия  $I_{\rm Bbix}/I_{\rm Bx} = \cos^2(\Phi/2)$ . Сдвиг фаз  $\Phi_0$  создается постоянным напряжением смещения  $U_{\rm cm}$ , а  $\Delta \Phi$  – управляющими оптическими импульсами, причем  $\Delta \Phi = n_2 k L \Delta I$ , где  $n_2$  – нелинейная добавка к показателю преломления материала CB  $n_1$  ( $n_1 = n_{10} + n_2 I$ ); L – длина области взаимодействия;  $\Delta I$  – разность интенсивности оптических сигналов в плечах интерферометра.

При подаче напряжения смещения ( $\Phi_0 = \pi$ ) и отсутствии управляющих импульсов (или одновременной их подаче) выходной сигнал равен нулю. Если управляющий сигнал поступает только в одно из плечей интерферометра, то при некотором значении  $\Delta I = I$  и при одинаковых длительности и форме синхронизированных во всех каналах оптических импульсов  $\Delta \Phi = \pi$ . В этом случае выходная интенсивность будет равна интенсивности управляемого импульса на входе интерферометра. Таким образом, рассмотренная ОИС выполняет логическую функцию исключающего ИЛИ. Она может работать и как схема И, если сигнальными входами являются входы 1 и 2, а центральный вход не возбуждается.

Такая ОИС может работать в качестве *оптического инвертора*, если на центральный вход подавать непрерывную последовательность оптических импульсов и убрать постоянное напряжение смещения. Сигнал, который необходимо инвертировать, подается на вход 1 или 2, а выходной сигнал появляется только при отсутствии входного сигнала.

Рассмотренная ОИС с оптическим управлением может быть использована для кодирования и декодирования цифровой информации. В этом случае сообщение, которое необходимо передать, подается на один из входов ОИС в виде последовательности импульсов, следующих с малой частотой повторения. На другой вход подается случайная последовательность импульсов с большой частотой повторения, и на выходе ОИС формируется новая последовательность оптических импульсов, представляющая собой закодированный сигнал. При декодировании такого сигнала используется аналогичная ОИС, на входы которой подаются закодированный сигнал и случайная последовательность применявшейся оптических импульсов, аналогичная при кодировании информационного сигнала. На выходе второй ОИС получается первоначальный информационный сигнал в виде последовательности оптических импульсов.

9.5.3 Электрооптический сдвиг частоты и сжатие импульса

Если модулирующее напряжение в схеме рис. 9.13, а изменяется во времени, например, синусоидально, то и нелинейный показатель преломления будет изменяться так же:

$$n(z, t) = n_0(z) + n_2 I(z, t),$$

где I(z, t) – интенсивность плоской волны светового поля частоты  $\omega_0$ , действующего на кристалл резонатора Фабри–Перо.

Фазовый сдвиг проходящего светового поля будет повторять изменение n(z, t) во времени и в пространстве вдоль z:

$$\Phi(z, t) = k_0 n(z, t) = \Phi_0 + a \Phi(t),$$

где а – константа.

Теперь если модулирующее напряжение изменяется во времени, например линейно, то фазовый сдвиг также будет изменяться линейно:

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \delta t,$$

где δ – константа. При этом прошедший световой сигнал можно представить в виде плоской волны

$$E(z, t) = A(t) e^{i(\omega_0 t + \delta t + \Phi_0) - ikz}$$

Эта плоская волна с обобщенной частотой  $\omega'$ , которую можно определить как  $\omega' = \partial \Phi(t) / \partial t = \omega_0 + \delta$ , где  $\Phi(t) -$  полное изменение фазы этой волны.

Такое изменение ω' соответствует фазовой или частотной модуляции.

Если изменять модулирующее напряжение во времени по квадратичному закону, то n(z, t) и  $\Phi(z, t)$  так же будут меняться по квадратичному закону

$$\Phi(t) = \Phi_0 - \alpha t^2$$

где α – константа. При этом световое поле, прошедшее сквозь нелинейный модулятор рис. 9.13, а, запишется в виде

. 
$$E(z,t) = A(t)e^{i(\omega_0 t - \alpha t^2 + \Phi_0) - ikz}$$

Теперь локальная мгновенная частота

$$\omega' = \frac{\partial \Phi(t)}{\partial t} = \omega_0 - 2\alpha t \, .$$

Следовательно, при прохождении лазерного импульса при таком изменении  $\omega'$  наблюдается линейное частотное его уширение на протяжении оптического импульса, проходящего через модулятор. Действительно, если в центре импульса  $\alpha > 0$  и t = 0, то передний фронт импульса будет сдвинут по частоте вверх, а задний фронт импульса – вниз (рис. 9.17).



