

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

## **Лазерные информационные системы**

Научно-образовательный модуль  
в системе дистанционного обучения MOODLE

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка интерактивных дистанционных курсов по дисциплинам «Лазерные информационные системы», «Устройства генерирования и формирования сигналов», «Биологические системы и технологии»  
Соглашение № 1/29 от 03.06.2013 г.

УДК 621.375.8(075)+004.9(075)  
Г859

Автор-составитель: **Гришанов Владимир Николаевич**

**Лазерные информационные системы** [Электронный ресурс] : Научно-образовательный модуль в системе дистанционного обучения MOODLE / Министерство образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. В. Н. Гришанов. - Электрон. текстовые и граф. дан. (6,9 Мбайт). - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Модуль предназначен для подготовки по дисциплине «Лазерные информационные системы» бакалавров направления 200500.62 «Лазерная техника и лазерные технологии» в 8 семестре и 201000.62 «Биотехнические системы и технологии» в 7 семестре, магистров 210400.68 «Радиотехника» очное отделение В семестр.

Модуль разработан на кафедре лазерных и биотехнических систем.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

# ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ОПТОВОЛОКОННЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

## Введение

Если посмотреть на историю развития оптической связи, то можно отметить, что человек применял оптические сигналы для передачи информации на большие расстояния еще во времена первобытной цивилизации. Днем он использовал для этого, например, дымовые сигналы или отраженный солнечный свет, а ночью – сигнальные огни. На протяжении столетий вплоть до изобретения флажковой сигнализации в конце 18-го столетия, по-видимому, использовались только сигнальные огни. Со временем они были заменены флажковой сигнализацией и проблесковыми сигнальными лампами на море. Современная эра оптической связи началась с разработки теории квантового генератора (1954 г.), а затем и создания первых лазеров (1961 г.).

В 1966 г. вышла статья Као и Хокэма, в которой излагалась идея ВОЛС. Основная причина, сдерживающая практическую реализацию этой идеи, заключалась в большом затухании сигнала в оптическом волокне (ОВ). В то время лучшие стекла обладали минимальными потерями в видимой области спектра – порядка 1000 дБ/км (Оптическое пропускание слоя стекла километровой толщины  $T = 10^{-100}$ ). Главный тезис Као и Хокэма сводился к тому, что если бы удалось уменьшить затухание в видимой или ближней ИК области спектра до 20 дБ/км ( $T = 0,01$ ), то стало бы возможным создание практических ВОЛС. Производители стекла во главе с американской фирмой «Корнинг» (Corning) нашли пути удаления примесей из материала волокна и достигли требуемого уровня потерь в 1970 г., а к 1975 г. уменьшили их до 2 дБ/км ( $T = 0,63$ ). Японские исследователи опубликовали результаты по получению рекордно малых потерь в волокне, а именно 0,5 дБ/км (коэффициент пропускания  $T = 0,9$ ) в 1976 г. и 0,2 дБ/км (коэффициент пропускания  $T = 0,96$ ) в 1979 г. К 1980 г. многие фирмы уже выпускали волокно с потерями менее 10 дБ/км ( $T = 0,1$ ), были созданы надежные

источники оптического излучения и фотодетекторы. С этого времени во всех странах с развитой сетью связи стали проводить всесторонние испытания ВОЛС, создавать оптические системы связи и быстро внедрять их в традиционные, сложившиеся к тому времени телефонные сети.

Еще в начале 50-х годов прошлого века научились делать тонкие гибкие стеклянные волокна, способные передавать световые потоки по криволинейным траекториям. Эти волокна объединялись в жгуты и использовались в приборостроении для подсветки труднодоступных мест, для преобразования геометрии поперечного сечения светового пучка, для передачи световых изображений в эндоскопах, для математических действий со световыми потоками. Дело было не только и не столько в низкой прозрачности волокон, самое главное – не было источника излучения, который смог бы запустить мощный луч в тончайшее волокно. От электрической лампочки в это волокно входила лишь ничтожная доля потока. И только изобретение лазера с высокой направленностью его излучения кардинально изменило ситуацию. Возникновение ВОЛС резко ускорило развитие полупроводниковых лазеров. Появились высокоэффективные фотоприемники, сверхскоростные микросхемные схемы обработки фотосигналов.

Начиная с 2000 г. в мире почти все вновь вводимые магистральные линии связи являются волоконно-оптическими, средняя длина регенерационного участка волоконно-оптической передачи (ВОСП) достигает 100 км, а скорость передачи на одномодовых волокнах – 0,5...2 Гбит/с. Темпы роста мирового рынка волоконной техники опережает темпы роста по другим видам техники и составляют 40 % в год.

В настоящее время на многих коммерческих линиях используется скорость передачи 565 Мбит/с и ожидается переход на более высокие скорости – 2,5 Гбит/с и выше. По таким волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) можно одновременно организовать от 7680 до 30000 телефонных каналов со скоростью передачи 64 кбит/с. Наиболее часто ВОЛС работают на

длинах волн 0,85, 1,3 и 1,55 мкм. Если обратиться к третьему спектральному окну шириной примерно 140 нм на длине волны 1,55 мкм, то в нем можно разместить до 740 спектральных каналов при разносе частот между ними 24 ГГц и скорости передачи 2,4 Гбит/с в каждом. Это соответствует суммарной скорости передачи 1,5 Тбит/с или 23 млн. телефонных каналов. Возможность наращивания скоростей передачи в уже проложенном оптоволоконном канале – одна из причин интенсивного строительства ВОЛС. Вторая причина – экономическая эффективность ВОЛС по сравнению с другими системами передачи, т.к. чем больше каналов содержит линия, тем меньше стоимость одного канала.

(Длине волны в вакууме 1,55 мкм соответствует частота 193548,387 ГГц. Разнесение на 24 ГГц вверх дает длину волны 1,54981 мкм и, следовательно, отстройку на 0,189 нм по длинам волн.)

Быстрое и широкое внедрение ВОЛС обусловлено следующими факторами:

возможностью получения оптоволокон с низкими значениями затухания и дисперсии, что позволяет увеличить расстояние между ретрансляторами;

малым диаметром оптоволоконного кабеля, допустимостью сильного изгиба световода, низкой стоимостью материала световода;

малой массой оптического кабеля при высокой информационной пропускной способности;

возможностью получения оптоволокон, не обладающего электропроводностью и индуктивностью. Это означает, что передаваемые по кабелю сигналы не подвергаются электромагнитным воздействиям. Кроме того, конечная аппаратура может быть электрически изолирована друг от друга и при случайном повреждении кабеля не нарушается скрытность связи. Эти достоинства имеют особое значение при необходимости обеспечения связи между аппаратурой, находящейся под высоким напряжением и в

пространстве, где существуют значительные электромагнитные помехи или потенциально взрывоопасном;

пренебрежимо малые перекрестные помехи;

высокая скрытность связи: ответвление сигнала возможно только при непосредственном подсоединении к отдельному оптоволокну;

гибкость в реализации требуемой полосы пропускания: световоды различных типов позволяют заменять электрические кабели в цифровых системах связи всех уровней иерархии;

возможность постоянного усовершенствования системы связи по мере появления источников излучения, оптоволокон и фотоприемников с улучшенными характеристиками или при повышении требований к ее характеристикам при полном сохранении совместимости с другими системами связи.

Не следует сбрасывать со счетов и открытые лазерные системы передачи информации через атмосферу и, конечно, космическое пространство, где альтернативы лазерным системам связи немного.

## **1. Оптоволокно**

Устройство, ограничивающее область распространения оптических колебаний и направляющее поток световой энергии в заданном направлении, называют оптической средой распространения или световодом. На основе световодов с малым коэффициентом затухания создаются оптические кабели (ОК), предназначенные для передачи оптических сигналов на значительные расстояния. Отрезки световодов используются для построения оптических устройств: активных (генераторов, усилителей, модуляторов и т.п.) и пассивных (ответвителей, мостов, соединителей и т.п.)

Различают два вида световодов: плоские и волоконные. Плоские (планарные) световоды, в свою очередь, подразделяют на пленочные (рис. 1, а) и каналные (рис. 1, б). Волоконные световоды бывают однослойные (рис.

2, а), двухслойные (рис. 2, б), трехслойные (рис. 2, в) и т.д. Однослойные волокна применяются редко из-за большого неустранимого затухания на боковой поверхности, поскольку точные решения уравнений Максвелла предсказывают частичный выход за сердцевину и распространение части энергии электромагнитной волны по оболочке. Поэтому требования к затуханию для слоя, граничащего с сердцевиной те же, что и для самой сердцевины.

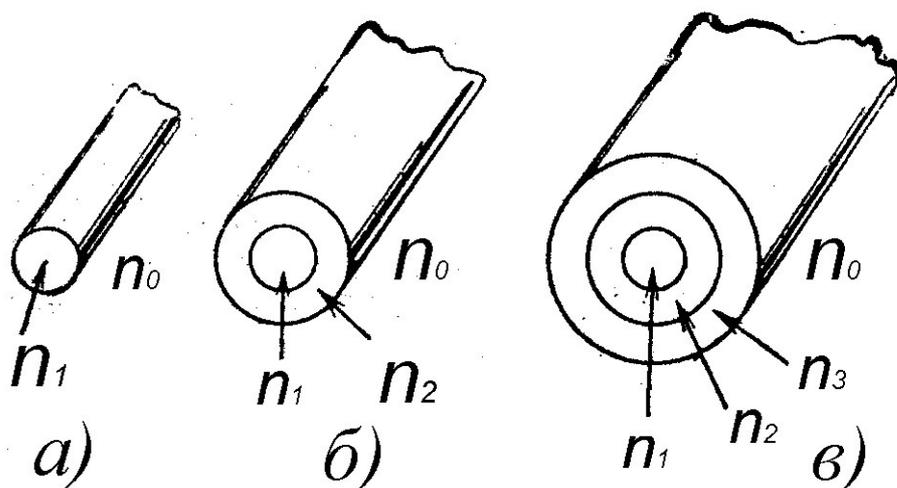
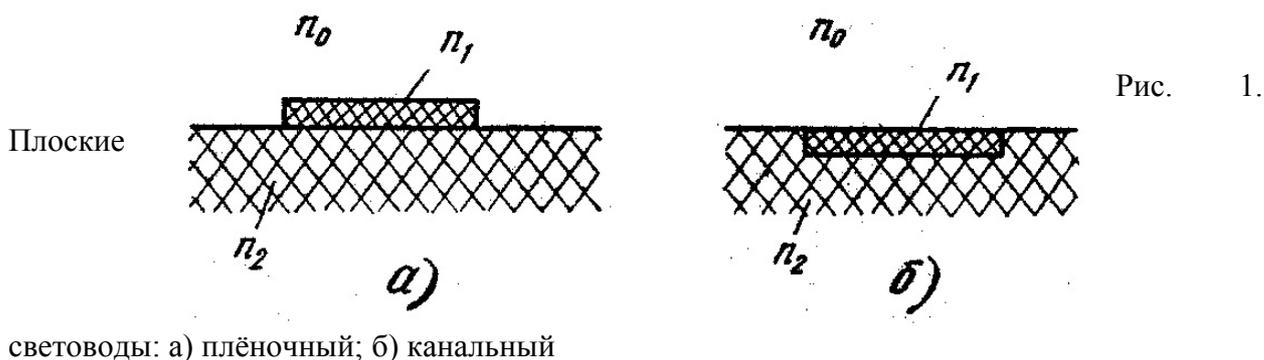


Рис. 2. Волоконный световод: а) однослойный световод; б) двухслойный световод; в) трёхслойный световод

Существует два типа волокон: со ступенчатым (рис. 3, а) и плавным, или градиентным (рис. 3, б), изменением профиля показателя преломления  $n$ . Передача электромагнитной энергии по двухслойному волокну в лучевом

приближении представлена на рис. 4. Лучи света входят в сердцевину волокна с торца и удерживаются внутри нее за счет полного внутреннего отражения на границе между сердцевиной и оболочкой в оптоволоконках со ступенчатым профилем показателя преломления либо за счёт плавного искривления траектории.

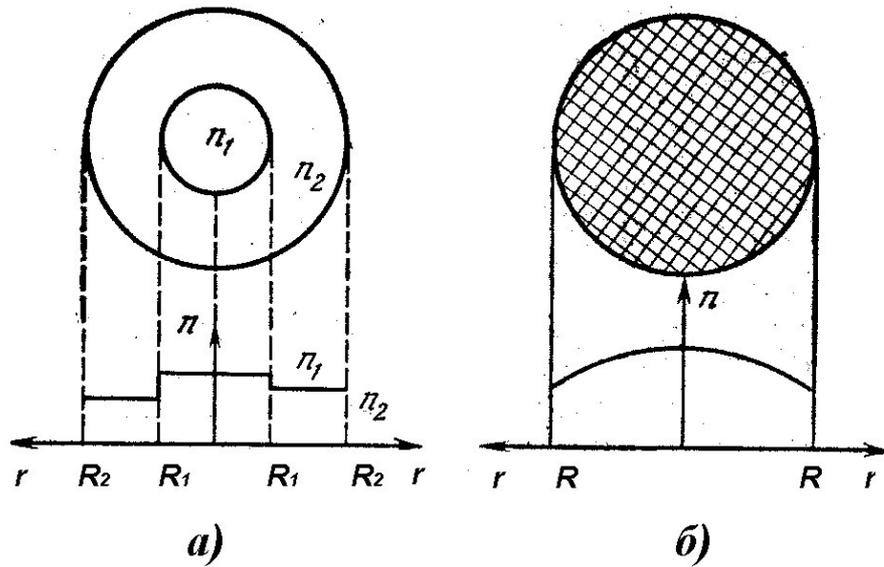


Рис. 3. Волоконный двуслойный световод: а) со ступенчатым профилем показателя преломления; б) с плавным профилем показателя преломления (градиентное оптоволокно)

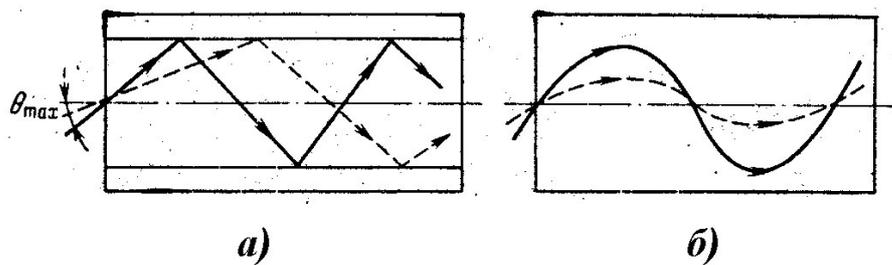


Рис. 4. Лучевой принцип распространения электромагнитной энергии по ступенчатому а) и градиентному б) оптоволоконкам

Максимально возможный угол  $\theta_{max}$ , при котором входящие в волокно лучи еще испытывают полное внутреннее отражение, определяет номинальную числовую апертуру оптоволоконка. Апертурные лучи заполняют весь конус, вершина которого совпадает с точкой, идеализированно

представляющий излучатель, а угол при вершине равен удвоенному углу  $\theta_{max}$ . Иногда апертурные лучи называют направляемыми или контролируемыми, а внеапертурные – вытекающими. Для оптоволокна со ступенчатым профилем показателя преломления связь числовой апертуры со значениями показателей преломления сердцевины и оболочки выводится из закона преломления (рис. 5).

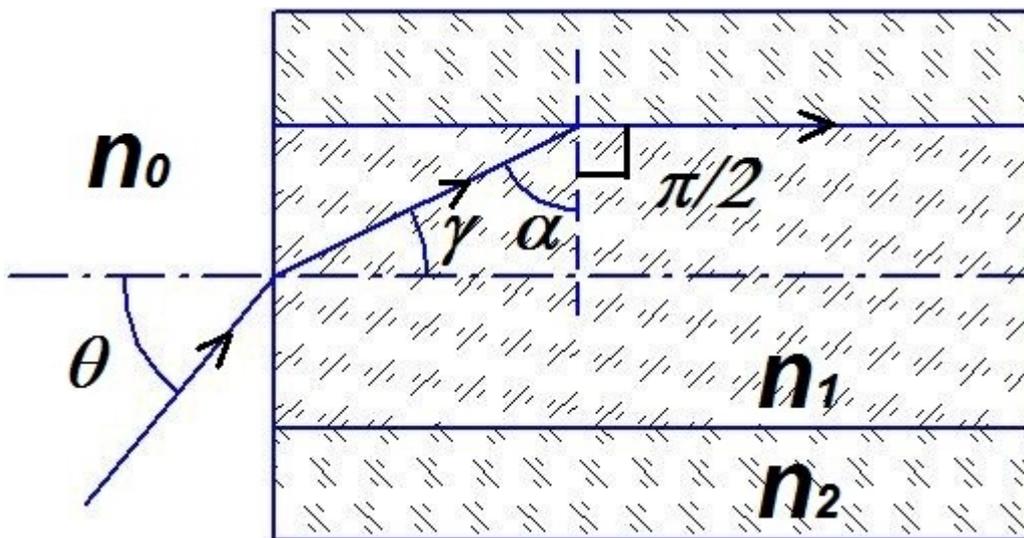


Рис. 5. Изображение падающего и преломленного лучей в оптоволокне

Из закона преломления и с привлечением рис. 5 можно вывести некоторые формулы, связывающие числовую апертуру с материальными параметрами оптоволокна. В формулах  $n_1$  - коэффициент преломления сердцевины и  $n_2$  - коэффициент преломления оболочки и  $n$  – коэффициент преломления воздуха:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \frac{n_1}{n} \quad (1)$$

Т.к.  $n = 1$  (для воздуха), то формула (1) примет следующий вид:

$$\sin \theta / \sin \gamma = n_1 \quad (2)$$

Предельный угол на границе раздела между сердцевиной и оболочкой определяется выражением:

$$\sin \alpha = n_2 / n_1 . \quad (3)$$

Из (2) выражаем  $\sin \gamma$ :

$$\sin \gamma = \frac{\sin \theta}{n_1} . \quad (4)$$

Далее воспользуемся некоторыми формулами из геометрии и тригонометрии. Для прямоугольного треугольника, образованного падающим на границу между сердцевиной и оболочкой лучом, осью и радиусом сердцевины, будем иметь:

$$\alpha = 90^\circ - \gamma . \quad (5)$$

Откуда:

$$\sin(90^\circ - \gamma) = \cos \gamma . \quad (6)$$

Используем основное тригонометрическое тождество:

$$\sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma = 1 , \quad (7)$$

а из (3) и (6) получаем:

$$\cos \gamma = n_2 / n_1 \quad (8)$$

Подставив (4) и (8) в (7), получим

$$\frac{\sin^2 \theta}{n_1^2} + \frac{n_2^2}{n_1^2} = 1 . \quad (9)$$

Далее выражаем  $\sin^2 \alpha$ :

$$\sin^2 \theta = n_1^2 \left( 1 - \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) = n_1^2 - n_2^2 , \quad (10)$$

наконец

$$NA = \sin \theta_{max} = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(n_1 - n_2) \cdot (n_1 + n_2)} \approx \sqrt{(n_1 - n_2) \cdot 2n_1} \approx \theta_{max} . \quad (11)$$

Для типовых значений  $n_1$  и разности  $(n_1 - n_2)$ ,  $NA \approx 0,2$  и  $\theta_{max} \approx 13^\circ$ .

Мало ввести световой импульс в волокно. Необходимо, чтобы пробежав отмеренную длину, этот импульс а) не очень уменьшился и б) не

расплылся, т.е. не потерял до неузнаваемости свой первоначальный вид. Как только начали изготавливать волокна, сразу же занялись измерением потерь светопропускания – основного параметра, характеризующего их качество. Потери, отнесенные к единице длины волокна, определяются по формуле

$$B = (1/L) \cdot 10 \cdot \lg(P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}}) \quad [\text{дБ/км}], \quad (12)$$

где  $L$  – длина измеряемого участка;  $P_{\text{вх}}$  – мощность излучения на входном торце оптоволокна, а  $P_{\text{вых}}$  – мощность излучения на выходном его торце. (Иногда вместо обозначения [дБ/км] используют [дБм/км], подчёркивая тем самым, что речь идёт об отношении не напряжений или токов, а мощностей.) Если вспомнить определение привычного для оптиков коэффициента пропускания  $T$ , то

$$T = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} = 10^{-(B L / 10)}. \quad (13)$$

Если, например,  $L = 1$  км,  $P_{\text{вх}} = 1$  мВт и  $P_{\text{вых}} = 10$  мкВт, то  $B = 20$  дБ/км, а если при тех же условиях  $P_{\text{вых}} = 500$  мкВт, то  $B = 3$  дБ/км, т.к.  $\lg 2 = 0,301$ .

Первые же исследования двухслойных кварцевых волокон показали, что величина потерь пропускания не является константой, а зависит от длины волны используемого излучения, причем немонотонно, а на этой зависимости присутствуют максимумы и минимумы (рис. 5).

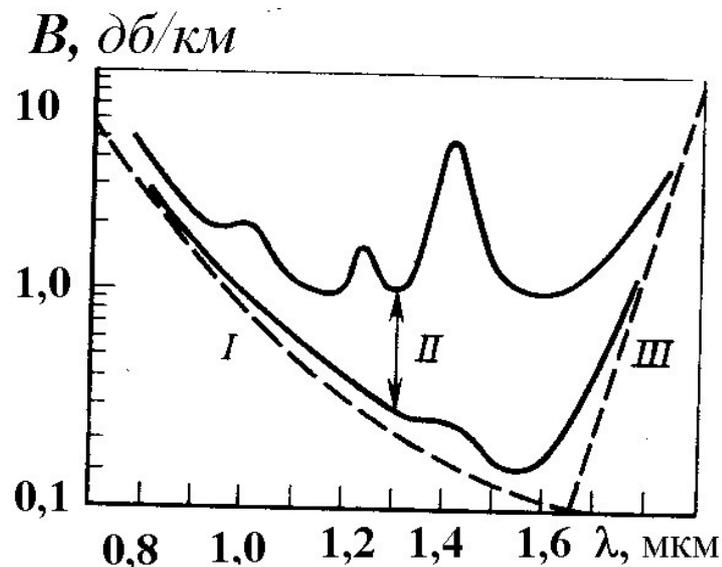


Рис. 6. Оптические потери в волоконных световодах типа «кварц-кварц»: I – область потерь на рэлеевское рассеяние; II – потери в волокне различных производителей; III – граница ИК поглощения в кварце

Исследователями быстро и успешно была расшифрована эта кривая. Например, выяснилось, что абсолютное значение  $B$  (во всех местах вдали от резких пиков) очень чувствительно к наличию ничтожных количеств таких примесей, которые создают в кварце так называемые центры окраски. Это главным образом медь, никель, железо, хром, марганец. Естественно, что были найдены и промышленные способы очистки от этих примесей (на рис. 6 представлена уже «очищенная» кривая).

Оставшиеся пики потерь пропускания обусловлены поглощением света водой, точнее, гидроксильными группами ОН, а от присутствия воды в кварце избавиться полностью не удастся. Но этот механизм поглощения носит четко выраженный резонансный характер: на некоторых определенных длинах волн он очень значителен, а на участках спектра между ними может практически отсутствовать. Именно те участки спектра – «окна прозрачности», где поглощение гидроксильных групп отсутствует, и используются в оптоволоконных линиях связи. Это длины волн в областях 0,85, 1,3 и 1,55 мкм.

Остаточная часть спектральной кривой пропускания представляет собой монотонно спадающую кривую, подчиняющуюся зависимости  $B \sim 1/\lambda^4$ . Она обусловлена рассеянием на мельчайших неоднородностях материала волокна, которое принципиально неустранимо. Химическая формула кварца  $\text{SiO}_2$ , и как бы аккуратно он не затвердевал после расплавления, в одном месте будет чуть больше кремния, а в другом больше кислорода. Принципиально неустранимые фундаментальные потери рассеяния, называемые рэлеевскими, определяют теоретический предел прозрачности кварцевых волокон и всех других оптических материалов.

Как только все механизмы потерь в световодах были поняты, так сразу же и на практике подошли к теоретически предельной кривой – уже к середине 70-х годов 20-го века на  $\lambda = 0,82$  мкм достигли 2,5 дБм/км, а в диапазоне  $\lambda = 1,3 \dots 1,55$  мкм  $B = 0,4 \dots 0,14$  дБм/мкм. В этих цифрах очень наглядно проявляется очень резкая зависимость рэлеевских потерь от длины волны.

Повышение прозрачности оптоволокон имеет ясно понимаемую конечную цель – увеличение длины отрезка волокна, по которому можно передать оптический импульс без опасения, что он полностью затухнет. Если же длина линии связи больше длины такого отрезка, то через определенные расстояния в нее приходится врезать ретрансляторы, назначение которых состоит в усилении ослабленных сигналов и восстановлении их формы. Современная связная аппаратура может восстановить сигнал, ослабленный на 40...80 дБм ( $T = 10^{-4} \dots 10^{-8}$ ).

Потери мощности не единственная неприятность при передаче световых сигналов. Импульс может почти без ослабления пройти через отрезок оптоволокон, но при этом так исказить свою форму, что никакая электроника его не распознает. Иными словами, кроме амплитудных, могут быть еще и временные или частотные искажения передаваемого сигнала. Расплывание, уширение светового импульса вызвано дисперсией.

Различают межмодовую и внутримодовую или частотную дисперсии. Межмодовая дисперсия связана с различием скоростей распространения отдельных мод. Происхождение межмодовой дисперсии для ступенчатого оптоволокон наглядно видно из рис. 4, а. Пути, пройденные лучами 1 и 2, падающими под разными углами на входной торец и, соответственно, на границу раздела сердцевины и оболочки с входа на выход, будут различны и как следствие импульс расплывается. Количественная характеристика этого процесса – временная постоянная волноводной дисперсии  $\tau_{вол}$  – рассчитывается из простых геометрических соотношений. В предположении  $n_1 > n_2$  и  $n_1 \approx 1,5$  для ступенчатых волокон  $\tau_{вол} \approx NA^2$  (мкс/км). Для типичных

значений  $NA \approx 0,2$   $\tau_{вол} \approx 40$  нс/км, что для длинных линий существенно ограничивает скорости передачи. Уменьшение  $NA$  хотя и ведет к уменьшению  $\tau_{вол}$ , но резко снижает вводимую в волокно мощность  $P_{вх}$  из-за снижения апертурного угла  $\theta_{max}$ , который при  $NA \approx 0,2$  имеет значение  $\theta_{max} \approx 13^\circ$ . Величина обратная временной постоянной волноводной дисперсии называется обобщенной полосой пропускания  $B_n$  [МГц·км]. Эти величины связаны со скоростью передачи информации соотношением:

$$v_{инф} \approx 0,25 / (\tau_{вол} L) = 0,25 B_n / L. \quad (14)$$

Одно из решений проблемы состояло в переходе от ступенчатых оптоволокон к оптоволоконкам, показатель преломления в которых плавно изменяется от центра к периферии. Такие оптоволоконки получили название градиентных. Ломаные линии лучей превращаются также в плавные кривые. Распространяясь по разным траекториям, два луча, упавшие в одну точку торца световода под разными углами, пройдя некоторое расстояние, вновь встречаются в одной точке – и так многократно по всей длине волокна, т.е. световод обладает свойством самофокусировки лучей. В градиентных волокнах осевой луч все время распространяется в области максимальной оптической плотности, а значит, с минимальной скоростью. Луч, распространяющийся по криволинейной траектории, проходит в среде с меньшей оптической плотностью, т.е. его скорость распространения выше. Поэтому получается, что при различии длин путей время их прохождения может быть одинаковым, надо только подобрать нужный закон изменения показателя преломления  $n$  от расстояния от центра оптоволоконки  $r - n(r)$ . Обычно распределение  $n(r)$  задается степенным законом:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \left( \frac{r}{r_{сер}} \right)^m}, \quad (15)$$

где  $n_1$  – максимальное значение показателя преломления сердцевины;  $n_2$  – показатель преломления оболочки;  $r_{сер}$  – радиус сердцевины, т.е. значение

радиуса, на котором показатели преломления сердцевины и оболочки сравниваются;  $m$  – показатель степени.

Параметрами волокна, влияющими на межмодовую дисперсию, являются показатели преломления сердцевины и оболочки и показатель степени  $m$ . Оптимальное значение, максимизирующее полосу пропускания, для волокна из кварцевого стекла  $\text{GeO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$   $m = 2$ , т.е. оптимально параболический спад показателя преломления от центра сердцевины к ее периферии.

Малейшее отклонение распределения  $n(r)$  от оптимального могут резко уменьшить этот максимум более чем на порядок. Поэтому при изготовлении градиентных многомодовых волокон с большой шириной полосы пропускания необходим точный контроль технологии вытяжки волокон, чем и обусловлена их высокая стоимость. На рис. 7 показана зависимость обобщенной полосы пропускания  $B_n$  как функции показателя степени распределения при  $n_1 - n_2 = 0,02$ . Из рис. 7 видно, что при отклонении показателя степени  $m$  от 2 всего на 0,05 значение  $B_n$  уменьшается почти на порядок. Все же по сравнению со ступенчатым оптоволокном в градиентном оптоволокне межмодовая дисперсия уменьшается в десятки и сотни раз, а ее теоретический предел характеризуется значением  $\tau_{\text{гол}} = 15$  пс/км. Именно градиентное волокно практически повсеместно использовалось в ВОЛС 70-х годов 20-го века.

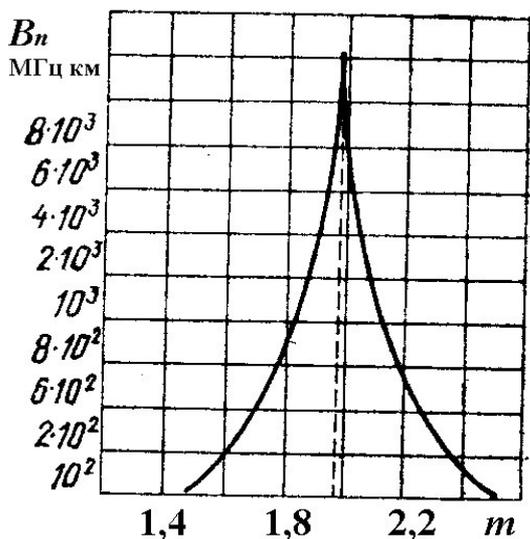


Рис. 7. Зависимость ширины полосы пропускания градиентного волокна от значения показателя степенной зависимости показателя преломления

Естественно, что принципиальная возможность подавления межмодовой дисперсии заложена в использовании одномодовых световодов. Практическому применению одномодовых световодов в ВОЛС способствовало, во-первых, разработка их теории с выводом о конечности их числовой апертуры, хотя и существенно меньшей, чем у многомодовых волокон ( $\theta_{max} \approx 5...7^\circ$ ), во-вторых, появление одномодовых полупроводниковых лазеров, излучение которых может эффективно закачиваться в одномодовое волокно.

Для реализации одномодового режима необходим компромисс между диаметром и разностью показателей преломления. Большой диаметр сердцевины требует малой разности показателей преломления, но облегчает ввод основной моды и позволяет увеличить допуски при соединении и сращивании волокон. Однако малая разность показателей преломления при этом приводит к тому, что волокно слабо направляет основную моду и становится очень чувствительным к нерегулярным изменениям структуры. Такие изменения световолокна, например кривизна оси круглого цилиндра, связывают основную моду с полем излучения, вызывая потери мощности в защитную оболочку.

Большая разность показателей преломления приводит к более эффективному каналированию основной моды. Однако соответствующий малый размер сердцевины и малый диаметр моды в такой сердцевине делают трудным возбуждение основной моды с достаточной эффективностью и накладывают жесткие допуски на соединение и сращивание волокон.

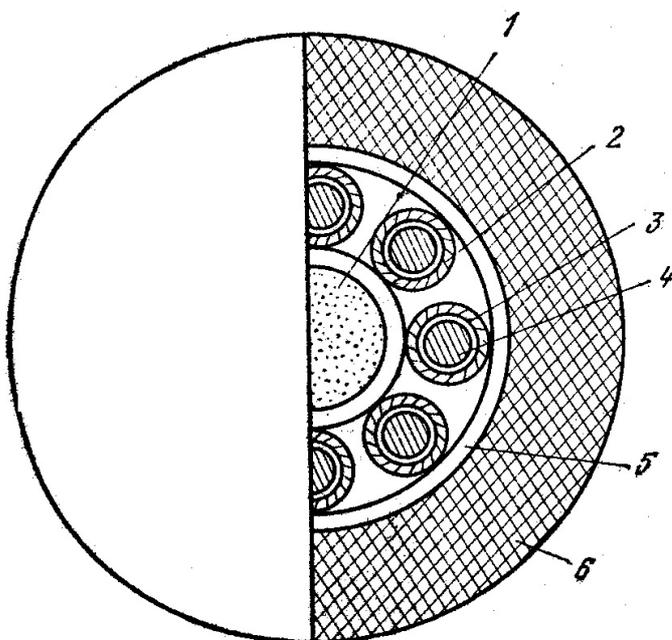
В одномодовых волокнах со ступенчатым показателем преломления поле основной моды глубоко проникает в оболочку и приблизительно 20 % всей мощности распространяется в оболочке. Поэтому толщина оболочки и ее прозрачность должны быть достаточными, чтобы предотвратить увеличение потерь, обусловленных поглощением и эффектами «выхода мод» в защитное покрытие. Для обеспечения пренебрежимо малого значения таких

дополнительных потерь толщина оболочки должна на порядок превышать радиус сердцевины.

Отличительными особенностями одномодовых волокон стали малый диаметр сердцевины (3...10 мкм), малая числовая апертура ( $NA \approx 0,12$ ) и разность показателей преломления ( $\Delta n \sim 0,003...0,005$ ). Межмодовая дисперсия в таких волокнах вообще отсутствует, что снижает временную постоянную волноводной дисперсии до  $\tau_{вол} = 10$  пс/км.

В одномодовых волокнах временная постоянная волноводной дисперсии обусловлена внутримодовой (частотной) дисперсией. Она связана с зависимостью скорости распространения оптического сигнала от его частоты (длины волны). Эта материальная дисперсия и ограничивает максимальные скорости передачи информации по оптическому волокну. Здесь переход к  $\lambda = 1,3...1,55$  мкм также позволяет минимизировать внутримодовую дисперсию, т.к. материальная дисперсия кварца на  $\lambda = 1,27$  мкм равна нулю, а при продвижении в длинноволновый диапазон остается очень малой.

В индустрии связи оптические волокна объединяются в оптические кабели (ОК). По конструкции волокон различают ОК с моноволоконными (рис. 8) и со жгутами. В области техники связи применяются только моноволоконные. В зависимости от материала, используемого для изготовления ОВ, могут быть ОК типа «кварц-кварц» (сердцевина и оболочка ОВ из кварца) и «кварц-полимер» (сердцевина ОВ из кварца, а оболочка полимерная). Для линейных



кабелей связи используются ОВ только типа «кварц-кварц».

Рис. 8. Оптический кабель ОК-50 для городских сетей: 1 — центральный силовой элемент; 2 — упрочняющие нити; 3 — оболочка

оптоволокна; 4 – оптоволокно; 5 – скрепляющие пластмассовые ленты или нити; 6 – полиэтиленовая оболочка

По назначению ОК связи разделяются на городские, зонавые и магистральные. В зависимости от условий прокладки различают стационарные и линейные ОК. Линейные ОК, в свою очередь, делятся на кабели, предназначенные: для прокладки в канализации и коллекторах, в грунт; для подвески на опорах и стойках; для подводной прокладки. В зависимости от материала первичного защитно-упрочняющего покрытия ОВ различают кабели с полиэтиленовым, полиамидным, силиконовым и эпоксиакрилатным покрытиями. В настоящее время в линейных ОК используются в основном ОВ с эпоксиакрилатным покрытием, а в стационарных ОК – с полиэтиленовым. ОК выпускаются на длины волн 0,85, 1,3 и 1,55 мкм. На рис. 8 показано поперечное сечение оптического кабеля ОК-50. Стальной трос, с одной стороны, служит силовым элементом, а с другой, позволяет осуществлять поиск зарытого в грунт кабеля при его ремонте.

## 2. Оптические пассивные устройства

В состав волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для ее нормального функционирования входят разнообразные оптические пассивные устройства: ввода и вывода оптического сигнала, соединители, ослабители, изоляторы, поляризационные контроллеры, разветвители (ответвители, мультиплексоры, демультиплексоры) и фильтры. Общими для всех этих устройств являются следующие параметры: коэффициент стоячей волны, вносимое затухание, рабочий диапазон длин волн, допустимый уровень мощности.

1. Коэффициенты стоячей  $k_{св}$  и бегущей  $k_{бв}$  волн определяют степень согласования устройства с оптическим трактом. Они связаны с коэффициентом отражения  $\rho$  следующим соотношением:

$$k_{св} = 1/k_{бв} = (1 + |\rho|)/(1 - |\rho|), \quad (16)$$

где  $|\rho| = (P_{отр}/P_{пад})^{1/2}$ ;  $P_{отр}$  и  $P_{пад}$  - мощности отраженной и падающей волн соответственно. При идеальном согласовании отражённая волна отсутствует, т. е.  $P_{отр} = 0$ ,  $\rho = 0$  и  $k_{св} = k_{бв} = 1$ . Рассогласование приводит к дополнительным потерям и искажениям передаваемого сигнала.

2. Вносимое затухание  $a$ , дБ, определяется логарифмом отношения мощностей на входе  $P_{вх}$  и выходе  $P_{вых}$  оптического устройств

$$a = 10 \cdot \lg(P_{вх} / P_{вых}). \quad (17)$$

Вносимое затухание обусловлено поглощением, рассеянием и отражением оптических волн или света.

3. Рабочим называют диапазон длин волн  $\lambda_{min} \dots \lambda_{max}$  или диапазон частот  $f_{min} \dots f_{max}$ , в котором основные параметры устройства не выходят за пределы, заданные техническими условиями.

4. Допустимым считают тот уровень мощности, при котором либо основные параметры не выходят за пределы, заданные техническими условиями, либо не происходят необратимые явления. Не исключено, что при прохождении сигнала мощностью выше допустимого уровня устройство

выйдет из строя. Другие параметры для конкретных устройств определяются исходя из их функционального назначения.

Устройства ввода и вывода излучения должны обеспечивать передачу максимально возможной мощности от источников света в световод и из световода в фотоприемник. Конструкция указанных устройств определяется характеристиками как излучателей и фотоприемников, так и световодов.

Светодиоды могут быть с низкой яркостью и большой площадью излучения (типичные значения  $S = 0,2...5,6 \text{ мм}^2$ ) и, наоборот, с высокой яркостью и малой излучающей поверхностью. Последние (а также инжекционные лазеры) можно непосредственно присоединить к световоду в стык.

Потери на ввод излучения в многомодовый световод (МС)

$$\alpha_{\text{из}} = \eta + A_{\text{отр}} + A_{\text{и}}, \quad (18)$$

где  $\eta = 10 \cdot \lg(P_{\text{и}} / P_{\text{св}})$  - эффективность ввода, дБм; (дБм - децибелы мощности)  $P_{\text{и}}$  - мощность источника излучения, Вт;  $P_{\text{св}}$  - мощность, введенная в световод, Вт;  $A_{\text{отр}}$  - потери за счет отражения, дБм;  $A_{\text{и}}$  - потери на излучение на длине установления стационарного состояния мод, дБм. Наилучшее и стабильное согласование источника излучения с оптоволоконном достигается за счет покрытия поверхности источника излучения четвертьволновым просветляющим слоем с  $n_{\text{ч}} = (n_{\text{и}} \cdot n_{\text{св}})^{1/2}$  и заполнением зазора иммерсионной жидкостью с  $n_{\text{св}}$ . При этом потери на отражение пренебрежимо малы.

Одной из проблем ввода излучения в одномодовое оптоволоконно является несовпадение распределений полей излучаемой лазером волны и основной моды оптоволоконна. Это несовпадение требует, чтобы устройство ввода было выполнено с большой степенью точности.

Одним из наиболее перспективных устройств ввода является коническое устройство (рис. 9). При больших диаметрах торцевой поверхности конуса (1... 2 мм) могут появиться моды высших типов. С целью

их исключения между торцом конуса и лазером вводится фазокорректирующий элемент - сферическая линза. Такое устройство обладает эффективностью порядка 1,6...2,2 дБ ( $T = 0,692...0,603$ ).

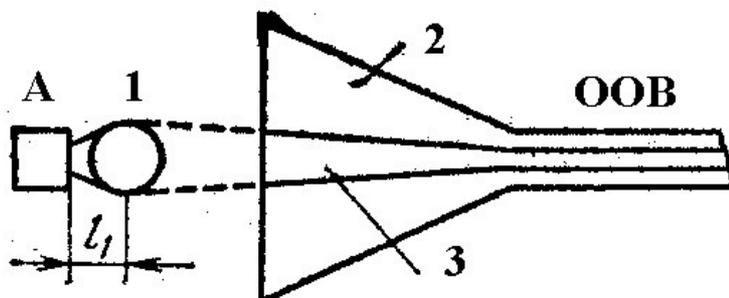


Рис. 9. Устройство ввода излучения: А – источник излучения; ООВ – одномодовое оптоволокно; 1 – сферическая линза; 2 – оптический конус; 3 - сердцевина

Соединители должны обладать малым вносимым затуханием и высокой степенью согласованности. Соединители подразделяются на неразъемные и разъемные. *Неразъемные соединители* жестко фиксируют друг с другом два световода. *Разъемный соединитель* допускает многократное разъединение и соединение и имеет в своей конструкции некоторый механизм сцепления. Все типы соединений должны быть достаточно простыми как для сборки соединения, так и для его ремонта.