Рис. 9.17. Чирпинг лазерного импульса

Если импульс распространяется в волокне с дисперсией групповых скоростей и если дисперсия такова, что групповая скорость меняется с частотой линейно, то задняя (низкочастотная) часть импульса может догонять его переднюю (высокочастотную) часть и импульс может быть сжат до минимальной ширины  $(2\alpha\tau)^{-1}$ , где  $2\alpha$  – величина разброса частот. Следовательно, условие сжатия импульса состоит в том, чтобы разность времени распространения передней и задней частей импульса были равны первоначальной длительности импульса  $\tau$ .

## Контрольные вопросы

- 1 Пользуясь учебником [2, раздел 6, формула (6.3)], запишите формулу восприимчивости первого порядка.
- 2 Объясните механизм изменения длительности импульса в процессе его распространения в нелинейном ОМОВ.
- 3 Изменится ли затухание сигналов в нелинейном ОМОВ вследствие рассеяния Рэлея? Если "да", то почему? Как определить суммарное затухание вследствие рассеяние Рэлея в нелинейном ОМОВ?
- 4 Объясните механизм ВКР-усиления оптических сигналов в нелинейном ОМОВ.
- 5 Почему уменьшается уровень шумов в ОМОВ при совместной (гибридной) работе квантового и распределенного рамановского усилителей? Куда уходит мощность шумов, созданных квантовым ВОУ?
- 6 Схема рис. 9.13, а обеспечивает S-образную характеристику зависимости  $P_{\rm Bbix}(P_{\rm BX})$ . Объясните работу этой схемы в роли оптического усилителя, ограничителя, вентиля.
- 7 Какой будет форма импульса на выходе нелинейного резонатора Фабри–Перо, если на вход его подается треугольный импульс?
- 8 Нарисуйте схему оптического мультивибратора и объясните ее работу.
- 9 Нарисуйте схему оптического кодера и декодера и объясните ее работу.

### 10 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОСП С РЕКОРДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Ниже приведен обзор экспериментальных ВОСП с рекордными параметрами.

Компания Nortel Networks (Канада) разработала и провела успешные испытания ВОСП СРК с пропускной способностью 1,28 Тбит/с и дальностью передачи 1000 км. Такая пропускная способность достигнута благодаря 32-мя спектральными каналами мультиплексированию с поканальной скоростью передачи 40 Гбит/с (СТМ-256). Оптический тракт этой системы оконечными пунктами содержит шесть линейных между оптических усилителей. Кроме дискретных эрбиевых КВОУ, в промежуточных пунктах в рабочее волокно типа NZDSF вводится излучение накачки для получения ВКР-усиления. Это излучение распределенного вводится навстречу информационному ГЛОС. Система работает в диапазоне С, который разбит на два поддиапазона: C<sub>1</sub> – с 1-го по 16-й оптический канал и C<sub>2</sub> – с 17-го по 32-й канал.



Рис. 10.1. Конфигурация экспериментальной ВОСП СРК компании Nortel Networks

На рис. 10.1 представлена конфигурация системы. В системе все оптические каналы загружены сигналами СЦИ в коде CS-RZ. Из шести усилительных участков пять участков имеют длину по 160 км и один – 200 км с

затуханием соответственно: 32,1 дБ; 31,5 дБ; 31,9 дБ; 32,0 дБ; 32,3 дБ и 40 дБ. В каждый усилительный участок вводится встречная накачка на длине волны 1427 нм и 1455 нм мощностью 1 Вт (+30 дБм). Ввиду этого около 50 км усилительного участка превращаются в распределенный оптический усилитель. В данной системе эрбиевы усилители имеют невыравненную амплитудночастотную характеристику. Однако, поскольку рамановские усилители обладают АЧХ с противоположным наклоном, в результате частотная характеристика всего оптического тракта становится равномерной.

Фирма Siemens разработала ВОСП СРК с пропускной способностью 7 Тбит/с. Конфигурация этой системы представлена на рис. 10.2. В этой системе оптические сигналы передаются в обе стороны по одному волокну, длина которого 50 км (см. рис. 7.1, д). Передаются 176 спектральных каналов с канальной скоростью СЦИ 40 Гбит/с в диапазонах С и L с межканальным интервалом 50 ГГц. Ввод/вывод групповых линейных сигналов в оптический выполнен с помошью тракт оптических циркуляторов. Мультиплексирование/демультиплексирование выполнено С помощью мультиплексоров (AWG). В оптических системе использованы также разветвители Splitter, оптические электронные мультиплексоры/демультиплексоры – ETDM MUX/DEMUX, перестраиваемые оптические фильтры – BPF, направления передачи обозначены как восточное – Eastbound и западное – Westbound.