Существует множество способов соединения световодов. Рассмотрим только несколько из них. Одним из самых распространенных способов неразъемного соединения световодов является использование прецизионных втулок или трубок, выполняемых обычно из стекла (рис.10). Вносимое затухание соединителя составляет 0,29 дБ ( $T = 0,935$ ). *Неразъемное соединение*, выполненное с применением пластин с канавками (рис. 11), обеспечивает вносимое затухание на уровне 0,5 дБ ( $T = 0,891$ ). Концы сращиваемых волокон обычно склеиваются, они могут также соединяться с помощью электродуговой сварки. На рис. 12 показан штеккерный разъемный

соединитель. После соединения штыревая и гнездовая части фиксируются гайкой с накаткой.

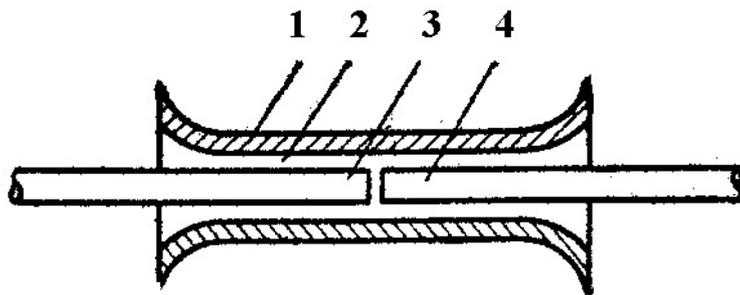


Рис. 10. Соединение волокон с помощью стеклянной втулки: 1 – втулка; 2 – отверстие для заливки склеивающего компаунда; 3, 4 – соединяемые

волокна

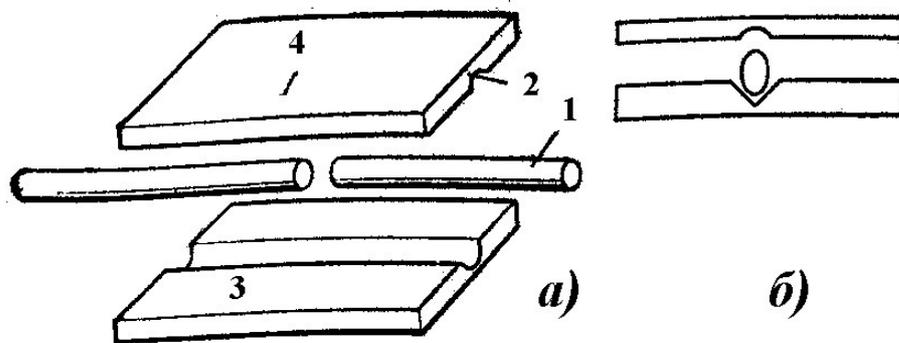


Рис. 11. Неразъемное соединение волокон с помощью пластин с канавкой круглой (а) и V-образной форм: 1 – волокно; 2 – канавка; 3 – пластина; 4 - крышка



Рис. 12. Разъемное штекерное соединение оптоволокон

Оптические изоляторы и вентили пропускают свет в одном направлении с малым затуханием и практически не пропускают свет в обратном направлении. Дополнительными параметрами изоляторов являются затухание в обратном направлении  $a_{обр}$  и вентиляльное отношение  $B_e = a_{обр} / a_{пр}$ .

Изоляторы исключают влияние отражения прямого излучения на частоту и амплитуду сигналов, генерируемых полупроводниковыми лазерами и другими источниками. Одним из способов реализации оптических изоляторов является использование эффекта Фарадея, т. е. вращения плоскости поляризации оптического луча, распространяющегося в оптически активных средах, находящихся под действием магнитного поля. В диапазоне длин волн 1,2...4,5 мкм такими средами являются кристаллы редкоземельных гранатов, обладающих очень хорошим пропусканием и экстремально высоким удельным фарадеевским вращением плоскости поляризации на единицу длины кристалла.

На рис. 13 показан принцип работы оптического изолятора на фарадеевском ротаторе (ФР). Поляризаторы пропускают свет только при определенной поляризации, показанной на рис. 13, ротатор осуществляет поворот плоскости поляризации на  $45^\circ$ . Угол поворота не зависит от направления движения света, поэтому при обратном направлении свет на выходе поляризатора имеет горизонтальную поляризацию и, следовательно, поляризатор с вертикальной поляризацией его не пропустит.

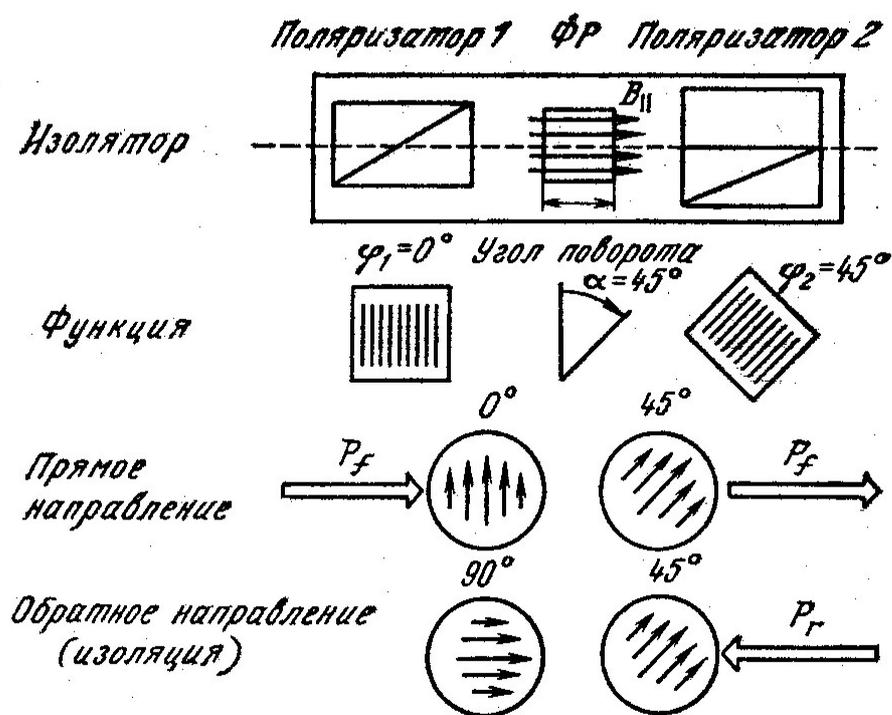


Рис. 13. Оптический изолятор с фарадеевским ротатором

Изоляторы с ФР имеют вносимое затухание порядка 0,8 дБ ( $T = 0,832$ ) степень изоляции  $a_{обр} \approx 40$  дБ ( $T = 10^{-4}$ ). В оптических гетеродинных приемниках необходимо устройство контроля состояния поляризации - поляризационные контроллеры, которые так же могут быть выполнены с применением ФР.

Оптические аттенюаторы, или ослабители, характеризуются теми же параметрами, что и соединители. Только у соединителей вносимое затухание должно быть минимальным, а у аттенюатора оно имеет разную величину. Различают фиксированные и регулируемые аттенюаторы. У последних вносимое затухание измеряется в пределах от  $a_{min}$ , до  $a_{max}$ . В качестве фиксированных аттенюаторов могут использоваться устройства, аналогичные соединителям и оптическим ответвителям. Регулируемые аттенюаторы могут быть выполнены на основе ФР по аналогии с фарадеевскими аттенюаторами, применяемыми в волноводной технике.

Оптические разветвители (ответвители), являющиеся обязательным элементом ВОСП, подразделяют на *селективные* (чувствительные к длине волны) и *неселективные*. Первые применяют для объединения (или разъединения) сигналов с различными оптическими несущими и называются *мультиплексорами* (и *демультиплексорами* соответственно). Вторые используются для разветвления оптической мощности при наличии большого числа оконечных устройств в линии связи, подключения шины данных в ЭВМ, в оптических системах телевидения и т. п. Мультиплексоры и демультиплексоры должны иметь малое вносимое затухание и обеспечивать существенную развязку (изоляция) между каналами. Работа указанных устройств может основываться на трех чувствительных к длине волны эффектах: угловой дисперсии, интерференции и селективном поглощении. В демультиплексорах, показанных на рис. 14, *а*, *б*, используется угловая дисперсия решетки и призмы соответственно. На рис. 14, *в* изображена конструкция для разделения каналов с помощью интерференционного фильтра, а на рис. 14, *г* - структура поглощающего типа, используемая как демультиплексор. Каждый поглотитель состоит из чувствительного к длине волны фотодиода. Устройства с решеткой и призмой (см. рис. 14, *а*, *б*) являются делителями с параллельным разделением каналов, а устройства с фильтрами и селективными фотодетекторами (рис. 14, *в*, *г*) - делителями с последовательным разделением каналов.

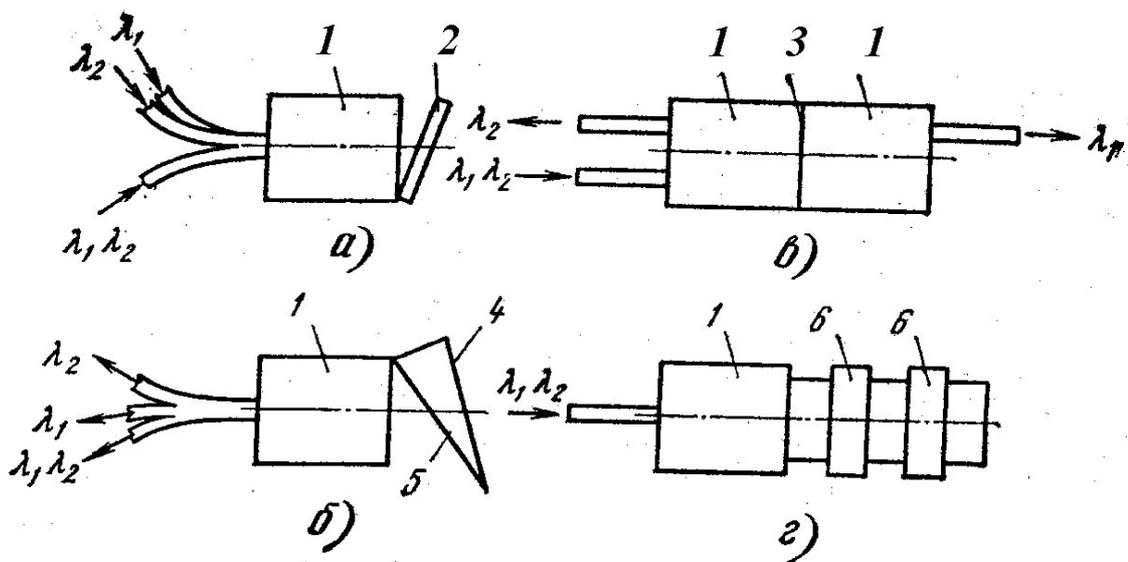


Рис. 14. Селективные мультиплексоры и демультиплексоры: 1 – градиентная цилиндрическая линза; 2 – дифракционная решётка; 3 – хроматический фильтр; 4 – отражающее покрытие; 5 – призма; 6 – селективные фотодетекторы

Неселективные разветвители подразделяют на два основных типа: *T-образные*, построенные по принципу ответвления конечных устройств от главного ствола линии, и *звездообразные*. Потери при распределении мощности излучения в системе с T-образными соединителями возрастают пропорционально числу ответвлений, а в системе со звездообразными ответвителями - пропорционально логарифму числа конечных устройств. Поэтому в системах с большим числом ответвлений целесообразно применение звездообразных устройств.

По своей конструкции разветвители разделяют на две основные группы - *биконические*, в которых излучение передается через боковую поверхность, и *торцевые*, в которых излучение передается через торец. В обеих группах излучение может передаваться либо при непосредственном контакте световодов, либо через вспомогательные элементы - зеркала, линзы, смесители. В биконических разветвителях свет может быть извлечен через боковую поверхность при преобразовании направляемой моды в моду излучения или при связи со вторым световодом через исчезающее поле (рис.

15). Аналогично биконическим ответвителям могут быть реализованы ответвители на планарных структурах.

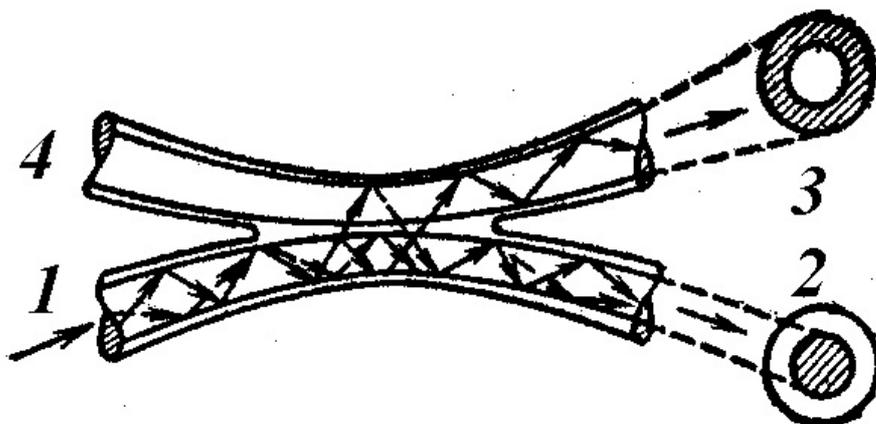


Рис. 15. Биконический разветвитель через затухающее поле

Из разветвителей торцевого типа наиболее распространены такие, в которых торцы выходных световодов непосредственно состыковываются с торцом входного световода и закрепляются каким либо механическим способом или заливаются каплей клея. Изменяя взаимное положение торцов сердечника и подбирая их поперечное сечение (рис. 16), можно изменять в широких пределах отношение мощностей в разных каналах.

Оптические разветвители характеризуются как общими для всех оптических устройств параметрами, так и специфическими параметрами: переходным ослаблением, развязкой (изоляция) плеч и направленностью.

На рис. 15 иллюстрируется работа идеального направленного ответвителя, когда при возбуждении плеча 1 сигнал проходит только в одно плечо 3 вспомогательного световода. В реальном ответвителе во вторичном световоде сигнал появляется в обоих плечах. Направленность  $D$  определяется логарифмом отношения мощностей в плечах 3 и 4 при возбуждении со стороны плеча 1:

$$D = 10 \cdot \lg (P_3 / P_4) \quad (19)$$

В идеальном случае  $P_4 = 0$  и  $D = \infty$ . Реально считается приемлемой величина  $D \geq 20$  дБ ( $T = 10^{-2}$ ).

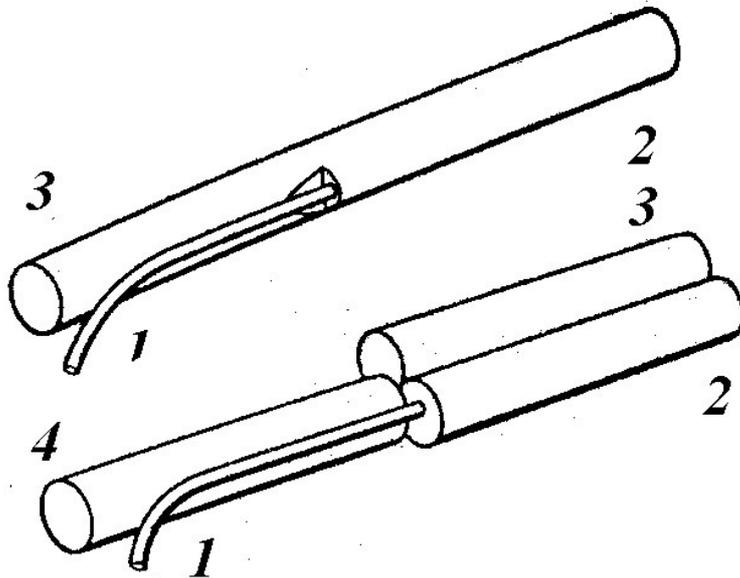


Рис. 16. Разветвители торцевого типа: 1 – входное оптоволокно; 2, 3, 4 – выходные оптоволокна

Переходное ослабление (ослабление на отвод) определяется логарифмом отношения мощностей - поступающей в ответвитель и ответвленной:

$$a_n = 10 \cdot \lg (P_1 / P_3). \quad (20)$$

Переходное ослабление теоретически можно сделать любой величины: от 0 до  $\infty$ . Последнее соответствует отсутствию связи между световодами. Величина переходного ослабления определяется его функциональной ролью. Направленный ответвитель с  $a_n = 3$  дБ ( $T = 0,5$ ) называют *мостом*. В плечи 2 и 3 моста проходят равные по мощности сигналы  $P_2 = P_3$ .

Развязкой или изоляцией плеч, например, 1 и 4 называют следующую величину:

$$a_p = 10 \cdot \lg (P_1 / P_4). \quad (21)$$

Изоляция плеч  $a_p > D$  и  $a_p > a_n$ .

Звездообразный ответвитель, показанный на рис. 17, состоит из цилиндрического корпуса со стеклянным смесительным стержнем 1. Один из концов смесительного стержня представляет собой сферическое зеркало 2, на другой конец нанесено рассеивающее покрытие 3. Излучение, выходящее из какого-либо световода 4, отражается от зеркала и равномерно распределяется по всем световодам. Это дает возможность каждому терминалу в системе передавать и принимать данные от любого другого терминала.

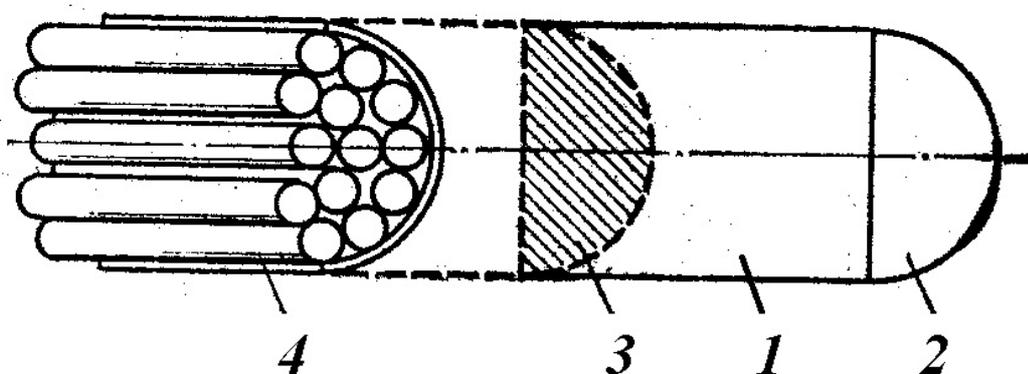


Рис. 17. Звездообразный разветвитель

Полосовые и разделительные фильтры применяются в ВОЛС, в которых по световоду передается одновременно множество оптических сигналов с использованием частотного уплотнения. Оптические фильтры могут быть реализованы на основе селективных разветвителей и интерферометров.

# ИНФОРМАЦИЯ. КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ СВОЙСТВА ИНФОРМАЦИИ

## 1. Определение информации

Понятие информации является одним из основных в современной науке и поэтому не может быть строго определено через более простые понятия. Можно лишь, обращаясь к различным аспектам этого понятия, пояснять, иллюстрировать его смысл. Деятельность людей связана с переработкой и использованием материалов, энергии и информации. Соответственно развивались научные и технические дисциплины, отражающие вопросы материаловедения, энергетики и информатики. Значение информации в жизни общества стремительно растет, меняются методы работы с информацией, расширяются сферы применения новых информационных технологий. Сложность явления информации, его многоплановость, широта сферы применения и быстрое развитие отражается в постоянном появлении новых толкований понятий информатики и информации. Поэтому имеется много определений понятия информации, от наиболее общего философского – «Информация есть отражение реального мира» до узкого, практического – **«Информация есть все сведения, являющееся объектом хранения, передачи, преобразования и использования»**. Представителям инженерного корпуса логично исходить из узкопрактического ее определения, а область интересов в рамках учебной дисциплины «Лазерные информационные системы» сосредоточить на вопросах применения лазерной техники в устройствах хранения, передачи, преобразования и использования информации (рис. 1).