Японская корпорация NEC представила ВОСП СРК с рекордной пропускной способностью 10,92 Тбит/с. Такая пропускная способность достигнута передачей 273-х оптических каналов со скоростью 40 Гбит/с в каждом канале. Передача ведется: в диапазоне *S* (1476,81...1508,01 нм) – 85 каналов, *C* (1526,83...1563,05 нм) – 86 каналов и *L* (1570,01...1610,06 нм) – 96 каналов. Общая длина 117 км. Оптический тракт состоит из двух усилительных участков, каждый из которых включает в себя два типа волокон: 40 км волокна PSCF (P – pure, особоочищенное) и 19 и 18 км – волокно с отрицательной дисперсией. Эти волокна используются в качестве активной среды распределенных рамановских усилителей. Для этого вводится излучение накачки на длинах волн 1380 и 1480 нм.

Конфигурация описанной ВОСП СРК представлена на рис. 10.3, где PBS – поляризационный мультиплексор (сумматор);

TDF booster – оптический усилитель передачи на основе активного волокна TDF;

DPA pump sources – источники накачки;

АРС – автоматический поляризационный контроллер;

Filter Top AWG – оптический демультиплексор.



Рис. 10.2. Конфигурация экспериментальной ВОСП СРК компании Siemens



Рис. 10.3. Конфигурация экспериментальной ВОСП СРК компании NEC с рекордной пропускной способностью 10,92 Тбит/с



Рис. 10.4. Конфигурация экспериментальной ВОСП СРК с ультраплотным спектральным мультиплексированием (320 каналов) компании Alcatel По качеству мультиплексированных оптических каналов рекордной является ВОСП СРК, разработанная компанией ALCATEL. Конфигурация этой системы представлена на рис. 10.4.

В двух диапазонах – *С* и *L* передаются 320 оптических каналов с канальной скоростью 10,66 Гбит/с. В системе использованы следующие элементы и устройства:

- PM coupler – волоконно-оптический ответвитель;

– PRBS Generator – генератор цифровых сигналов PRBS;

- *C*+*L* MUX – оптический мультиплексор для диапазонов *C* и *L*.

В оптическом тракте использовано ОМОВ с повышенной очисткой и эффективной площадью модового пятна  $A_{3\phi} = 110$  мкм<sup>2</sup>. Такое волокно допускает введение в линию мощности сигналов +13 дБм. Благодаря большой площади  $A_{ab} = 110$  мкм<sup>2</sup> даже при частотном межканальном интервале 25 ГГц в волокне не возникают нелинейные явления, продукты которых превышают по уровню допустимые пределы. Длина оптического тракта равна 310 км. В тракте отсутствуют промежуточные дискретные ВОУ. Вместо них компенсация энергии сигналов осуществляется малошумящим потерь рамановским распределенным усилением. Для этого в волокно со стороны приема вводится излучение накачки с длинами волн 1360, 1425,1455 и 1485 нм при мощности 3.5 Вт.

Анализ описанных ВОСП СРК с повышенной пропускной способностью показывает, что увеличение длины усилительных участков и всей длины линии достигается благодаря применению эрбиевых ВОУ на передаче и приеме, использованию сверхчистых оптических волокон с минимальным затуханием, а также широким использованием распределенного рамановского усиления в рабочем волокне. Кроме того, в ВОСП компании ALCATEL канальная скорость не 10 Гбит/с, а несколько выше – 10,66 Гбит/с. Избыточное количество битов (0,66 Гбит/с) в данном случае используется для предварительной коррекции ошибок (FEC – Forward Error Correction). FEC применяется в линиях дальней связи, особенно в подводных трансокеанских системах. Метод FEC основан на использовании кода Рида-Соломона. Для иерархии СТМ-64 FEC увеличивает битовую скорость с 9,95 Гбит/с до 10,66 Гбит/с и позволяет получить выигрыш в отношении с/ш на 6 дБ при коэффициенте ошибок 10<sup>-15</sup>. Это значит, что при заданном коэффициенте ошибок (BER – bit error rate) снижается допустимое значение с/ш, что позволяет увеличить количество ВОУ и протяженность регенерационного участка. В [22] приведен расчет для  $BER = 10^{-11}$  при FEC с избыточной информацией 23 % выигрыш по Q-фактору получается равным Q = 8,4 дБ. Полный выигрыш составляет 16,5 – 8,4 = 8,1 дБ. Поскольку скорость в канале возросла на 23 %, то из-за пропорционального расширения полосы частот выросли и шумы, что соответствует вкладу в шум 10lg1,23 = 0.9 дБ. Следовательно, чистый выигрыш по Q-фактору составит 7,2 дБ. Это значит, что, например, если выигрыш по Q-фактору будет даже не 7,2 дБ, а всего 3 дБ, то использование FEC на основе кода Рида-Соломона позволяет уменьшить также и отношение с/ш на 3 дБ при сохранении заданного BER, а это позволяет

в два раза увеличить количество промежуточных оптических усилителей или в два раза увеличить протяженность ВОСП СРК. Выигрыш в 7,2 дБ позволяет увеличить длину ВОСП СРК более чем в пять раз.

На рис. 10.5 представлены конфигурации ВОСП без FEC и с FEC и графики зависимостей оптического отношения мощностей с/ш от длины линии.



Рис. 10.5. Конфигурация ВОСП СРК без FEC и при наличии FEC

Таким образом, внедрение в практику последних достижений волоконнооптических и кванто-оптических технологий, электронного временного мультиплексирования (ETDM) с предельно высокими скоростями передачи, плотное и сверхплотное спектральное мультиплексирование (UDWDM), использование оптических дискретных и рамановских ВОУ и FEC позволили практически снять проблему повышения пропускной способности и дальности передачи в магистральных системах передачи информации.

В настоящее время реализованы или находятся в стадии завершения проекты сверхпротяженных ВОСП СРК:

- Португалия Южная Африка (Кейптаун) 14000 км;
- вокруг Африки, юга Европы и Ближнего Востока 28000 км;
- глобальное кольцо SEA-ME-WE-3 40000 км;

– завершается перевод трансроссийской ВОСП в режим спектрального мультиплексирования – 11000 км.

## Приложение А.1 «Примеры решения задач»

**Пример 1.** Пользуясь [2] и формулой (5.1), определить пределы когерентной (одномодовой) передачи сигналов в оптическом волокне:

а) по размеру сердцевины ступенчатого ОВ при  $V_k = 2,405$ , NA = 0,05, на длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм:

$$2a \le \frac{2,405 \cdot 1,55}{2\pi \cdot 0,05} = 11,87$$
 мкм;

б) по спектру длин волн при 2a = 10 мкм и вышеуказанных данных:

$$\lambda \ge \frac{2\pi \cdot 10 \cdot 0.05}{2.405} \approx 1.31$$
 мкм.

**Пример 2.** Пользуясь табл. 5.1 и формулой (5.13), определить удельную по спектру поляризационную дисперсию импульсных сигналов в изогнутом по спирали стандартном ОМОВ при  $A = p/4\pi R = 0.8$ ; w = r = 9.7 мкм; R = 5.5 мм:

a) при 
$$\lambda = 1330$$
 нм  $M_{xp} = (1330 - 1270) \cdot 0,093 = 5,58$  пс/км·нм;  
 $M_{\Pi} \approx 5,58 \left[ \frac{9700}{55 \cdot 10^5} \cdot \frac{0,64 + 0,8 - 1}{(1 + 4 \cdot 0,64)\sqrt{1 + 0,64}} \right] = 1,38 \cdot 10^{-6}$  пс/км·нм;  
б) при  $\lambda = 1550$  нм  $M_{xp} = (1550 - 1270) \cdot 0,093 = 26,04$  пс/км·нм;  
 $M_{\Pi} \approx 26,04 [2,47 \cdot 10^{-7}] = 6,43 \cdot 10^{-6}$  пс/км·нм.

**Пример 3.** По формулам (3.5) и (3.6) определить ширину спектральной линии колебания в пассивном резонаторе Фабри–Перо на основе кристалла GaAs с n = 3,5 относительно центральной длины волны  $\lambda = 1550$  нм, если отражения от стенок резонатора, расположенных друг от друга на расстоянии L=3,875 мкм, равно R = 0.9; 0.95; 0.995:

$$\Delta \lambda = \frac{1,55^2}{2 \cdot 3,5 \cdot 3,875} \approx 0,886 \text{ мкм};$$
а) при *R*=0,9;  $\delta \lambda = 0,886 \frac{0,1}{\pi \sqrt{0,9}} \approx 2,972 \text{ нм};$ б) при *R*=0,95;  $\delta \lambda = 0,886 \frac{0,05}{\pi \sqrt{0,95}} \approx 1,446 \text{ нм};$ в) при *R*=0,995;  $\delta \lambda = 0,886 \frac{0,005}{\pi \sqrt{0,995}} \approx 0,141 \text{ нм}.$ 