Рис. 1. Определение информации

Чаще всего под информацией понимают не сами предметы и процессы, а их отражение или отображение в виде чисел, формул, описаний, чертежей, символов, образов. Сама по себе информация может быть отнесена к области абстрактных категорий, подобных, например, математическим формулам, однако работа с ней всегда связана с использованием каких-нибудь материалов и затратами энергии. Информация хранится в наскальных рисунках древних людей в камне, в текстах книг на бумаге, в картинах на холсте, в музыкальных магнитофонных записях на магнитной ленте, в данных оперативной памяти компьютера, в наследственном коде ДНК в каждой живой клетке, в памяти человека в его мозге и т.д. Для ее записи, хранения, обработки, распространения нужны материалы (камень, бумага, холст, магнитная лента, электронные носители данных и пр.), а также энергия, например, чтобы приводить в действие печатающие машины, создавать искусственный климат для хранения шедевров изобразительного искусства, питать электричеством электронные схемы калькулятора, поддерживать работу передатчиков на радио и телевизионных станциях.

В подобной трактовке информация являет собой некий симбиоз материального и идеального (рис. 2). Успехи в современном развитии информационных технологий связаны с созданием новых материалов и процессов, используемых для хранения, передачи, преобразования и использования информации.

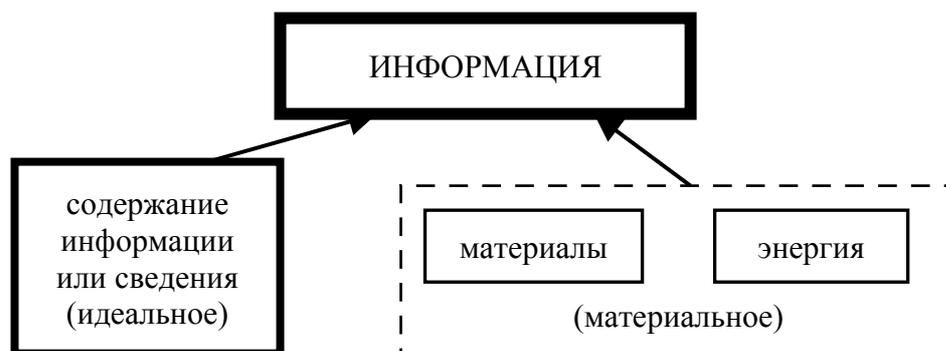


Рис. 2. Представление информации

Содержание информации идеально в том смысле, что ее содержание должно быть выражено в понятиях, образах, формулах и т.п. вещах понятных другим людям. Яблоки падали и до Ньютона. Само падающее яблоко несет одну и ту же информацию в том числе и о законе тяготения для всех. Однако лишь сформулированная в понятиях Ньютоном эта информация превратилась в закон тяготения.

Однако со второй половины 20-го века стал привлекать особый тип взаимодействия в физических системах – обмен информацией с внешней средой. Такие физические системы называются информационно открытыми. Обмен информацией существенно обогащает класс возможных поведений физической системы и ставит новые задачи, решению которых посвящено немало исследований. Изучение взаимоотношений динамики и информации в физических системах – всего лишь первый шаг; дальнейшие исследования должны учитывать не только статистические закономерности передачи информации, но также цели и способы ее использования в системе. (Фрадков А.Л. О применении кибернетических методов в физике. // УФН. – 2005. – Т. 175. - № 2. – С. 114 – 138.)

Преобразование информации из одного вида в другой в зависимости от рода преобразования называют по разному: просто «преобразование», например, цифро-аналоговое преобразование, или аналого-цифровое преобразование; сложные преобразования называют «кодированием»,

например, дельта-кодирование, энтропийное кодирование; преобразование в соответствие с содержанием информации таких параметров, как амплитуда, частота или фаза называют «модуляцией», например амплитудно-частотная модуляция, широтно-импульсная модуляция.

Обычно, аналоговые преобразования достаточно просты и с ними легко справляются различные устройства, изобретенные человеком. Магнитофон преобразует намагниченность на пленке в звук, диктофон преобразует звук в намагниченность на пленке, видеокамера преобразует свет в намагниченность на пленке, осциллограф преобразует электрическое напряжение или ток в изображение и т.д. Преобразование аналоговой информации в цифровую заметно сложнее. Некоторые преобразования машине совершить не удастся или удастся с большим трудом. Например, преобразование речи в текст, или преобразование записи концерта в ноты, и даже по природе своей цифровое представление - текст на бумаге очень тяжело машине преобразовать в тот же текст в памяти компьютера.

Зачем же тогда использовать цифровое представление информации, если оно так сложно? Основное преимущество цифровой информации перед аналоговой - это помехозащищенность. То есть в процессе копирования информации цифровая информация копируется так как есть, её можно копировать практически бесконечное количество раз, аналоговая же информация в процессе копирования зашумляется, её качество ухудшается. Обычно аналоговую информацию можно копировать ограниченное число раз.

## **2. Классификация информации**

Информацию можно условно делить на различные виды, основываясь на том или ином ее свойстве или характеристике, например по способу кодирования, сфере возникновения, способу передачи и восприятия и общественному назначению и т.д.

### ***По общественному назначению***

По общественному назначению информацию можно подразделять на массовую, специальную и личную. Массовая информация подразделяется в свою очередь на общественно-политическую, быденную и научно-популярную. Специальная информация подразделяется на производственную, техническую, управленческую и научную. Техническая информация имеет следующие градации: станкостроительная, машиностроительная, инструментальная и т.д., по отраслям.

Научная информация подразделяется на биологическую, математическую, физическую и далее по отраслям.

### ***По сфере возникновения***

По сфере возникновения информацию можно классифицировать следующим образом. Информацию, возникшую в неживой природе называют элементарной, в мире животных и растений - биологической, в человеческом обществе - социальной. В природе, живой и неживой, информацию несут: цвет, свет, тень, звуки и запахи. В результате сочетания цвета, света и тени, звуков и запахов возникает эстетическая информация. Наряду с естественной эстетической информацией, как результат творческой деятельности людей возникла другая разновидность информации - произведения искусств. Кроме эстетической информации в человеческом обществе создается семантическая информация, как результат познания законов природы, общества, мышления. Деление информации на эстетическую и семантическую очевидно очень условно, просто необходимо

понимать, что в одной информации может преобладать ее семантическая часть, а в другой эстетическая.

Нас прежде всего будет интересовать классификация информации по способу передачи и восприятия и по способу кодирования.

### ***По способу передачи и восприятия***

По способу передачи и восприятия информацию принято классифицировать следующим образом. Информация, передаваемая в виде видимых образов и символов называется визуальной; передаваемая звуками - аудиальной; ощущениями - тактильной; запахами - вкусовой. Информация, воспринимаемая оргтехникой и компьютерами называется машинно-ориентированной информацией. Количество машинно-ориентированной информации постоянно увеличивается в связи с непрерывно возрастающим использованием новых информационных технологий в различных сферах человеческой жизни. Машинно-ориентированная информация передается посредством электрических и оптических сигналов.

### ***По способу кодирования***

По способу кодирования сигнала информацию можно разделить на аналоговую и цифровую. Для отображения информации в аналоговом сигнале используются все промежуточные значения параметра от минимального до максимального, т.е. теоретически бесконечно большое их число. Например, величины углов наклона стрелок часов - это основа для аналогового отображения времени. Высота ртутного столбика в термометре - это тот параметр, который дает аналоговую информацию о температуре. Чем больше длина столбика в термометре, тем больше температура.

Цифровой сигнал использует в качестве физической основы для записи и передачи информации дискретное и ограниченное число значений параметра, например, электрического напряжения. Наибольшее распространение получила система кодирования, когда таких значений всего два. Она используется при записи информации в ЭВМ. Одно состояние - есть электрическое напряжение, условно обозначаемое единицей (1), другое - нет

электрического напряжения, условно обозначаемое нулем (0). Поэтому для передачи информации о величине исходного параметра необходимо использовать представление данных в виде комбинации нулей и единиц, т.е. цифровое представление. Приведем некоторые примеры бытовых цифровых устройств. Электронные часы с цифровой индикацией дают цифровую информацию о времени. Калькулятор производит вычисления с цифровыми данными. Механический замок с цифровым кодом тоже можно назвать примитивным цифровым устройством.

### **3. Качественные свойства информации**

Как и всякий объект, информация обладает свойствами. Характерной отличительной особенностью информации от других объектов природы и общества, является дуализм: на свойства информации влияют как свойства исходных данных, составляющих ее содержательную часть, так и свойства методов, фиксирующих, передающих и воспроизводящих эту информацию.

С точки зрения информатики наиболее важными представляются следующие общие качественные свойства: объективность, достоверность, полнота, точность, актуальность, полезность, ценность, своевременность, понятность, доступность, краткость и пр. и связанные с ними количественные ее характеристики и параметры.

#### ***Объективность информации.***

Объективный – существующий вне и независимо от человеческого сознания. Информация – это отражение внешнего объективного мира. Информация объективна, если она не зависит от методов ее фиксации, чьего-либо мнения, суждения.

Пример. Сообщение «На улице тепло» несет субъективную информацию, а сообщение «На улице 22°C» – объективную, но с точностью, зависящей от погрешности средства измерения.

Объективную информацию можно получить с помощью исправных датчиков, измерительных приборов. Отражаясь в сознании конкретного человека, информация перестает быть объективной, так как, преобразовывается (в большей или меньшей степени) в зависимости от мнения, суждения, опыта, знаний конкретного субъекта.

Вас познакомят с лазерными контрольно-измерительными системами. Они выступают как источники или генераторы объективной информации и важно уметь оценивать их информационные свойства в плане количества и скорости генерации информации.

### ***Полезность (ценность) информации.***

Полезность может быть оценена применительно к нуждам конкретных ее потребителей и оценивается по тем задачам, которые можно решить с ее помощью. Здесь количественные критерии определяются содержанием информации, держателями и потребителями информации. С точки зрения техники ценность информации оценивается в форме стоимости хранения или передачи единицы информации. Например, CD-диск емкостью 700 Мбайт стоит 35 руб. Значит стоимость хранения на нем 1 бита информации будет  $5 \cdot 10^{-9}$  руб./бит. Или Вы платите при пользовании Интернетом 30 руб. за 150 Мбит. Значит стоимость передачи информации по предлагаемому Вам каналу будет  $15 \cdot 10^{-7}$  руб./бит.

### ***Достоверность информации.***

Информация достоверна, если она отражает истинное положение дел. Объективная информация всегда достоверна, но достоверная информация может быть как объективной, так и субъективной. Достоверная информация помогает принять нам правильное решение. Недостоверной информация может быть по следующим причинам: преднамеренное искажение (дезинформация) или непреднамеренное искажение субъективного свойства; искажение в результате воздействия помех («испорченный телефон») и недостаточно точных средств ее фиксации.

### ***Точность информации.***

Точность информации определяется степенью ее близости к реальному состоянию объекта, процесса, явления и т. п.

Достоверность и точность информации связаны с такой физической характеристикой, как погрешности, возникающие при хранении, передаче и преобразованиях информации.

### ***Полнота информации.***

Информацию можно назвать полной, если ее достаточно для понимания и принятия решений. Неполная информация может привести к ошибочному выводу или решению.

Это качественное свойство тесно связано с количеством информации.

Например, лазерно-локационные системы по своему информационному назначению подразделяются на системы обнаружения объектов, измерения параметров объектов, наведения на объекты и распознавания объектов. Отличительные признаки объектов, содержащиеся в реализациях регистрируемых сигналов и положенные в основу решения задач обнаружения, измерения, наведения и распознавания, определяют специфику структуры соответствующих локаторов и алгоритмов выделения и обработки сигналов. По классам признаки объектов подразделяются на детерминированные, вероятностные, логические и структурные (лингвистические). Выбор того или иного признака или некоторой комбинации признаков объектов из возможного набора в качестве рабочего (-их) для эффективного решения конкретной локационной задачи (оптимизации построения и функционирования системы в заданных условиях применения) требует сравнительной количественной оценки их информативности.

Для получения количественной оценки информативности признаков объектов в заданных условиях локации необходимо прежде всего выбрать адекватный решаемой задаче критерий информативности признаков объектов и разработать реализующий его метод их достоверной оценки.

В качестве простейших критериев оценки информативности признаков объектов в задачах обнаружения обычно используется (в случае обнаружения сигналов от объектов на фоне шумов по амплитудному признаку) - отношение пикового значения сигнала к среднеквадратическому значению шума.

Более полным критерием оценки информативности признаков объектов в задаче обнаружения по одному или совокупности признаков могут служить достигаемые локатором вероятности правильного обнаружения объектов с допустимой нормой ложных тревог.

В качестве критериев оценки информативности признаков объектов в задачах измерения и наведения естественно использовать достигаемые значения точностей измерения и точностей наведения с заданной достоверностью.

Задачи распознавания объектов функционально более сложны, чем задачи обнаружения и измерения, включают последние на начальных этапах своей реализации и отличаются значительно большим разнообразием признаков, которые могут быть положены в основу их решающих алгоритмов. Выбор априорных и апостериорных признаков объектов из возможного их набора для заданных условий локации является ключевым в проблеме оптимального (рационального) проектирования систем распознавания. Действительно, с одной стороны, он определяет необходимый объем полученной, хранимой и перерабатываемой априорной и апостериорной (текущей) информации по фоноцелевой обстановке, с другой стороны - структуру, алгоритмы и достигаемые характеристики системы. При этом выбор критериев информативности зависит как от содержания, так и от того, на решение какого этапа (какой характеристики) проблемы (системы) распознавания он направлен и насколько приемлемое по сложности и эффективности (приближающееся к оптимальному) решение он обеспечивает.

***Актуальность информации*** – важность для настоящего времени, злободневность, насущность. Только вовремя полученная информация может быть полезна.

Это качество связано со скоростями преобразования и передачи информации. Скорости преобразования и передачи информации являются основными количественными параметрами информационных систем реального времени.

#### **4. Количественные свойства информации**

##### ***Количество информации***

Содержание информации может быть самым разным. С инженерной точки зрения имеет смысл интересоваться не содержательной частью информации, а процессами ее преобразования, передачи, хранения и использования, т.е. материальной её частью. Для этого прежде всего необходимо ввести количественные параметры и характеристики информации, не зависящие от её содержания: количество информации и единицы его измерения; скорость передачи, преобразования, записи и воспроизведения, поиска и представления для использования.

Каждый предмет или явление человек пытается охарактеризовать количественными свойствами, для сравнения с подобными предметами или явлениями. Не всегда это можно просто и однозначно сделать. Даже величины физических предметов можно оценивать по-разному: по объему, весу, массе, количеству составляющих его элементов, стоимости. Поэтому, например, понятно, что даже на простой вопрос: «Что больше, килограммовая гиря или детский воздушный шарик?» - можно ответить по-разному. Чем явление более сложно и многопланово и чем больше характеристик у этого явления, тем труднее подобрать для него удовлетворяющее всех, кто занимается этим явлением, определение его величины. Так и количество информации можно измерить по-разному: в

количествах книг, страниц, знаков, метрах киноплёнки, тоннах архивных материалов, килобайтах оперативной памяти ЭВМ, а также оценивать по эмоциональному восприятию человека, по полученной пользе от обладания информацией, по необходимым затратам на обработку, систематизацию информации и т.д. Попробуйте оценить, где больше информации: в формуле Эйнштейна  $E = mc^2$ , лежащей в основе физики водородной бомбы, в картине Айвазовского «Девятый вал» или в ежедневной телевизионной передаче «Новости»?

Видимо проще всего оценить количество информации по тому, сколько необходимо места для ее хранения, выбрав какой-нибудь единый способ представления и хранения информации. С развитием ЭВМ таким единым способом стало кодирование информации с помощью цифр 1 и 0. Кодированием здесь называется перезапись информации из одного способа представления в другой. Количество позиций (называемых двоичными), в которых находятся только цифры 1 или 0, необходимое для прямой записи сообщения, является одним из критериев количества информации и называется объемом информации в битах. Для записи одного символа (буквы, цифры, пробела между словами, знаков препинания) в ЭВМ чаще всего используют 8 двоичных позиций, и это называется байтом. Таким образом, название изучаемой дисциплины: «Лазерные информационные системы» состоит из 29 букв (без кавычек) и двух пробелов между словами и будет занимать в памяти ЭВМ 31 байт или 248 бит. Возможна не прямая, а сжатая запись информации, т.е. кодирование его меньшим количеством бит. Это производится за счет специальной обработки и анализа частоты появления, расположения и количества символов в сообщении. На практике человек применяет также сжатие сообщения, исходя из его смысла. Например, длинное сообщение объемом в 37 байт «тысяча девятьсот девяносто шестой год» можно сжать до четырех символов «1996».

Клод Элвуд Шеннон предложил в 1948 году теорию информации, которая дала вероятностно-статистическое определение понятию количества

информации. Каждому сигналу в теории Шеннона приписывается вероятность его появления. Чем меньше вероятность появления того или иного сигнала, тем больше информации он несет для потребителя. Человек или какой-нибудь другой приемник информации, получив порцию информации разрешает некоторую неопределенность. Чем большая неопределенность была разрешена в процессе получения информации, тем большее количество информации мы получили. Но это субъективная мера количества информации, а хотелось бы иметь объективную меру.

Количество информации  $I(a_i)$ , содержащаяся в символе  $a_i$ , выбираемом из ансамбля  $\{ a_i \}$  ( $i = 1, 2, \dots, K$ ,  $K$  – объем алфавита) с вероятностью  $P(a_i)$ , причем  $\sum P(a_i) = 1$ , определяется как

$$I(a_i) = -\log_2 P(a_i) . \quad (1)$$

При этом информация измеряется в двоичных единицах (битах). Одна двоичная единица информации – это количество информации, содержащееся в одном из двух выбираемых с равной вероятностью символов.

Среднее количество информации  $H(A)$ , приходящееся на один символ, выдаваемый дискретным источником независимых сообщений с объемом алфавита  $K$ , можно найти как математическое ожидание дискретной случайной величины  $\Lambda$ , определяющей количество информации, содержащееся в одном случайно выбранном символе (знаке)  $a_i$ :

$$H(A) = \Lambda_{\text{ср}} = - (p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \dots + p_K \log_2 p_K). \quad (2)$$

Эта величина называется энтропией источника независимых сообщений.

Одной из информационных характеристик дискретного источника является избыточность

$$\rho_{\text{и}} = 1 - (H(A)/H_{\text{max}}(A)) = 1 - (H(A)/\log_2 K). \quad (3)$$

Избыточность источника зависит от протяженности статистических связей между последовательно выбираемыми символами (памятью

источника), так и от степени неравновероятности отдельных символов. Если источник без памяти (последовательно передаваемые символы независимы), все символы равновероятны  $P(a_i) = 1/K$ , то  $H(A) = H_{\max}(A)$  и избыточность  $\rho_{\text{и}} = 0$ .

Формула (1) применима как к источнику информации, так и к ее приемнику. Если речь идет об источнике информации, то под  $K$  следует понимать полное количество элементов в источнике, например, в алфавите. Если речь идет о приемнике информации, то  $K$  представляет собой количество принятых элементарных сообщений. Творчество состоит в том, что для той или иной предметной области определить это  $K$  и вероятность каждого исхода  $p_i$ , а в плане кодирования для передачи сообщений – таким образом представить информацию, чтобы появления элементов передаваемого алфавита были равновероятны. При выполнении последнего условия, как можно показать, избыточность  $\rho_{\text{и}} = 0$ .

Формула (1) показывает зависимость количества информации от числа событий и от вероятности появления этих событий. Информация равна нулю, если возможно только одно событие. С ростом числа событий информация увеличивается.  $I = 1$  - единица информации, называемая «бит». Бит - основная единица измерения информации.

Для равновероятных событий формулу (1) можно упростить:

$$I = \log_2 K, \quad (4.4)$$

где  $I$  – количество информации;  $K$  – количество исходов.

Возьмем, для примера, монету и бросим её на стол. Она упадет либо орлом, либо решкой. У нас есть 2 равновероятных события. После того, как мы бросили монетку, мы получили  $\log_2 2 = 1$  бит информации. Попробуем узнать сколько информации мы получим после того, как бросим кубик? У кубика шесть граней – шесть равновероятных событий. Получаем:  $\log_2 6 \approx 2,6$ . После того, как мы бросили кубик на стол, мы получили приблизительно 2,6 бита информации.

Бит по Шеннону и бит который используется в компьютерной технике совпадают, если вероятности появления нуля или единички в компьютерном бите равны. Если вероятности не равны, то количества информации по Шеннону становится меньше.

Наравне с битом, часто используется величина, называемая байтом, обычно она равна 8 битам. И если бит позволяет выбрать один равновероятный вариант из двух возможных, то байт 1 из 256 ( $2^8$ ). Для измерения количества информации так же принято использовать более крупные единицы: 1 Кбайт (один килобайт) = 1024 байта =  $2^{10}$  бит; 1 Мбайт (один мегабайт) = 1024 Кбайта =  $2^{10}$  Кбайт; 1 Гбайт (один гигабайт) = 1024 Мбайта =  $2^{10}$  Мбайт.

Если применить формулу Шеннона для аналоговой информации, то мы получим бесконечное количество информации. Например, напряжение в точке электрической цепи может принимать равновероятное значение от нуля до одного вольта. Количество исходов равно бесконечности и, подставив это значение в формулу для равновероятных событий, получается бесконечность – бесконечное количество информации. Интуитивно понятно что, чем меньшая точность измерения, тем меньше информации мы получаем, чем большая точность измерения, тем больше информации мы получаем. Вот здесь как раз и начинается творчество. Здесь для применения формулы Шеннона видимо необходимо ввести дискретную шкалу, цена деления которой будет определяться погрешностями измерения, т.е. дискретизировать отсчеты, после чего уже применение формулы (1) вполне уместно.

### ***Скорость передачи и преобразования информации***

После определения единицы измерения количества информации нетрудно ввести понятие скорости ее передачи и преобразования. Единицей скорости передачи и преобразования информации будет бит/с или соответствующие производные единицы: байт/с, Мбит/с, Мбайт/с и т.п.

Здесь опять следует вспомнить о вероятностной природе информации. Как велика бы ни была скорость передачи информации, но, если приняв первый бит, уже можно прогнозировать все последующие биты, то все последующие биты принимать бессмысленно, с какой бы скоростью они не передавались. Если последующий за принятым бит информации мы можем предсказать со 100 % вероятностью (т.е. что появится 0 или 1 в последующий за принятым момент времени), то и надобность в приеме этого последующего бита отпадает.

# АКТИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОЛС

## 1. Полупроводниковые лазеры

### 1.1. Полосковые лазеры

В настоящее время полупроводниковые лазеры являются ключевым элементом, определяющим скорость передачи информации в волоконно-оптических линиях связи. В основу физических принципов конструирования инжекционных лазеров для систем связи положены следующие основные требования: непрерывный и импульсный режимы работы, низкий пороговый ток, широкая полоса модуляции, линейная зависимость мощности излучения от тока, малая излучающая площадь, малые шумы, большой ресурс работы и одномодовый, а в пределе - одночастотный режимы работы.

Изготовление инжекционных лазеров и светоизлучающих диодов (СИД) начинается с формирования эпитаксиальных структур, выращенных методами: *жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ)*; *химического осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений (МОС) - МОС-гидридной эпитаксии (МГЭ)*; *эпитаксии из молекулярных пучков (ЭМП)*. В самом общем смысле *метод жидкофазной эпитаксии* заключается в выращивании ориентированного кристаллического слоя материала из насыщенного жидкого раствора на кристаллической подложке.

Наиболее распространенный метод выращивания эпитаксиальных структур - *химическое осаждение из газовой фазы*. Для полупроводниковых соединений типа  $A_3B_5$  (например, мышьяк - фосфор) используются четыре различные модификации этого метода.

Лазерные диоды (ЛД) в настоящее время изготавливаются в основном методом *МОС-гидридной эпитаксии*. В гидридном процессе в качестве источников элементов As и P применяются *арин* ( $AsH_3$ ) и *фосфин* ( $PH_3$ ). При этом подложками служат *арсенид галлия* ( $GaAs$ ) - при создании ЛД на длину волны 800-980 нм и *фосфид индия* ( $InP$ ) - при создании ЛД на длину волны 1250-1550 нм.

*Эпитаксия из молекулярного пучка* (ЭМП) - это метод выращивания, при котором рост эпитаксиального слоя происходит при падении на нагретую поверхность подложки тепловых пучков молекул или атомов в условиях сверхвысокого вакуума. В качестве подложки, как и в первых двух случаях, используются GaAs или InP. От других методов ЭМП отличается тем, что проводится в условиях сверхвысокого вакуума.

Для ВОЛС используются в основном источники излучения с полосковой геометрией, в которых область протекания тока ограничена также и по плоскости *p-n*-перехода. Ширина полоска обычно составляет 3 - 5 мкм. Такое ограничение по ширине (или в боковом направлении) преследует несколько целей. Во-первых, позволяет уменьшить площадь сечения, а, следовательно, и рабочий ток. Во-вторых, при ширине полоска < 5 мкм осуществляется генерация в одном канале и в основной поперечной моде. В-третьих, площадь свечения становится соизмеримой с диаметром сердцевины одномодового волокна (7 - 9 мкм) (рис. 1.)

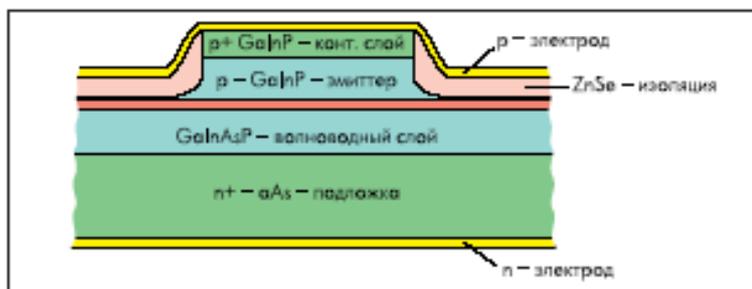


Рис. 1. Поперечное сечение ЛД с полосковой геометрией

В зарощенной гетероструктуре ширина полоска может быть доведена до 2 мкм, что позволяет снизить пороговый ток до 5 мА и менее. Лазеры с зарощенной гетероструктурой позволяют реализовать генерацию одной моды, обладают лучшей временной стабильностью и повышенной линейностью выходной характеристики излучения. В связи с этим они становятся наиболее перспективными для ВОЛС. В высокоскоростных линиях связи используются в основном *зарощенные мезаполосковые*

*лазеры*, причем за-ращивание осуществляется методом МОС-гидридной эпитаксии с использованием высокоомного слоя InP, легированного Fe. Высокоомные слои уменьшают емкость ЛД и улучшают его частотные характеристики.

В линиях связи с волновым мультиплексированием нужно использовать динамически стабильные режимы одночастотного лазера с очень узкой спектральной линией. Этим требованиям больше всего отвечают лазеры с *распределенными брэгговскими зеркалами* (РБЗ) и шириной линии генерации менее 1 МГц. Спектр генерации такого одночастотного лазера представлен на рис. 2.

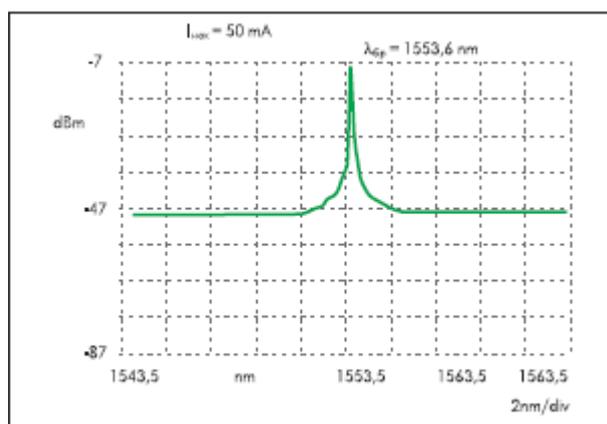


Рис. 2. Спектр генерации одночастотного лазерного диода

Наиболее полно требованиям ВОЛС отвечают лазеры с длиной волны излучения 1300 и 1550 нм (благодаря малым оптическим потерям в оптоволокне). *Ватт-амперные характеристики* ЛД с длиной волны 1300 нм в определенном диапазоне температур представлены на рис. 3. Такие ЛД нормально работают до температур 100°C без охлаждения и имеют мощность излучения до 50 мВт, хотя с ростом температуры быстро возрастает величина порогового тока.

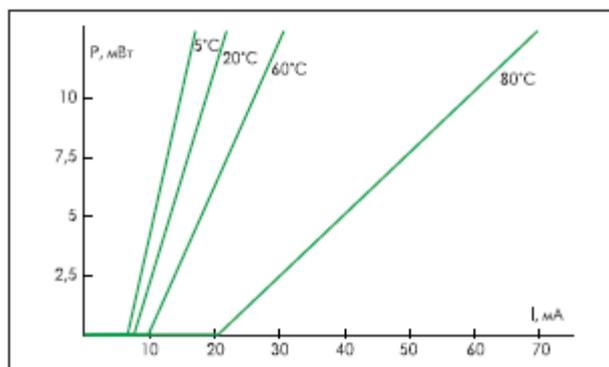


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики ЛД

Для программы "волокно в дом" требуются неохлаждаемые лазеры с повышенной надежностью и малой стоимостью. Минимальное значение полученного для них порогового тока составляет 1 - 3 мА, ресурс работы - до 500000 часов. По спектральному составу такие лазеры могут иметь как многомодовый, так и одномодовый (в пределе - одночастотный) режим генерации в зависимости от скорости и дальности передачи информации.

В ВОЛС все полупроводниковые лазерные диоды и оптические усилители поставляются в виде отдельных *передающих лазерных модулей-ПОМ*, или просто лазерных модулей. Конструктивно большинство из них оформлено в виде модулей с двухрядным расположением выводов (типа DIP). Наибольшее распространение получили конструкции типа "Баттерфляй" с 8 или 14 выводами (рис. 4 а, б).

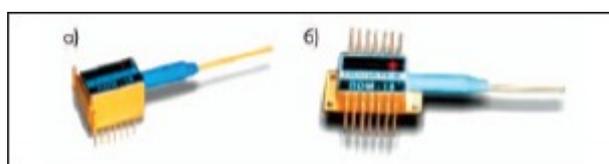


Рис. 4. Конструкции лазерных модулей

Параметры отечественных излучающих модулей ВОЛС приведены в таблице 1.

Таблица 1. Лазерные модули для ВОЛС

| Параметр\Тип модуля         | тсд  | ПОМ-1060 | ПОМ-14 | ПОМ-14М | ПОМ-14-2 | ПОМ-17 | ПОМ-18 | ПОМ-18-2 | ПОМ-РБЗ-21, 22, 23 |
|-----------------------------|------|----------|--------|---------|----------|--------|--------|----------|--------------------|
| Р, мВт                      | 0,05 | 10-50    | 1-10   | 3-10    | 1-3      | 3-10   | 1-10   | 1-3      | 3-5                |
| Длина волны, нм             | 1300 | 1064     | 1300   | 850     | 1300     | 1300   | 1550   | 1550     | 1060, 1300, 1550   |
| Ширина линии, нм            | 40   | 0,1      | 3      | 3       | 3        | 3      | 3      | 3        | 0,01               |
| Пороговый ток, мА           | -    | 12       | 12     | 15      | 12       | 12     | 15     | 15       | 50-70              |
| Рабочий ток, мА             | 50   | 100      | 50     | 50      | 30       | 30     | 50     | 40       | 150                |
| Рабочее напряжение, В       | 2    | 2        | 2      | 2       | 2        | 2      | 2      | 2        | 2                  |
| Фототок обратной связи, мкА | 40   | 40       | 40     | 40      | 40       | 40     | 40     | 40       | 40                 |
| Напряжение ФД, В            | 5    | 5        | 5      | 5       | 5        | 5      | 5      | 5        | 5                  |
| Ток ТЭМО, мА                | 300  | 300      | 300    | 300     | -        | -      | 300    | -        | 500                |
| Напряжение ТЭМО, В          | 3    | 3        | 3      | 3       | -        | -      | 3      | -        | 4                  |

Основными элементами лазерного модуля являются ЛД, фотодиоды (ФД), термоэлектрические микроохладители (ТЭМО) типа элементов Пельтье, оптический изолятор и одномодовый световод со сферической линзой на конце для коллимации светового потока. Лазерные модули, разработанные для ВОСП, и их характеристики приведены в табл. 1. Ресурс работы представленных в таблице лазерных модулей составляет более 500000 часов, скорость передачи информации - до 2500 Гбит/с.

Для оценок быстродействия ЛД измеряют их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). АЧХ представляют собой зависимость амплитуды модуляции излучения от частоты модулирующего тока накачки. В ВОЛС обычно используют лазеры, длина которых составляет 200 - 400 мкм, а ширина равна 300 - 400 мкм; при этом ширина активной области лазера составляет 2 - 5 мкм. Чтобы обеспечить инжекцию тока накачки только через активную область, необходимо остальную часть лазера защитить от тока накачки. Для этого используются различные диэлектрические пленки из  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{ZnSe}$ . В конструкции лазера такая диэлектрическая пленка и создает паразитную емкость, которая ограничивает его быстродействие. Кроме паразитной емкости большое влияние оказывает и дифференциальное

сопротивление лазера  $R_d$ , которое определяется из его вольт-амперной характеристики:  $R_d \propto \text{ctg } \alpha$ , где  $\alpha$  - угол между линеаризованной в рабочей точке вольт-амперной характеристикой и осью напряжений.

На рис. 5 представлены экспериментальные ватт-амперные и амплитудно-частотные характеристики квантоворазмерных InGaAlAs/InP-лазеров с длиной волны излучения 1,3 мкм  $d = 0,15$  мкм,  $R_d = 9$  Ом и  $L = 300$  мкм, а также лазеры с  $d = 1,2$  мкм,  $R_d = 5$  Ом и  $L = 200$  мкм ( $d$  – толщина слоя диэлектрика).

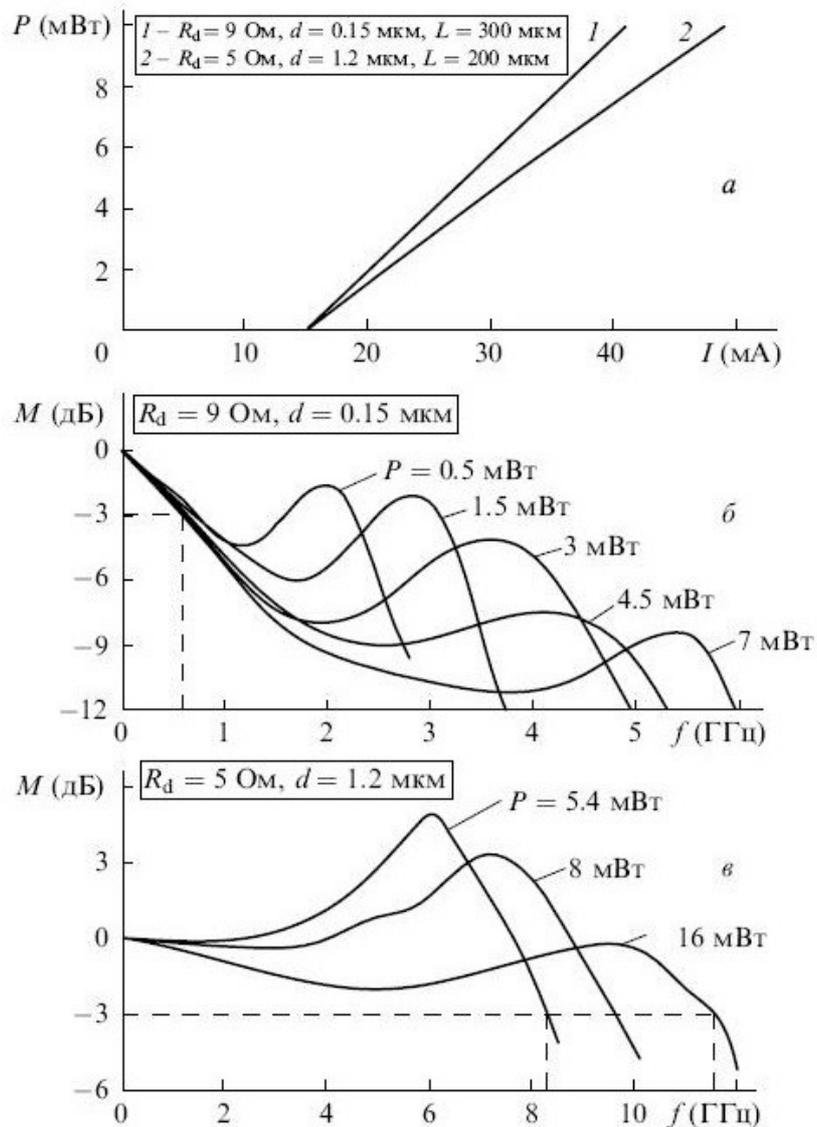


Рис. 5. Ватт-амперные (а) и амплитудно-частотные характеристики (б, в) характеристики лазеров при разных значениях  $R_d$ ,  $d$  и  $L$  и разных мощностях излучения

Из рис. 5 видно, что совокупность параметров  $d$ ,  $R_d$ ,  $L$  сильно влияет на АЧХ лазеров. Верхняя частота модуляции лазера, представленного на рис. 5, б, составляла 500 МГц по уровню - 3 дБ (по уровню 0,5), а для лазера, представленного на рис. 5, в, она могла достигать 10 - 12 ГГц. На рис. 2 показана схема мезаполоскового лазера, получившая в настоящее время наибольшее распространение.

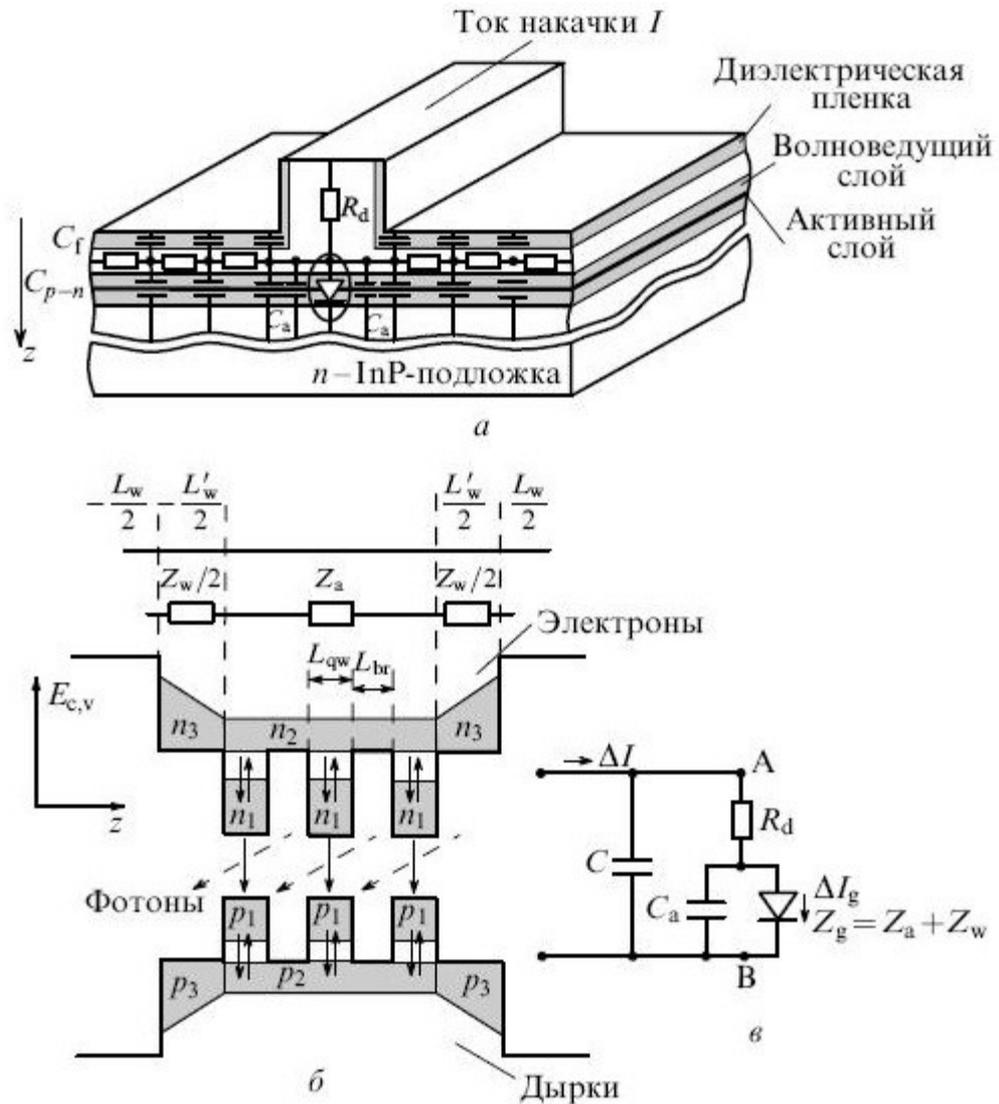


Рис. 6. Схема мезаполоскового лазера (а), распределение носителей в активной области (условно показаны три ямы, в эксперименте пять ям) (б) и эквивалентная схема лазера (в)

Здесь выделены основные паразитные элементы лазера:  $C_f$  -емкость, образуемая диэлектрической пленкой, и  $C_{p-n}$  - барьерная емкость  $p-n$ -перехода лазера, которая образуется за счет того, что  $p$ - и  $n$ - эмиттеры легированы, а активная область и волноведущие слои являются нелегированными. Как показали измерения, емкость  $C_{p-n}$  при нулевом смещении равна  $(40 - 70) \times 10^{-12}$  Ф, поэтому при  $R_d = 5 - 10$  Ом частота модуляции лазера  $f = (2\pi R_d C_{p-n})^{-1}$  не должна превышать 200 - 800 МГц, однако в эксперименте (рис. 5, в) она может достигать 10 - 12 ГГц.