**Пример 4.** Пользуясь расчетами примера 3 и формулой (3.12), определить длительность импульса импульсного лазера  $\tau$  на уровне  $0,5I_m$ , используемого в ВОСП с оптическим временным мультиплексированием, если  $\tau = 1/\Delta\delta$ ,

где  $\Delta\delta$  – ширина частотного спектра излучения, равная  $\frac{c \cdot \delta\lambda}{\lambda^2}$ :

а) при 
$$R = 0.9$$
;  $\tau = \frac{\lambda^2}{c \cdot \delta \lambda} = \frac{1.55^2}{3 \cdot 10^5 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 2.972 \cdot 10^{-3}} = 2.69 \cdot 10^{-12} \text{ c};$   
б) при  $R = 0.95$ ;  $\tau = \frac{\lambda^2}{c \cdot \delta \lambda} = \frac{1.55^2}{3 \cdot 10^5 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 1.446 \cdot 10^{-3}} = 5.54 \cdot 10^{-12} \text{ c};$   
в) при  $R = 0.995$ ;  $\tau = \frac{\lambda^2}{c \cdot \delta \lambda} = \frac{1.55^2}{3 \cdot 10^5 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 1.413 \cdot 10^{-3}} = 5.66 \cdot 10^{-12} \text{ c}.$ 

**Пример 5.** Рассчитать полный частотный спектр  $\Delta f$  оптического CTM-16, импульсного сигнала полученный путем модуляции ПО несущей шириной интенсивности оптической спектра  $\Delta \lambda = 0.1$  HM, электрическим импульсным сигналом спектром  $\Delta F \approx 1,2B$ , где B – битовая скорость передачи, если  $\Delta f = \Delta f_{\rm H} + 2\Delta F$ ,

$$\Delta f_{\rm H} = \frac{c \cdot \Delta \lambda_{\rm H}}{\lambda^2} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 0.1 \cdot 10^{-3}}{1.55^2} = 1.249 \cdot 10^{10} \ \Gamma \text{u};$$
  
$$\Delta F \approx 1.2 \cdot 2.5 \cdot 10^9 = 3 \cdot 10^9 \ \Gamma \text{u};$$
  
$$\Delta f_{\rm H} = 1.249 \cdot 10^{10} + 2 \cdot 3 \cdot 10^9 = 18.49 \cdot 10^9 \ \Gamma \text{u}.$$

**Пример 6.** По формуле (6.6) с учетом примера 5, подсчитать мощность спонтанных шумов, создаваемых волоконно-оптическим усилителем с усилительной способностью g = 20дБ, на центральной частоте 31-го оптического канала (см. табл. 7.1).

$$n_0 = 101g \frac{2\pi \cdot 1,05 \cdot 10^{-34} \cdot 193,1 \cdot 10^{12}}{10^{-3}} + 101g(18,49 \cdot 10^9) + 20 + 3 = 1001g(18,49 \cdot 10^9) + 20 + 3 = 1000g(18,49 \cdot 10^9) + 1000g(18,49 \cdot 10^9) + 20 + 3 = 1000g(18,49 \cdot 10^9) + 1000g(18,49 \cdot$$

= -193,105 + 100,267 + 20 + 3 = -69,84 дБм.

**Пример 7.** Приведем методику и пример расчета длин усилительных  $L_y$  и регенерационных  $L_p$  участков ВОСП-СРК по затуханию и шумам ВОУ при следующих исходных данных.

Предположим, что по *k*-тому оптическому каналу с центральной длиной волны  $\lambda_k = 1550,2$  нм ( $f_k = 193,4 \cdot 10^{12}$  Гц) планируется передавать оптический цифровой поток СТМ-16 со скоростью  $B_k \approx 2,5$  Гбит/с. В этом же ОМОВ типа NZDSF в каждом оптическом канале по 100 ГГц будет передаваться, допустим, всего 32 потока по 2,5 Гбит/с каждый на расстояние около 1000 км.

Для расчета максимально допустимого значения затухания на усилительный участок [ $\alpha L_y$ ] по формуле (7.4) выберем следующие параметры:  $\alpha_{\text{рос}} = 0.2$  дБ;  $\alpha_{\text{вв}} = 0.1$  дБ;  $p_3 = 4$  дБ;  $K_{\text{ш}} = 5.5$  дБ;  $\alpha = 0.3$  дБ/км; допустимое

значение отношения мощностей [с/ш] = 20 дБ; строительную длину ОК, равную 2 км; ПОМ с шириной спектра излучения  $\Delta \lambda_{\rm HK} = 0,1$  нм ( $\Delta f_{\rm HK} = 12,5$  ГГц); спектр информационного сигнала  $\Delta F \approx 1,2$  В = 3 ГГц. Следовательно, спектр оптического сигнала в рассматриваемом *k*-том оптическом канале при этом равен  $\Delta f_k = \Delta f_{\rm HK} + 2\Delta A = 18,5$  ГГц.