Этот результат был учтен при составлении эквивалентной схемы лазера. Обычно для создания ограничения оптического поля вдоль активной области недотравленная до волноведущего слоя толщина  $p$ -эмиттера составляет 0,1 – 0,15 мкм; сопротивление оставшегося слоя достигает нескольких сотен Ом. В этом случае можно считать, что емкости  $C_f$  и  $C_{p-n}$  включены последовательно и зарядка-разрядка емкости  $C = C_f C_{p-n} / (C_f + C_{p-n})$  будет осуществляться через последовательно соединенные сопротивления  $R_d$  и  $Z_d$ . Величина  $R_d$  определяется сопротивлением  $p$ - и  $n$ - омических контактов, толщиной  $p$ -эмиттера над активной областью и сопротивлением подложки, сопротивление  $Z_d$  - параллельно соединенными емкостью  $C_a$  и сопротивлением лазерного диода  $Z_g$  (см. рис. 6,в), величина  $C_a$  - частью барьерной емкости  $p-n$ -перехода накачиваемой области лазера. Сопротивление лазерного диода является комплексным, т. е. состоит из активной и реактивной частей.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Верхняя граничная частота модуляции лазера по уровню - 3 дБ зависит от паразитной емкости, определяемой толщиной диэлектрической пленки, дифференциального сопротивления и длины резонатора лазера.

2. Для мезаполоскового лазера с шириной полоски  $w = 2 - 5$  мкм влияние паразитных элементов на его АЧХ можно оценивать постоянной времени  $\tau = R_d \cdot C$ , т.к. из-за малой ширины полоска  $C_a$  можно не учитывать.

## ***2.2. Вертикально-излучающие лазеры***

Принципиальные преимущества вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) обусловлены узкой диаграммой направленности выводимого оптического излучения, повышенной температурной стабильностью длины волны, групповой технологией изготовления и тестирования.

Несмотря на успешное развитие технологии светодиодов с оптическими микрорезонаторами (МРСИД) и ВИЛ для спектральных диапазонов 850 и 980 нм, создание аналогичных приборов для практически важных диапазонов длин волн 1,3 и 1,55 мкм требует решения ряда принципиальных проблем. В приборах с вертикальными оптическими резонаторами зеркалами служат распределенные брэгговские отражатели (РБО), образованные последовательностью чередующихся слоев двух материалов с разными показателями преломления (толщина каждого слоя составляет одну четвертую резонансной длины волны с учетом показателя преломления материала). Высококачественные РБО для МРСИД и ВИЛ диапазонов 850/980 нм формируются из чередующихся слоев AlGaAs и GaAs. При этом важно, что приборная структура может быть выращена в едином эпитаксиальном процессе. Система материалов InAlGaAsP/InP, традиционная для источников оптического излучения диапазонов 1,3/1,55 мкм, не позволяет в едином эпитаксиальном процессе формировать высокодобротные вертикальные оптические резонаторы из-за существенно меньшей (по сравнению с системой AlGaAs/ GaAs) разницы коэффициентов преломления слоев InGaAsP, InAlGaAs и InP, а также низкой теплопроводности четверных соединений. Это стимулирует поиск новых полупроводниковых материалов, пригодных для создания длинноволновых ВИЛ на подложках GaAs. Наибольший интерес в настоящее время привлекают структуры с квантовыми ямами InGaAsN и GaAsSb, а также структуры с массивами квантовых точек (КТ) In(Ga)As.

Ранее было показано, что оптимизация условий молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) позволяет формировать структуры с несколькими слоями InAs/InGaAs КТ, имеющие высокую поверхностную плотность массива и демонстрирующие яркую фотолюминесценцию (ФЛ) в диапазоне длин волн 1,3 мкм без увеличения полуширины линии по сравнению со структурами, содержащими только один слой КТ. Полосковые лазеры с такой активной областью демонстрируют низкопороговую лазерную генерацию ( $< 80 \text{ А см}^{-2}$ ) и высокую выходную мощность в непрерывном режиме ( $> 2,5 \text{ Вт}$ ).

Первым шагом на пути реализации длинноволновых вертикально-излучающих приборов на подложках GaAs стало создание и исследование структур с вертикальными микрорезонаторами, содержащих массивы InAs/InGaAs КТ, а также светодиодов с оптическими микрорезонаторами МРСИД на их основе, демонстрирующих узкую линию электролюминесценции в диапазоне длин волн 1265 - 1325 нм. В данных приборах использовались гибридные оптические микрорезонаторы, образованные нижним AlGaAs/GaAs распределенным брэгговским отражателем РБО (проводящим *n*-типа или нелегированным) и верхним диэлектрическим РБО. Однако попытки реализовать лазерную генерацию в такой конструкции не привели к успеху.

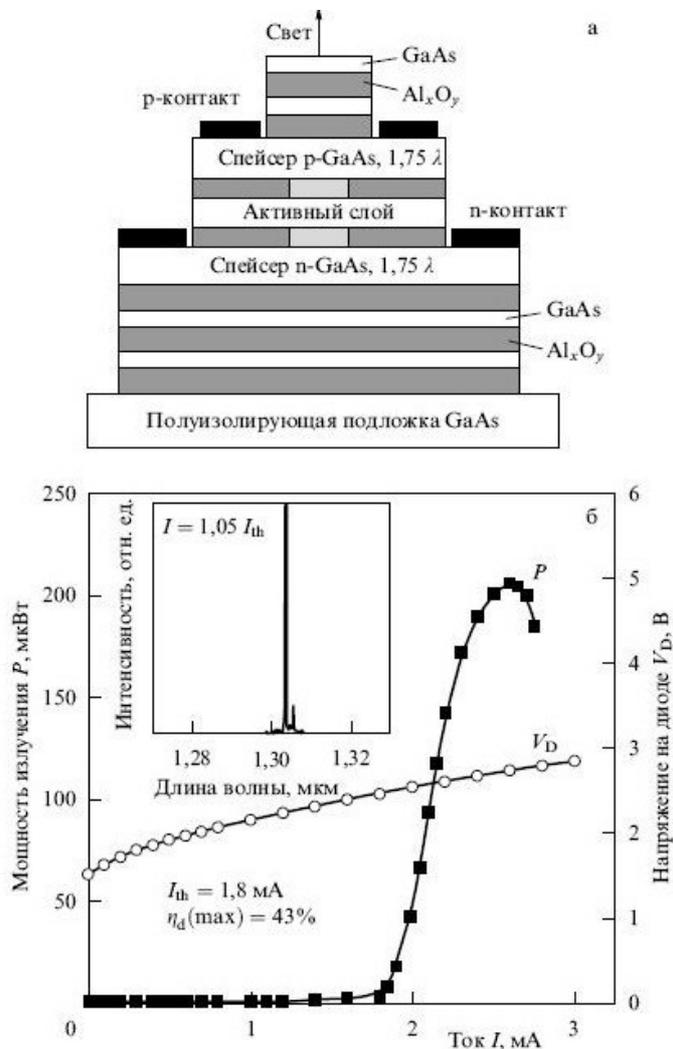
Рассмотрим факторы, учет которых принципиален при выборе конструкции длинноволновых ВИЛ с активной областью на основе InAs/InGaAs КТ. Условием начала лазерной генерации является баланс между оптическим усилением и суммарными оптическими потерями, включающими потери на вывод излучения и внутренние потери в лазерной структуре. При этом для ВИЛ следует учесть, что оптическая волна проникает в РБО на некоторую глубину, т.е. эффективная длина резонатора отличается от геометрического расстояния между зеркалами. Кроме того, для активных слоев с малой толщиной следует принять во внимание положение активной области относительно пространственного распределения

амплитуды стоячей волны оптического поля в вертикальном микрорезонаторе.

В первом приближении оценку принципиальной возможности реализации ВИЛ с тем или иным оптическим резонатором можно сделать на основе экспериментальных характеристик для полосковых лазеров с такой же активной областью. Известно, что для структур на основе InAs/InGaAs КТ наблюдается насыщение усиления при увеличении тока инжекции, обусловленное конечным значением поверхностной плотности КТ. Максимальное измеренное значение модального оптического усиления для длинноволновых торцевых лазеров на основе трех слоев InAs/InGaAs КТ не превышает  $10 - 12 \text{ см}^{-1}$  при внутренних оптических потерях  $1,5 \pm 0,3 \text{ см}^{-1}$ . Анализ показывает, что в случае ВИЛ с активной областью на основе трех слоев InAs/InGaAs КТ для начала лазерной генерации необходимо иметь  $R > 0,9994$  в предположении нулевых внутренних потерь и  $R > 0,9997$  при величине внутренних потерь  $2 \text{ см}^{-1}$  ( $R = (R_1 \cdot R_2)^{0,5}$ , где  $R_1, R_2$  - коэффициенты отражения верхнего (выводного) и нижнего зеркал). Таким образом, для получения лазерной генерации требуются очень высокие коэффициенты отражения зеркал в сочетании с малыми внутренними оптическими потерями.

Существенные оптические потери в легированных полупроводниковых зеркалах обуславливают практическую невозможность использования традиционной конструкции с верхним и нижним контактами к легированным зеркалам *n*- и *p*-типа при реализации длинноволновых ВИЛ на основе КТ. Оптимальной представляется конструкция с верхним и нижним нелегированными  $\text{Al}_x\text{O}_y/\text{GaAs}$  РБО, которые можно получить селективным оксидированием слоев AlGaAs в атмосфере, насыщенной парами воды. Большая разница в показателях преломления слоев для оксидированных зеркал обеспечивает широкую спектральную область с высокими уровнями оптического отражения.

Структуры ВИЛ с активными слоями на основе InAs/ InGaAs КТ выращивались методом МПЭ с твердотельным источником As<sup>4</sup> в установке Riber-32P. Схематическое сечение и основные характеристики для типичного ВИЛ представлены на рис. 7. Две Al<sub>x</sub>O<sub>y</sub> апертуры, полученные частичным оксидированием слоев AlGaAs, обеспечивают не только ограничение тока, но и дополнительное перераспределение оптического поля в резонаторе. По сравнению с резонатором на основе полупроводниковых РБО амплитуда оптического поля в активной области существенно возрастает, а глубина его проникновения в зеркала уменьшается. Для приборов с размером оксидированной апертуры 8×8 мкм пороговый ток составляет 1,8 мА при



максимальной внешней дифференциальной эффективностью 43 % (при выводе излучения через верхнее зеркало); это наилучшие опубликованные значения для ВИЛ диапазона 1,3 мкм на подложках GaAs. В непрерывном режиме при комнатной температуре максимальная выходная мощность для лучших

приборов превышает 0,6 мВт. Уровень внутренних оптических потерь 0,04... 0,05 % на один проход фотона соответствует лучшим опубликованным значениям для ВИЛ всех типов.

Рис. 6. Схематическое поперечное сечение (а) и основные характеристики (б) ВИЛ с активной областью на основе трёх слоёв квантовых точек InAs/InGaAs

## 2. Оптические усилители

Из-за затухания и расплывания импульсов по мере их распространения по оптоволокну периодически через десятки – сотни километров необходимо восстанавливать их амплитуду и форму, т.е. включать в состав ВОЛС ретрансляторы. Конечно, восстановить форму оптического импульса можно преобразовав его фотоприемником в электрический сигнал, усилив этот электрический сигнал и подав его вновь на лазер-передатчик. Для современных высокоскоростных линий передачи стараются минимизировать число преобразований свет-электричество и наоборот, т.к. при этом происходит существенное снижение скоростных параметров канала связи. Поэтому современные ретрансляторы представляют собой именно усилители света, т.е. оптические усилители. Усиление в оптическом (квантовом) усилителе происходит в результате взаимодействия электромагнитного излучения с активной средой, в которой создана инверсия населенностей. В квантовом усилителе первичная электромагнитная волна, распространяясь в активной среде, вызывает в ней вынужденное испускание квантов излучения, тождественных по частоте, фазе, направлению распространения и характеру поляризации с первичной волной.

Усиление оптических сигналов, рассматриваемое первоначально как сопутствующее явление, наблюдаемое при исследовании процессов в лазерных устройствах, в настоящее время стало самостоятельным направлением в создании *оптических усилителей* (ОУ). Усилители,

используемые в настоящее время в ВОЛС, можно разделить на несколько основных типов: а) оптоволоконные (ОВ) усилители (главным образом на основе ОВ, легированного эрбием -  $\text{Er}^{+3}$ , в международной классификации они именуется EDFA; усилители на основе ОВ, легированного другими редкоземельными металлами; в меньшей степени - оптоволоконные усилители на основе эффекта Рамана); б) полупроводниковые оптические усилители (ПОУ); в) параметрические усилители.

### ***2.1. Полупроводниковые оптические усилители***

Принцип действия ПОУ основан на использовании возбужденной эмиссии, возникающей благодаря взаимодействию фотонов входного возбуждающего излучения с электронно-дырочными парами активной среды. При этом входной сигнал является источником *первичных фотонов*, энергия которых должна быть достаточна, чтобы сбросить электроны с верхних уровней зоны проводимости на нижний уровень валентной зоны, где электроны и дырки рекомбинируют, вызывая появление *вторичных фотонов*. Факт усиления обеспечивается тем, что при прохождении светового сигнала по волноводной структуре активной области происходит лавинное увеличение числа вторичных фотонов в  $k$  раз (коэффициент оптического усиления) по сравнению с числом первичных фотонов. Существенно, что усиленное выходное излучение сохраняет форму, длину волны, состояние поляризации и другие параметры идентичными тем, которые соответствовали входному излучению.

Для создания полупроводниковых ОУ использовались гетероэпитаксиальные структуры на основе  $\text{InAlAs-InGaAs-InP}$  с квантово-размерными слоями, изготовленными методами МОС-гидридной эпитаксии на подложках  $p\text{-InP}$  и  $n\text{-GaAs}$ . Эти структуры излучают в диапазоне 840 - 1560 нм. Из них изготавливались мезаполосковые активные элементы с шириной мезаполоска 3 мкм и длиной резонатора 600 - 1200 мкм. На переднюю и заднюю грань активного элемента наносились многослойные просветляющие покрытия, а сам элемент монтировался на медном

теплоотводе, который охлаждался с помощью ТЭМО. Излучение с задней и передней грани активного элемента ОУ вводилось в одномодовый световод с микролинзой на торце. По сути дела, ПОУ это тот же ППЛ, но без резонатора.

В результате удается получить ОУ с коэффициентами усиления до 30 дБ, максимальной выходной мощностью до 20 мВт и шириной полосы усиления 35 - 60 нм. Это делает ОУ пригодными для усиления не только в системах с одной несущей, но и в системах со спектральным уплотнением WDM.

Общий вид полупроводникового ОУ показан на рис. 8, а более подробно основные характеристики одной из серии таких усилителей приведены в табл. 2.

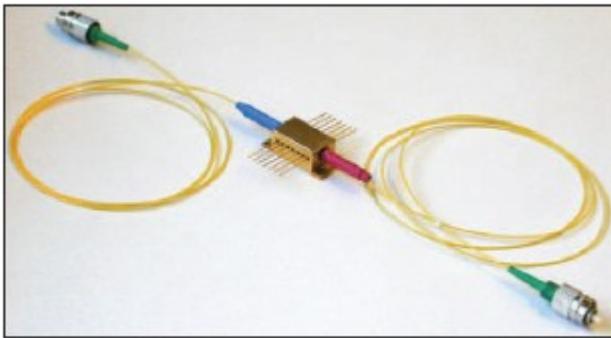


Рис. 8. Общий вид ПОУ

Таблица 2. Характеристики ПОУ

| Параметры                            | Условия работы                | Мин.            | Тип.           | Макс. |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|-------|
| Длина волны, нм                      | НВ, усиление- 10 дБ           | 1530            | 1550           | 1580  |
| Напряжение, В                        | НВ, $I_{\text{нак}} = 200$ мА | -               | -              | 2     |
| Усиление "волокну-волокну", дБ       | НВ, $I_{\text{нак}} = 200$ мА | 8<br>(6,3 раза) | 10<br>(10 раз) | -     |
| Чувствительность на входе, дБм       | НВ, усиление- 10 дБ           | -30<br>(1 мкВт) | -              | -     |
| Ток смещения, мА                     | НВ, усиление- 10 дБ           | -               | 200            | 250   |
| Поляризационная чувствительность, дБ | НВ, $I_{\text{нак}} = 200$ мА | -               | 3              | -     |
| Ширина спектра, нм                   | НВ, $I_{\text{нак}} = 200$ мА | 30              | -              | -     |

## 2.2. Оптоволоконные усилители

В начале своего развития основной задачей волоконной оптики представлялось создание волоконных световодов как пассивной среды для передачи информации. Однако, как и в любой другой развивающейся области науки, в процессе решения первоначальной задачи проявились другие возможности волоконной оптики, которые привели к расширению круга изучаемых объектов и явлений и, в свою очередь, расширили область возможных применений волоконных световодов и устройств на их основе.

Отдельным направлением волоконной оптики является разработка и исследование волоконных лазеров и усилителей. Развитие технологии получения волоконных световодов и полупроводниковых источников накачки позволило вернуться к идее волоконного лазера на качественно новом уровне. Начало бурного развития этого направления относится к концу 80-х гг. прошлого века, когда было показано, что волоконные световоды, легированные ионами  $\text{Er}^{3+}$ , могут найти применение в волоконных усилителях сигнала на длинах волн в диапазоне 1,53 – 1,56 мкм, т.е. в спектральной области минимальных оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла. Исследования в области волоконно-оптических усилителей послужили толчком для создания мощных полупроводниковых источников накачки. Открытие фоторефрактивного эффекта в световодах и разработка методики записи внутриволоконных брэгговских отражающих решеток позволили формировать брэгговские зеркала, образующие резонатор непосредственно в волоконных световодах, и реализовать широкий набор лазерных конфигураций в чисто волоконном исполнении.

Брегговские зеркала нашли применение и в волоконных селективных ответвителях.

Так же как и в случае твердотельных лазерных источников, наибольшее распространение в качестве активных легирующих добавок волоконных световодов получили ионы лантаноидов, или редкоземельных элементов. Специфические оптические свойства данных элементов

определяются тем, что для них характерна достройка внутренней f-оболочки, когда уже заполнились внешние оболочки. Наличие незаполненной внутренней оболочки приводит к появлению ярко выраженной дискретной структуры электронных переходов, которая и обуславливает применение ионов редкоземельных элементов в качестве активной примеси. В качестве активной примеси волоконных световодов на основе кварцевого стекла наибольшее распространение нашел ряд элементов, приведенных в табл. 3. Там же содержатся данные об области люминесценции этих активных ионов.

Таблица 3. Редкоземельные элементы, используемые для создания активных волоконных световодов, и спектральные области их люминесценции

| Активный ион     | Область люминесценции (мкм) |
|------------------|-----------------------------|
| Nd <sup>3+</sup> | 0,92 - 0,94                 |
|                  | 1,05 - 1,1                  |
|                  | 1,34                        |
| Ho <sup>3+</sup> | 1,9 - 2,1                   |
| Er <sup>3+</sup> | 1,53 – 1,6                  |
| Tm <sup>3+</sup> | 1,7 – 1,9                   |
| Yb <sup>3+</sup> | 0,98 – 1,16                 |

*Эрбий (Er<sup>3+</sup>).* Ионы эрбия в кварцевом стекле обладают лазерным переходом  ${}^5I_{13/2} \rightarrow {}^5I_{15/2}$ , соответствующим излучению в области 1,53 – 1,6 мкм, время жизни на метастабильном уровне составляет 10 - 12 мс. Данный спектральный диапазон совпадает с областью минимальных оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла и, следовательно, с диапазоном, используемым в современных волоконно-оптических линиях связи. В сочетании с возможностью применять полупроводниковые источники накачки на 0,98 и 1,45 – 1,48 мкм это обусловило широкое использование волоконных световодов, легированных ионами эрбия, а также устройств на их основе. Следует отметить, что квантовая эффективность накачки для этих световодов приближается к 100

%, а большое время жизни на метастабильном уровне, составляющее около 10 мс, позволяет достигать высоких коэффициентов усиления.

Фотоиндуцированные брэгговские решетки показателя преломления используются в волоконной оптике в качестве селективных отражателей. Получение фотоиндуцированных решеток показателя преломления стало возможным после обнаружения фоточувствительности световодов, т.е. стабильного изменения показателя преломления материала сердцевины световода под действием УФ излучения определенных длин волн.