По рис. 9.4 определяется максимально допустимая мощность на передаче на оптический канал, огрниченная четырехволновым смешением в NZDSF ОМОВ при количестве одновременно занятых каналов, равном 32 (штриховая линия), и при дальности передачи 1000 км. Этому соответствует  $P_{\rm M, don} \approx 0.15$  мВт ( $p_{\rm M, non} \approx -8.24$  дБм).

Из (7.4) видно, что, в зависимости от числа N, ВОУ изменяются также: допустимое значение затухания  $[\alpha L_y]$  в пределах усилительных участков  $L_y$ , а также число сварных соединений волокон S. Подставив известные вышеуказанные численные значения параметров ВОСП-ОК в формулу (7.4), получим:

$$L_{y} = \frac{1}{0,3} (-8,24 - 2 \cdot 0,2 - 0,1S - 4 - 101g \frac{2,1\pi \cdot 10^{-34} \cdot 193,4 \cdot 10^{12}}{10^{-3}} - 101g 18,5 \cdot 10^{9} - 5,5 - 20 - 101g N) = \frac{1}{0,3} (29,5 - 0,1S - 101g N).$$
(7.4a)

Разрешить уравнение (7.4 а) с тремя неизвестными можно следующим образом.

Положим вначале S = 0. Тогда при N = 1 получим  $L_y \approx 98,3$  км. На такой длине, следовательно, необходимо будет уложить как минимум, 50 строительных длин ОК и смонтировать 49 муфт. Поэтому слагаемое 0,1S = 4,9 дБ. Вводя это значение в числовое уравнение (7.4,а), вновь разрешаем его относительно  $[L_y]$ . Получаем при этом  $[L_y] = 82$  км. Аналогично, варьируя значения N, строим графическую зависимость  $L_y$  от N (см. рис. А.1.)

Пример 8. Если сократить спектр оптического канала от 100 до 50 ГГц, при указанных в примере 7 параметрах ВОСП, то, в соответствии с (7.4), при этом изменяется только  $P_{\rm M \, don}$  по рис. 9.4 от минус 8,24 дБм до минус 10 дБм, что приводит к укорочению всех длин  $L_y$  рис. А.1 на величину  $[-8,24-(-10)]/0,3 \approx 5,7$  км.



Рис. А.1. Зависимость длин усилительных участков от числа N ВОУ на заданной длине сбалансированной линии 1000 км при вышеуказанных параметрах ВОСП

**Пример 9.** Рассчитать по формуле (7.5) длину регенерационного участка по дисперсии импульсного оптического сигнала СТМ-16, передаваемого по оптическому каналу, параметры которого приведены в примере 7. ВОЛП построена на основе ОК с волокнами типа NZDSF<sup>+</sup> (см. табл. 5.1).

Хроматическая дисперсия в указанном оптическом канале определяется по формуле

$$M_{\rm xp} = (\lambda_{\rm k} - \lambda_0) tg\phi = (1550, 2 - 1480) \cdot 0, 1/(1530 - 1480) = 0, 14 \,{\rm nc/км\cdot hm},$$

где tg $\phi$  – наклон дисперсионной характеристики в точке $\lambda_0$ , определен по данным табл.5.1.

$$L_{\rm pg} = \frac{1}{4 \cdot 0, 1 \cdot 0, 14 \cdot 10^{-12} \cdot 2, 5 \cdot 10^9} = 712,25 \, \rm km.$$

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ДСТУ 3256-95. Системи передавання волоконно-оптичні: терміни та визначення.
- 2 Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П. Оптические системы передачи: [Учебник для вузов]. К.: Техніка, 1994. 388 с.
- 3 Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
- 4 Шереметьев А.Г. Когерентная волоконно-оптическая связь. М.: Радио и связь, 1991. 192 с.
- 5 Макаров Т.В. Анизотропия изогнутых волоконных световодов // Труды УНИИРТ. 1995. № 1. С. 103–106.
- 6 Макаров Т.В. Поляризующие свойства напряженных волоконных световодов // Информатика и связь. К.: Техніка, 1995. С.18 23.
- 7 Макаров Т.В. Метод определения волн в изогнутых световодах // Праці УНДІРТ. 1996. № 1 (5). С. 82–91.
- 8 Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980. 656 с.
- 9 Макаров Т.В. Передаточные характеристики изогнутых волоконных световодов // Праці УНДІРТ. 1998. № 1 (13). С.13–23.
- 10 Макаров Т.В. Скрученный волоконный световод для когерентной передачи сигналов // Праці УНДІРТ. 1998. № 1 (13). С. 24–30.
- 11 Макаров Т.В., Зазулин А.Е. Оптическое волокно, обеспечивающее поворот плоскости поляризации, и способ его изготовления. Авт. свид. СССР № 1812541.
- 12 Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966. – 476 с.
- 13 Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Радио и связь, 1998. 267 с.
- 14 Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П. Проживальский О.П. Проектирование волоконно-оптических систем передачи: учеб. пособие. Одесса, 1991, 1996, 1999. 118 с.
- 15 Иванов А.Б. Волоконная оптика. М.: Syrus, 1999. 672 с.
- 16 Макаров Т.В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах. Ч. 1 и 2 // Праці УНДІРТ. 2004. № 2 (38). С. 23–34.
- 17 Макаров Т.В., Жуков С.А. Малошумний волоконно-оптичний підсилювач. Патент України № 6342 від 16.05.2005 р. БЮЛ. № 5.
- 18 Zyskind J.L., Giles C.R., Simpson J.R, Digiovanni D.J. Erbium-doped fiber amplifier technology.// Trends in Telecommunications. 1993. Vol. 8, № 3. Pp. 37–42.
- 19 Макаров Т.В. Пространственно-поляризационные процессы в спиральных одномодовых ВС // Праці УНДІРТ. 2005. № 4 (44). С. 37–40.
- 20 Макаров Т.В. Одномодовый волоконно-оптический поляризатор. Патент України № 11917 від 16.01.2006 р. БЮЛ. № 1.

- 21 Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки инфомации. М.: Радио и связь, 1990. 225 с.
- 22 Скляров О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. Ч. 1 и 2. М.: СОЛОН–Р, 2001.
- 23 Макаров Т.В. Динамика и структура изломов волоконных световодов.// Электросвязь. – 1995. – № 9. – С. 1–5.
- 24 Макаров Т.В., Макарова И.М. Взаимосвязь АЧХ и ФЧХ компонентов волоконно-оптических систем // Радиотехника. М.: Радио и связь, 1991. № 4. С. 12–18.

# оглавление

	3
предисловие	5
1 КОГЕРЕНТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ, СИГНАЛЫ И СИСТЕМЫ	
ПЕРЕДАЧИ	8
2 ТРЕБОВАНИЯ ПО КОГЕРЕНТНОСТИ К КОМПОНЕНТАМ И	
СИГНАЛАМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА	11
З ИСТОЧНИКИ КОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	14
3.1 Спонтанное излучение	14
3.2 Функции и типы оптических резонаторов	17
3.3 Процессы колебаний в активном резонаторе	19
3.4 Модуляционные частотне характеристики	23
3.5 Температурные характеристики	24
3.6 Шумы и управление ими	24
3.6.1 Модуляционные шумы интенсивности	25
3.6.2 Шумы частотной модуляции	29
3.7 Лазерный диод с распределенной обратной связью	30
3.8 Лазерный диод с распределенным брэгговским отражением	32
3.9 Лазеры с внешними резонаторами	33
3.9.1 Монолитная конструкция внешних резонаторов	34
3.9.2 Внешние подвижные резонаторы лазеров	35
3.10 Импульсные лазеры	41
4 ОДНОКАНАЛЬНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	
ПЕРЕДАЧИ	44
4.1 Прямая модуляция источника излучения	45
4.2 Модулятор Фабри–Перо	48
4.2.1 Модуляция интенсивности	49
4.2.2 Фазовая модуляция	51
4.3 Модулятор Маха–Цендера	52
4.4 Модулятор на связанных световодах	54
4.5 Электроабсорбционный модулятор	55
4.6 Одноканальный прием оптических сигналов	57
4.7 Регенератор оптических цифрових сигналов	58
4.8 Основные оптические интерфейсы ВОСП-ОК	59
4.9 Недостатки донокональных некогерентних ВОСП-ОК	66