В общем случае под фотоиндуцированной внутриволоконной брэгговской решеткой показателя преломления следует понимать отрезок волоконного световода с модуляцией показателя преломления в световедущей области с амплитудой на уровне  $10^{-5}$  -  $10^{-3}$  и периодом порядка длины волны распространяющегося излучения.

Основными характеристиками решетки являются период модуляции показателя  $\Lambda$ , величина наведенного изменения показателя преломления  $\Delta n$ , число штрихов  $N$  или длина решетки  $L$ . Параметры решеток (спектральная ширина, коэффициент отражения) могут варьироваться в широких пределах в зависимости от условий записи и фоточувствительности световода.

Электромагнитная волна, распространяясь перпендикулярно слоям распределённого брэгговского отражателя (РБО) испытывает отражения от границ раздела сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ . Закон Брэгга определяет условия, при которых волны, отражённые от границ раздела сред данного РБО при перпендикулярно падающей волне, находятся в одинаковой фазе:

$$\Lambda = \frac{l\lambda}{2n_{eff}}, \quad (1)$$

где  $\Lambda$  - период РБО,  $l = 1, 2, \dots$  - целое число, указывающее на порядок дифракции,  $\lambda$  - длина электромагнитной волны в вакууме,  $n_{eff}$  — эффективный показатель преломления РБО. Чаще всего в волоконной технике используются четвертьволновые распределённые РБО, толщина каждого

слоя которых равна четверти длины волны  $L_1 = \lambda/4n_1$ ,  $L_2 = \lambda/4n_2$ . Тогда, коэффициент отражения РБО на длине волны  $\lambda$  будет равен:

$$R = \left[ \frac{1 - (n_1/n_2)^{2m}}{1 + (n_1/n_2)^{2m}} \right]^2, \quad (2)$$

где  $m$  - число пар четвертьволновых слоев, из которых состоит РБО. Максимум коэффициента отражения РБО в спектре приходится на длину волны  $\lambda$ , и его спектральная ширина определяется из выражения:

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda\Delta n}{\pi n_{eff}}, \quad (3)$$

где  $\Delta n$  — разница показателей преломления  $n_1$  и  $n_2$ ,  $n_{eff} = 2(1/n_1 + 1/n_2)^{-1}$  - эффективный показатель преломления РБО.

Поскольку период брэгговской решетки менее 1 мкм для отражения в ближней ИК области спектра, запись решетки производится в интерференционной картине УФ излучения. На рис. 9 представлена схема записи решеток с использованием интерферометра Ллойда. Отметим, что такая схема требует высокой пространственной когерентности излучения и поэтому применяется, главным образом, с источником, использующим вторую гармонику аргонового лазера (длина волны излучения 244 нм).

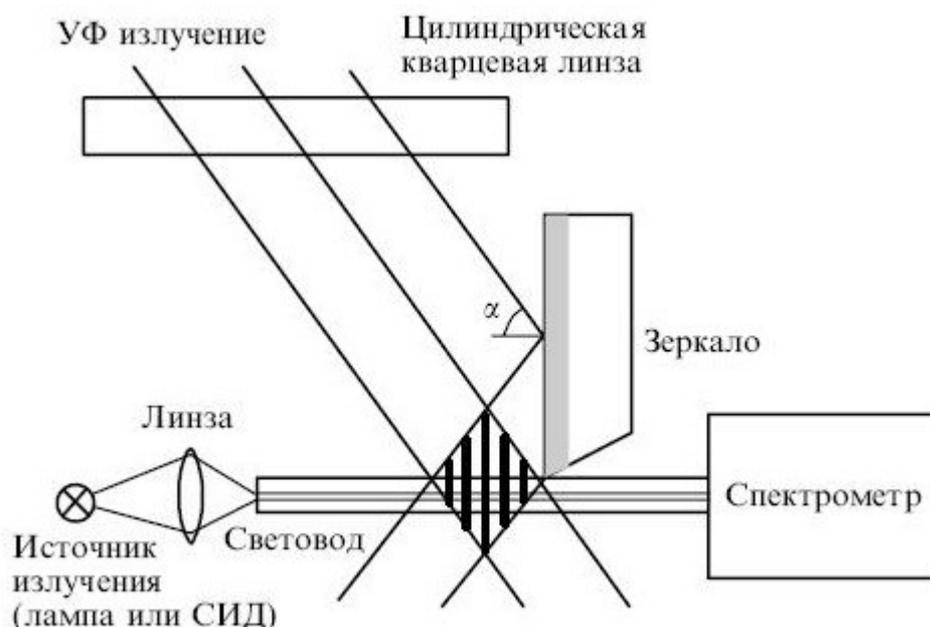


Рис. 9. Схема записи решёток с использованием интерферометра Ллойда

Другой метод записи решеток основан на использовании фазовых масок. В этом методе интерферируют первый и минус первый порядки дифракции излучения, прошедшего через кварцевую фазовую маску, рельеф которой выполнен таким образом, чтобы подавить нулевой и другие порядки дифракции. В данном методе требования к когерентности источника излучения не столь жесткие, что позволяет использовать эксимерные лазеры KrF (248 нм) и ArF (193 нм).

На рис. 10 представлен типичный спектр пропускания брэгговской решетки с параметрами  $L = 5$  мм,  $\delta n = 8 \times 10^{-4}$ ,  $\Lambda = 0,4$  мкм. Решетка обеспечивает коэффициент отражения  $R \sim 0,99$  на длине волны 1136 нм, при этом ширина спектра отражения составляет около 0,4 нм. Такие решетки, имеющие высокий коэффициент отражения и большую ширину спектра отражения, обычно используются в качестве входных отражателей волоконных лазеров.

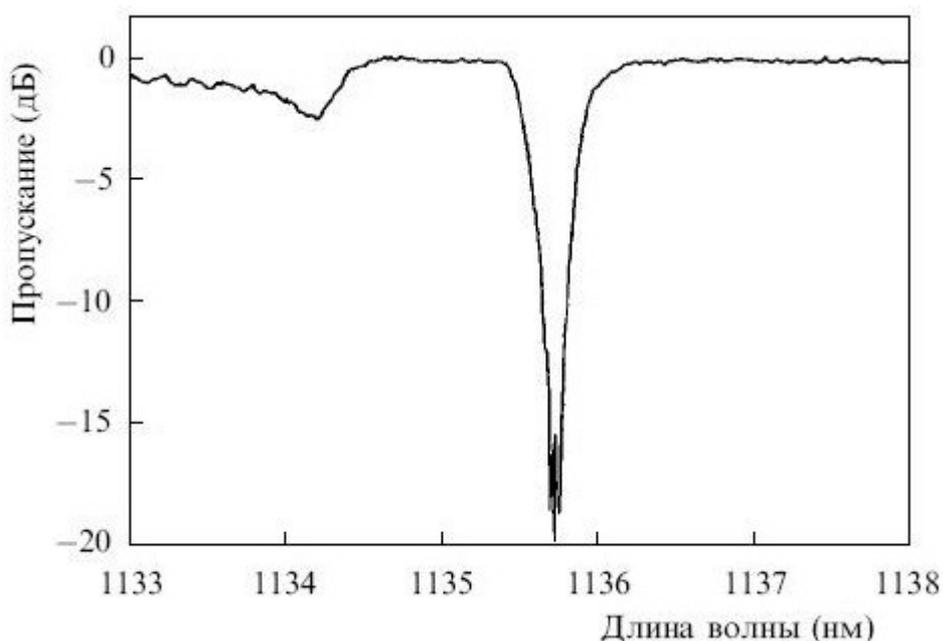


Рис. 10. Типичный спектр пропускания брэгговской решётки с параметрами  $L = 5$  мм,  $\delta n = 8 \times 10^{-4}$ ,  $\Lambda = 0,4$  мкм

Под активными понимают волоконные световоды, в состав материала которых входят ионы элементов, обладающих оптическими переходами. При этом активный ион может вводиться как в сердцевину световода, так и в его отражающую оболочку, если по ней распространяется заметная часть оптической мощности. Следует отметить, что максимальная концентрация активных ионов в сетке кварцевого стекла невелика и ограничивается их растворимостью, а также возникновением кооперативных эффектов. Это приводит к тому, что длина активной среды волоконного лазера может достигать нескольких десятков метров. Поэтому естественным требованием к активным волоконным световодам является наличие достаточно низких нерезонансных оптических потерь. Приемлемое значение потерь составляет от 5 до 20 дБ/км, в этом случае их влияние на эффективность лазера составляет не более нескольких процентов.

Мощные полупроводниковые источники для накачки волоконных лазеров требуют применения волоконных световодов с двойной оболочкой. В качестве активной среды мощных волоконных лазеров используются световоды, состоящие из одномодовой сердцевины, легированной как активной примесью редкоземельного элемента, так и примесями, формирующими профиль показателя преломления, а также из внутренней оболочки из кварцевого стекла и внешней оболочки с показателем преломления, пониженным по сравнению с таковым для кварцевого стекла. Модельный профиль показателя преломления данных световодов представлен на рис. 11, а.

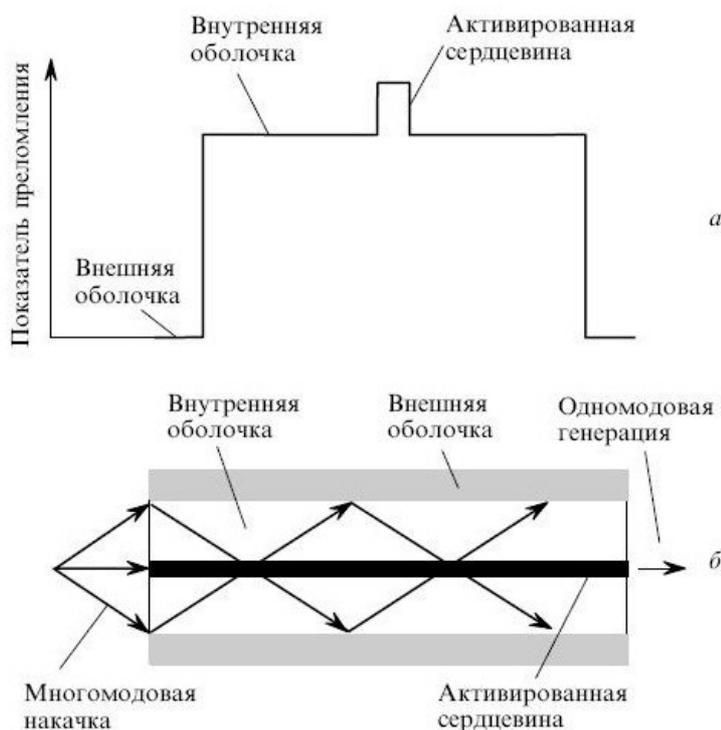


Рис. 11. Модельный профиль преломления (а) и принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера (б)

Внутренняя оболочка (вместе с внешней оболочкой) образует многомодовый световод, по которому распространяется излучение накачки. Она имеет типичный размер 0,1 - 1 мм, что обеспечивает возможность ввода излучения накачки от полупроводниковых источников с мощностью от нескольких единиц до нескольких десятков ватт. При распространении по многомодовому световоду излучение накачки поглощается активными ионами редкоземельного элемента, вызывая люминесценцию, которая при наличии обратной связи может развиваться в лазерную генерацию. При этом область генерации оказывается локализованной в одномодовой сердцевине, т. е. ее характерный поперечный размер составляет 5 - 10 мкм. Принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера иллюстрируется на рис. 11, б. Таким образом, волоконный лазер с накачкой в оболочку может рассматриваться как устройство, позволяющее повысить яркость полупроводникового источника в сотни раз (естественно, на другой длине волны).

Для наиболее распространенного типа волоконных световодов с двойной оболочкой в качестве материала внешней оболочки используются полимеры с низким показателем преломления. В частности, это силиконовая резина, обеспечивающая числовую апертуру многомодового световода  $NA = 0,38$ , и тефлон AF, позволяющий увеличить NA до 0,6. Как правило, световоды с полимерным покрытием имеют внешний диаметр 100 - 300 мкм. К недостаткам использования силиконового покрытия следует отнести высокий уровень оптических потерь для излучения накачки, который составляет 50 дБ/км и более. Использование тефлона позволяет получать световоды с оптическими потерями в оболочке  $\sim 10$  дБ/км. Кроме того, данный материал обладает высоким пропусканием в УФ части спектра, что позволяет записывать решетки без удаления полимера. Однако тефлоновое покрытие имеет малую толщину (10 - 20 мкм), что увеличивает риск повреждения световода.

Для обеспечения эффективной связи мод внутренней оболочки с активированной сердцевиной необходимо использовать волоконные световоды с некруглой формой внутренней оболочки, поскольку в противном случае большая доля мощности распространяется в модах, не пересекающих область сердцевины. Световоды могут иметь следующие форму и параметры внутренней оболочки: круглую (диаметром 125 мкм), D-образную с одной сошлифованной гранью ( $125 \times 100$  мкм), прямоугольную ( $150 \times 75$  мкм), квадратную ( $125 \times 125$  мкм). Использование некруглой геометрии внутренней оболочки позволяет получить эффективность поглощения накачки, близкую к 100%. D-образная форма выглядит наиболее простой для изготовления, поскольку требуется сошлифовка лишь одной грани заготовки. Оптимальной геометрией оболочки является квадратная форма, позволяющая добиться как высокой эффективности поглощения излучения накачки, так и малых оптических потерь при сварке с круглыми волокнами. Следует отметить, что можно использовать и другие геометрии оболочки, в частности шестигранную форму.

Другим вариантом является использование активного световода с микроструктурированной оболочкой, поперечное сечение которого представлено на рис. 12.



Рис. 12. Схема волоконного световода с микроструктурированной оболочкой; чёрные кружки – воздушные промежутки

Характерное значение числовой апертуры таких световодов составляет 0,5 и ограничивается вытеканием мод высших порядков через перемычки, поддерживающие внутреннюю оболочку. Большое значение NA позволяет увеличить плотность накачки в несколько раз по сравнению с предыдущей конструкцией световода при использовании идентичных источников накачки и сохранении диаметра внутренней оболочки.

Для накачки активного волоконного световода с двойной оболочкой было предложено несколько способов. Наиболее простым из них является случай торцевой накачки, когда излучение полупроводникового источника вводится в активный световод через торец. Достоинством такого способа является возможность его использования для всех описанных выше типов световодов с двойной оболочкой. К его недостаткам относится возможность использования лишь одного источника накачки (лазерного диода или их сборки), поэтому вводимая в световод мощность ограничена современными возможностями полупроводниковой технологии.

Две другие схемы накачки используют принцип распределения вводимого излучения накачки по длине активного световода. Для ввода накачки предлагается использовать набор V-образных канавок, изготовленных на боковой поверхности световода. Принцип ввода накачки показан на рис. 13.

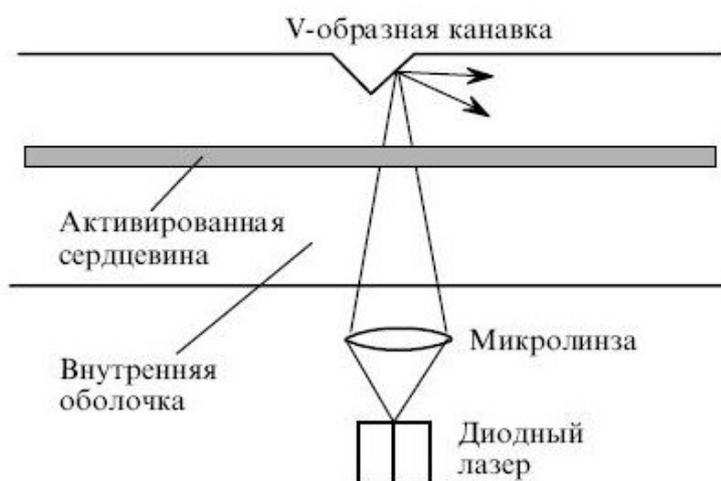


Рис. 13. Схема накачки через V-образную канавку

Несомненным достоинством такого способа является возможность добавления источников по длине активного световода по мере истощения мощности от предыдущего источника. К недостаткам следует отнести необходимость фиксации полупроводникового лазера относительно активного световода и защиты области ввода от внешних воздействий. Особенностью другого способа накачки является использование специального двойного волоконного световода, представляющего собой два волоконных световода с общим полимерным покрытием, имеющим пониженный по сравнению с кварцевым стеклом показатель преломления (GTW-световод). Один из световодов (активный) имеет сердцевину, легированную ионами иттербия, а второй (пассивный) - представляет собой волокно из высокочистого кварцевого стекла. Соответствующая конфигурация представлена на рис. 14.

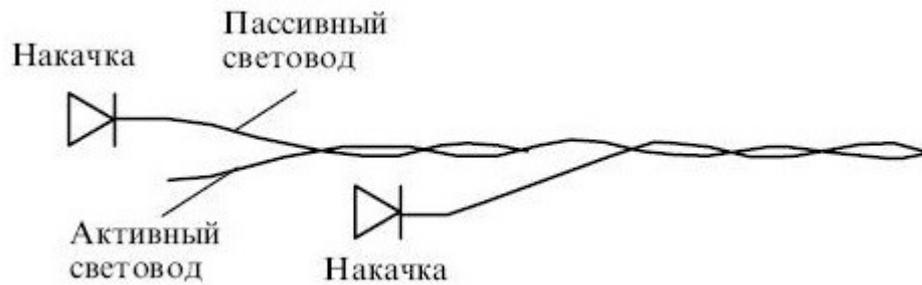


Рис. 14. Схема накачки с использованием двойного световода

Излучение накачки от полупроводникового излучателя вводится в пассивный световод. В области контакта световодов происходит перераспределение мощности накачки, введенной в пассивный световод, по двум световодам, при этом отношение мощностей накачки в обоих световодах определяется отношением площадей их оболочек. При распространении по активному световоду поглощение части накачки в его сердцевине компенсируется дополнительной перекачкой излучения из пассивного световода, необходимой для поддержания постоянного отношения мощностей накачки в активном и пассивном световодах. Таким образом, происходит распределенная накачка по всей длине активного световода. В данной схеме возможно использование двух источников накачки, излучение которых вводится с противоположных концов пассивного световода, а также разрыв пассивного световода в области истощения мощности накачки и добавление следующего источника (рис. 14). Кроме того, можно увеличить число пассивных световодов в сборке, что позволит, в свою очередь, увеличить количество источников накачки.

# ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ

## 1. Архивная оптико-голографическая память

Все возрастающий объем хранимой информации и прогнозирование достижений теоретических пределов для традиционных технологий хранения информации обуславливает перспективность разработки новых информационных технологий, обеспечивающих более плотную запись информации и высокие скорости записи и считывания информации. В полной мере этим требованиям отвечают системы архивной оптико-голографической памяти (АОГП), основанные на голографических принципах хранения информации. Разработка систем АОГП в настоящее время ведется достаточно интенсивно. Анализ результатов работ в этом направлении показывает, что к настоящему времени опубликовано значительное число работ, в том числе патентов, посвященных вопросам разработки оптических устройств и голографических регистрирующих материалов для АОГП.

Основное достоинство применения голографического принципа для систем хранения информации состоит в возможности записи на одном участке регистрирующей среды мультиплексной голограммы в виде большого числа наложенных друг на друга микроголограмм, каждая из которых содержит "страницу" входной информации. Записанная таким образом мультиплексная голограмма обеспечивает селективное оптическое считывание отдельных микроголограмм, поскольку каждой микроголограмме соответствует интерференционная картина, однозначно закодированная соответствующим опорным пучком, и она с достаточной эффективностью откликается лишь на данный опорный пучок. Однако выполнение этого требования зависит от выбора оптической схемы и характеристик регистрирующей среды. В настоящее время наибольшее внимание уделяется объемным фазовым голограммам, обладающим высокой дифракционной эффективностью (ДЭ) и хорошей селективностью.

Как известно, ДЭ ( $\eta$ ) объемной фазовой пропускающей голограммы определяется фазовой модуляцией  $\Delta\varphi$

$$\eta = \sin^2\Delta\varphi = \sin^2 [(\pi\Delta n T)/(\lambda_0 \cos\theta_0 n_0)], \quad (1)$$

где  $\Delta n$  - фотоиндуцированное изменение показателя преломления регистрирующей среды,  $T$  - толщина среды,  $\lambda_0$  - длина волны излучения лазера, используемого при записи голограммы,  $2\theta_0$  - угол между записывающими пучками в среде с показателем преломления  $n_0$ .