	С.
5 ОДНОМОДОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА И КАБЕЛИ	
ДЛЯ КОГЕРЕНТНЫХ ВОСП	68
5.1 Изотропные одномодовые оптические волокна	68
5.1.1 Стандартное оптическое волокно	69
5.1.2 Одномодовые волокна со смещенной хроматической	
дисперсией	69
5.1.3 Всеволновое одномодовое оптическое волокно	74
5.1.4 Недостатки осесиметричных оптических волокон	75
5.2 Онополяризационные оптические волокна с метрической	
анизотропией	76
5.3 Спиральные одномодовые оптические волокна	80
5.3.1 Анизотропия изогнутых оптических волокон	80
5.3.2 Поляризующие свойства спиральных оптических волокон	82
5.3.3 Дисперсия сигналов в спиральных оптических волокнах	86
5.3.4 Поляризационная дисперсия сигналов при связи волн	90
5.3.5 Оптимальная укладка волокон в оптический кабель	94
5.3.6 Оптические волокна с упорядоченной вращающейся	
микроструктурой стекла	97
5.3.7 Одномодовый волоконно-оптический поляризатор	101
6 ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ	105
6.1 Полупроводниковые оптические усилители	105
6.1.1 Усилители Фабри–Перо	106
6.1.2 Усилители бегущей волны	108
6.2 Квантовые волоконно-оптические усилители	109
6.2.1 Принцип работы квантового ВОУ	109
6.2.2 Накачка квантовых ВОУ	111
6.2.3 Энергетические характеристики квантовых ВОУ	114
6.3 Шумы квантовых волоконно-оптических усилителей. Меры борьбы	
с ними	116
6.4 Применение оптических усилите лей	119
6.5 Малошумящий волоконно-оптический усилитель	122
6.6 Допустимое число квантовых ВОУ на регенерационном участке	126
6.7 Волоконные лазеры	129
	C.
--	-----
7 МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	
ПЕРЕДАЧИ	133
7.1 Волоконно-оптические системы передачи со спектральным	
мультиплексированием	133
7.2 Частотный план оптических каналов	139
7.3 Волоконно-оптические системы передачи с разреженным	
спектральным мультиплексированием	141
7.4 Характеристики серийных ВОСП СРК	142
7.5 Компоненты ВОСП СРК	144
7.5.1 Оптический транспондер	145
7.5.2 Оптические мультиплексоры/демультиплексоры	146
7.5.2.1 Малоканальные ОМ/ОД	147
7.5.2.2 Многоканальные ОМ/ОД	148
7.5.2.3 Оптические мультиплексоры ввода/вывода	152
7.5.2.4 Оптические циркуляторы	155
7.6 Передача и прием оптических групповых линейных сигналов	
ВОСП СРК	156
7.6.1 Формирование групповых линейных оптических сигналов	
ВОСП СРК	156
7.6.2 Прием оптических сигналов ВОСП СРК	158
7.6.2.1 Демультиплексирование групповых линейных оптических	
сигналов	158
7.6.2.2 Прямое детектирование канальных оптических сигналов	160
7.6.2.3 Гетеродинный прием оптических сигналов ВОСП СРК	161
7.7 ВОСП с оптическим временным мультиплексированием	163
7.8 ВОСП с оптическим поляризационным мультиплексированием	164
7.9 Определение длин усилительных и регенерационных участков	
ВОСП СРК по затуханию и шумам КВОУ	165
7.10 Определение длины регенерационного участка ВОСП СРК по	
дисперсии	167
7.11 Компенсация дисперсии на регенерационном участке	168
8 ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ ВОСП СРК	171
8.1 Коммутаторы оптических каналов	171
8.2 Оптические волновые конвертеры	173
8.3 Архитектура полностью оптических сетей	174

		C.
9	НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ	
TP.	АКТЕ	177
	9.1 Самофокусирование, фазовая само- и кросс-модуляции	177
	9.2 Вынужденные неупругие рассеяния	180
	9.3 Четырехволновое смешение	181
	9.4 Рамановские волоконно-оптические усилители	186
	9.4.1 Принцип работы рамановских усилителей	186
	9.4.2 Реализация рамановского распределенного усиления в ОМОВ	188
	9.4.3 Шумы в волоконно-оптическом тракте с рамановским	
	усилением сигналов	191
	9.4.4 Дискретный рамановский волоконно-оптический усилитель	193
	9.5. Пороговые и мультистабильные устройства	194
	9.5.1 Нелинейный резонатор Фабри–Перо	195
	9.5.2 Нелинейные оптические интегральные схемы	198
	9.5.3 Электрооптический сдвиг частоты и сжатие импульса	200
10	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОСП С РЕКОРДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.	203
	Приложение А. 1 (примеры решения задач)	210
	Список использованной литературы	214

Учебное издание

Макаров Терентий Варфоломеевич

## КОГЕРЕНТНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Учебник

Редактор И.В. Ращупкина

Издательство ОНАС им. А.С. Попова (свидетельство ДК № 3633 от 27.11.2009 г.)

Сдано в набор 12.06.09. Подписано к печати 2.03.10. Формат 60х90/16. Тираж 500. Усл. печ. л. 16,35. Заказ № 4072. Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии Одесской национальной академии связи им. А.С. Попова г. Одесса, ул. Старопортофранковская, 61 Тел. (048) 720-78-94