Селективность определяется допустимыми с точки зрения уменьшения значения ДЭ отклонениями угловым  $\delta\theta$  или спектральным  $\delta\lambda$ , от значений параметров  $\theta_0$  и  $\lambda_0$ , при которых значение ДЭ имеет максимальное значение и которые связаны известным соотношением Брэгга

$$2 n_0 d \sin\theta_0 = \lambda_0, \quad (2)$$

где  $d$  определяет пространственный период решетки в области записи.

В свою очередь, для случая фазовой пропускающей голограммы значение  $\delta\theta$  может быть представлено соотношением

$$\delta\theta = \xi / [(2\pi n_0 \lambda_0) T \sin\theta_0], \quad (3)$$

в котором  $\xi$  - параметр, выбираемый из графиков зависимостей относительной дифракционной эффективности  $(\eta/\eta_0)$   $\xi$  ( $\eta$  и  $\eta_0$  - соответственно дифракционные эффективности при отклонении от угла Брэгга на  $\delta\theta$  и при нулевом отклонении от этого угла).

Из выражения (3) с учетом (2) получаем

$$\delta\theta = (\xi d) / (\pi T). \quad (4)$$

При этом из соотношения (2) следует зависимость между  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$

$$\delta\theta = (\delta\lambda/\lambda_0) \operatorname{tg}\theta_0. \quad (5)$$

Из выражений (1), (4) и (5) видно, что рассмотренные параметры  $\eta$ ,  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$ , определяющие возможности мультиплицирования в отношении числа

одиноким микроголограммам в мультиплексной голограмме, в первую очередь зависят от пространственного периода  $d$  голограммы и от ее толщины  $T$ ; в частности, повышение селективных свойств объемной голограммы, выражающееся в уменьшении значений  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$ , связано с увеличением ее толщины.

Для организации регистрации большого числа наложенных микроголограмм с целью повышения плотности записи за счет селективности голограмм в настоящее время используется целый ряд методов мультиплексирования, основными из которых являются: метод углового мультиплексирования, метод сдвигового мультиплексирования, метод мультиплексирования по длине волны, метод фазового мультиплексирования, метод мультиплексирования перистрофик, осуществляемый за счет относительного поворота регистрирующей среды и плоскости, включающей параллельный опорный и предметный пучки.

Разрабатываются системы АОП, использующие комбинации нескольких из вышеприведенных методов мультиплексирования, например, перистрофического, углового и сдвигового мультиплексирования.

Наиболее широко из указанных используется метод углового мультиплексирования. Запись отдельных микроголограмм в составе мультиплексной голограммы ведется последовательной регистрацией поля интерференции предметного и опорного пучков в одной и той же области толстой регистрирующей среды при постоянном угле наклона сходящегося предметного пучка и различных углах падения на регистрирующую среду параллельного опорного пучка. Запись мультиплексных голограмм в отдельных слоях регистрирующей среды может осуществляться как за счет смещения среды в направлении, перпендикулярном плоскости регистрирующей среды, так и в направлении предметного пучка. При этом указанное смещение сопровождается угловым поворотом регистрирующей среды. В одной из основных модификаций системы этот поворот происходит относительно линии, являющейся линией пересечения регистрирующей

среды и плоскости, включающей оси предметного и опорного пучков. В другой модификации поворот среды происходит в плоскости среды относительно точки, являющейся точкой пересечения осей предметного и опорного пучков.

Восстановление отдельных голограмм в составе мультиплексной голограммы осуществляется последовательно пучком, сопряженным опорному пучку, использовавшемуся при записи, при соответствующих пространственных положениях регистрирующей среды. Указанные выше угловые смещения регистрирующей среды на стадии записи обеспечивают на стадии восстановления отсутствие перекрестных помех от соседних мультиплексных голограмм, находящихся в области прохождения восстанавливающего пучка.

Следует отметить следующие недостатки систем, использующих приведенные выше методы мультиплексирования. Реализация этих методов предполагает наличие достаточно большого количества оптических элементов, большая часть из которых должна быть подвижна, что определяет сложность оптико-механических устройств системы в целом. При этом предполагается использование толстых регистрирующих сред для записи мультиплексных голограмм, обладающих угловой и спектральной селективностью, достаточной для отдельного восстановления изображений с отдельных голограмм. Кроме того, восстановление голограмм в составе мультиплексных голограмм осуществляется последовательно, что снижает скорость воспроизведения информации. В России разработка систем АОГП тормозится отсутствием серийно изготавливаемых толстых регистрирующих сред, в первую очередь, фотополимерных материалов. Поэтому рассматриваются пути создания АОГП на основе тонкой регистрирующей среды (галогенидосеребряных или фотополимерных материалов) с минимальным числом оптико-механических устройств перемещения и возможностью параллельного считывания информации.

Для разработки устройства АОГП с высокой информационной емкостью и высокой скоростью считывания информации предлагается метод мультиплексирования, согласно которому при регистрации микроголограмм обеспечивается перпендикулярное падение опорного пучка на поверхность регистрирующей среды и наклонное падение предметных пучков (с числом пучков, равных числу наложенных микроголограмм) при их концентрическом положении относительно оси опорного пучка.

На рис. 1 представлена оптическая схема устройства записи мультиплексных голограмм с использованием многоканальной записывающей оптической головки с числом каналов, соответствующим числу микроголограмм в мультиплексной голограмме (до 20-ти), при их концентрическом положении относительно оси опорного пучка.

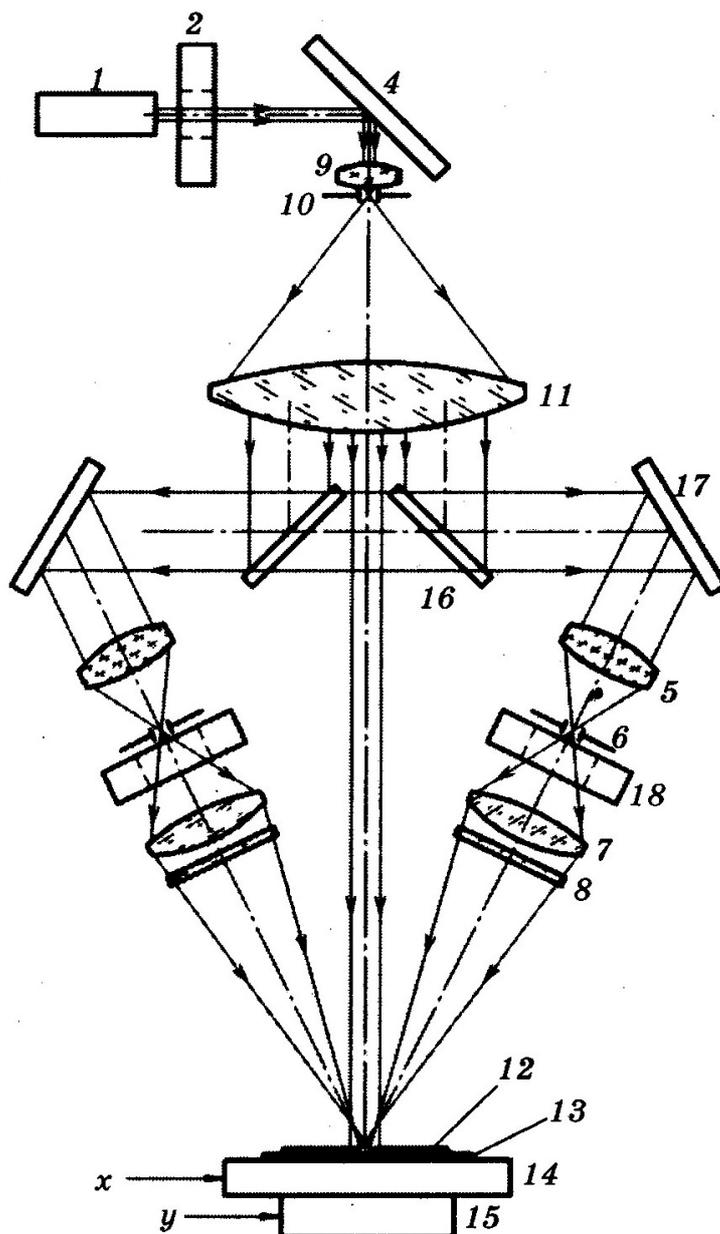


Рис. 1. Устройство записи мультиплексных голограмм в системе архивной оптико-голографической памяти с использованием многоканальной записывающей головки

Здесь излучение лазера *1* после прохождения через окно затвора *2* и отражения плоским зеркалом *4* расширяется и фильтруется системой в составе микрообъектива *9* и точечной диафрагмы *10* и затем коллимируется объективом *11*. В схеме осуществляется пространственное деление общего коллимированного пучка излучения на опорный и предметные пучки по числу каналов записывающей головки. Для простоты изображения на оптической схеме представлены только два диаметрально противоположных канала многоканальной записывающей головки.

Центральная часть коллимированного пучка используется в качестве опорного пучка, падающего на фоточувствительную среду перпендикулярно ее поверхности. Периферийная кольцевая часть коллимированного пучка системой зеркал *16* и *17* распределяется по каналам многоканальной записывающей головки, расположенным симметрично относительно оси опорного пучка. В каждом из каналов излучение фильтруется системой в составе объектива *5* и точечной диафрагмы *6* и после прохождения через окно затвора *18* поступает на фурье-преобразующий объектив (ФПО) *7* и пространственно-временной модулятор света (ПВМС) *8*. Голографическая запись информации осуществляется путем последовательной регистрации поля интерференции на фоточувствительной пластинке *13* в области пересечения предметных и опорного пучков на площади, ограниченной диафрагмой *12*. Электронное управление работой затворов обеспечивает последовательную быструю запись микроголограмм при поочередном открывании затворов *18*. Для записи всего массива мультиплексных голограмм осуществляется перемещение регистрирующей фотопластинки в плоскости, совпадающей с ее поверхностью, по координатам *X* и *Y* с помощью двухкоординатного устройства перемещения в составе частей *14* и *15*.

При считывании информации с мультиплексной голограммы, записанной с помощью данного устройства записи, пучки излучения со всех микроголограмм, составляющих мультиплексную голограмму, восстанавливаются одновременно при том, что эти пучки являются пространственно разделенными. Считывание информации осуществляется с помощью многоканальной считывающей оптической головки с числом фотоприемных каналов считывания, равным числу записанных микроголограмм.

На рис. 2 представлено 3D-изображение 20-ти канальной считывающей головки, где 1- лазер, 2 - оптическая система формирования считывающего пучка, 3 - матрица мультиплексных голограмм, 4 - 2-х координатное устройство перемещения, 5 - оптическая система считывающего канала, 6 - фотоприёмное устройство на основе видеокамеры.

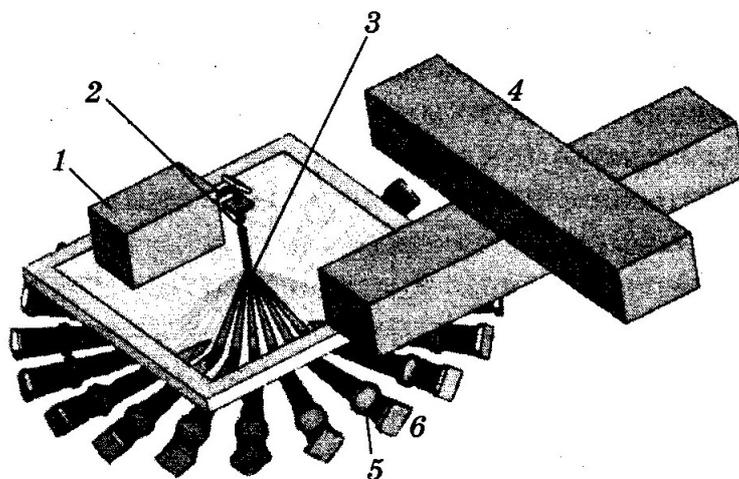


Рис. 2. 3D-изображение конструкции 20-ти канальной оптической считывающей головки АОГП

Таким образом, построение устройства АОГП по предложенному методу мультиплексирования и использование в устройстве многоканальной оптической головки записи, а при последующем считывании многоканальной считывающей оптической головки при одновременной работе каналов на стадии считывания, во-первых, позволяет устранить вращение регистрирующей среды, тем самым упростить систему и уменьшить

требования к ее механической стабильности, во-вторых, позволяет реализовать параллельный процесс считывания отдельных микроголограмм, что обеспечивает соответственно более высокие скорости считывания информации.

Реализация этого метода, предполагающего использование многоканальных головок для голографической записи и считывания информации, не является излишне экономически затратной в связи с возможностью изготовления отдельных каналов головок с применением недорогих элементов, как чисто оптических (зеркала, малогабаритные объективы), так и ПВМС и фотоприемных матричных устройств, при отсутствии прецизионных электромеханических узлов вращения и перемещения элементов.

В предложенном методе можно использовать регистрирующие среды с различной толщиной фоточувствительного слоя: от 7-20 мкм до 1 мм, на котором регистрируются как тонкослойные трехмерные голограммы, так и объемные (3D) голограммы. В работе были проведены измерения основных параметров перспективных для АОП фотополимерных и галогенидосеребряных материалов (ФПМ и ГСМ) (таблица).

Таблица

Основные параметры фоточувствительных материалов для архивной оптико-голографической памяти

| Фоточувствительный материал / изготовитель   | Дифракционная эффективность, % | Чувствительность, Дж/см <sup>2</sup>     | Угловая селективность $\Delta\theta_{0,1}$ , град | Время постэкспозиционной обработки, ч |
|--|--------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| Фотополимерный материал/ИОХ и ИА и Э СО РАН, Новосибирск                           | до 15                          | 20<br>$\lambda = 650$ нм                 | 3,3   | 0,5                                   |
| Фотополимерный материал "Диффен" / Санкт-Петербургский ГУИТМО                      | до 80                          | $2 \times 10^{-2}$<br>$\lambda = 480$ нм | 0,5   | 50                                    |
| Пластины с галогенидосеребряным слоем ПФГ-ОЗМ / ОАО "Славич", Переславль-Залесский | до 2-3                         | $2 \times 10^{-4}$<br>$\lambda = 632$ нм | 4   | 0,5                                   |

Примечания: 1) численные значения параметров приведены для случая регистрации 20 микроголограмм в одной мультиплексной голограмме; 2) ДЭ для голограмм на пластинах ПФГ-ОЗМ приводится для условий реальной работы на макете оптико-электронного устройства для записи информации (при соотношении плотностей мощностей предметного и опорного пучков в плоскости регистрации 1:5).

Как показали исследования, ФПМ "Диффен" ( $T = 1000-2000$  мкм), в котором реализован принцип диффузного усиления, обладает самой высокой ДЭ и угловой селективностью, высокой однородностью и стабильностью интерференционной структуры. Однако по чувствительности он уступает ГСМ.

Недостатком ГСМ являются необходимость "мокрой" фотохимической постобработки и небольшая толщина, хотя по угловой селективности он близок к угловой селективности ФПМ. Однако ГСМ обладают очень высокой чувствительностью (что позволяет значительно снизить время экспонирования и ускорить процесс записи голограмм) и технологичностью, а также демонстрируют значительные сроки хранения голограмм без потери их качества (более 10 лет). Поэтому для записи матрицы мультиплексных голограмм в качестве фоточувствительного материала были использованы серийно выпускаемые ГСМ - голографические фотопластинки ПФГ-ОЗМ с толщиной фоточувствительного слоя 7-12 мкм, серийно изготавливаемые на ОАО "Славич" в г. Переславль-Залесский.

Предложенный метод мультиплексирования был исследован на макете устройства записи АОГП с использованием гелий-кадмиевого лазера с длиной волны 0,441 мкм и мощностью 150 мВт, электромеханического затвора, обеспечивающего минимальное время экспонирования 1,0 мс, микрообъектива ОМ-27 и точечной диафрагмы диаметром 10 мкм. Расширенный концентрический пучок направлялся плоским зеркалом на ФПО (объектив "Триплет", 2,8/80) с непосредственно за ним расположенным жидкокристаллическим (ЖК) ПВМС (600x800 элементов с шагом исходной структуры 14 мкм, диагональ рабочего поля 14 мм, частота смены кадров 60

Гц). Регистрируемая в виде микроголограммы часть интерференционного поля выделялась диафрагмой диаметром 3 мм, расположенной непосредственно на поверхности фоточувствительной пластины.

Количество записываемых микроголограмм на одну мультиплексную голограмму определяется не только угловой селективностью и динамическим диапазоном регистрирующего материала, но также габаритными соображениями, поскольку изображения со всех наложенных голограмм восстанавливаются одновременно и должны быть пространственно разнесены. Экспериментально проверена возможность записи мультиплексных голограмм, каждая из которых содержит 20 микроголограмм. Время ввода цифровой информации на один ЖК-ПВМС 16 мс, а период записи 20 мс. При этом общее время записи информации на мультиплексную голограмму составляет 0,4 с.

Считывание информации с мультиплексной голограммы осуществляется пучком, идентичным опорному пучку, использовавшемуся при записи микроголограмм. Восстанавливаются пространственно разделенные пучки, тождественные предметным пучкам, а оси восстановленных пучков равномерно распределяются на конической поверхности с углом при вершине  $90^\circ$ . Несмотря на небольшую толщину чувствительного слоя галогенида серебра ( $T \sim 7-12$  мкм), осуществляется брэгговская селекция 1-го порядка, что позволяет избежать наложения разных порядков дифракции и уменьшает перекрестные помехи.

На макете АОГП были записаны мультиплексные голограммы вплотную друг к другу в виде ортогональной матрицы с шагом 3 мм. Предельная размерность матрицы, которая была записана на фоточувствительную пластину размером  $127 \times 127$  мм<sup>2</sup>, -  $40 \times 40$  мультиплексных голограмм. В дальнейшем размер мультиплексной голограммы может быть существенно уменьшен, а число наложенных микроголограмм увеличено посредством совершенствования оптической системы устройства.

На рис. 3а приведена структура информационной страницы, выводимой на ЖК-ПВМС при записи микроголограммы. Структура представляет собой "шахматное поле". Каждая клетка шахматного поля соответствует одному биту информации (включая кодирование информации) и представлена участком ЖК-ПВМС 4×4 пиксела, что позволяет уверенно производить запись и считывание информационной страницы емкостью 200×150 бит. На рис. 3б приведена фотография фрагмента, восстановленного с микроголограммы и спроецированного на поверхность матричного фотоприемника. В качестве фотоприемного устройства в системе считывания был использован матричный приемник на КМОП матрице типа MT9T001P12STC (производства *Micron Technology Inc.*) с числом пикселей 1600×1200, быстродействием до 20 кадров/с (время считывания одной страницы 50 мс), размером пиксела 3,0×3,2 мкм, размером активной области 6,55×4,92 мм.

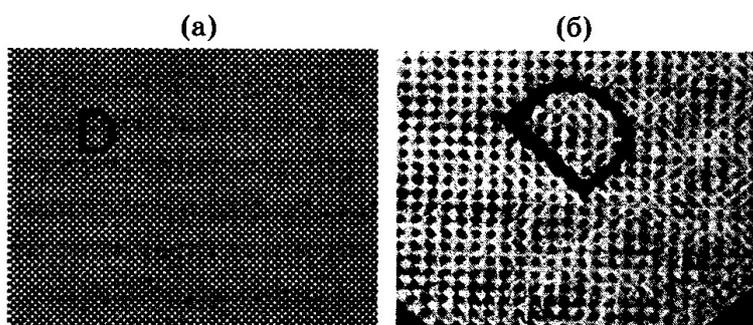


Рис. 3. Фотографии структуры входной страницы информации, подаваемой на ПВМС (а), и фрагмента выходной страницы информации на фотоприемнике (б)

Таким образом, в ходе экспериментов по записи матрицы голограмм были получены следующие параметры матрицы мультиплексных голограмм: число мультиплексных голограмм в матрице - до 40×40 шт., диаметр одной мультиплексной голограммы 2,5 - 3 мм, число наложенных микроголограмм на одну фоточувствительную площадку - от 10 до 20 шт., общее количество микроголограмм - до 32000 шт., информационная емкость матрицы мультиплексных голограмм (при размере пластинки 127×127 мм) - до 150 Мбайт.

В ходе проведенных исследований в области разработки устройств АОГП был предложен метод мультиплексирования, который позволяет обеспечить достаточно высокую скорость считывания информации, а также исключить вращательное движение элементов устройства, уменьшив тем самым требования к стабильности системы, и упростить конструкцию устройства АОГП.

Экспериментальные исследования применения данного метода в разработанной оптической системе показали возможность последовательной записи 20 наложенных микроголограмм путем последовательного электронного переключения каналов ЖК-ПВМС в записывающей головке и одновременного воспроизведения их без перекрестных искажений, что позволило записать матрицу мультиплексных микроголограмм на пластинке размером 127×127 мм информационной емкостью 150 Мбайт.

Предложенный метод обеспечивает возможность использования относительно тонких регистрирующих сред, как например, серийно выпускаемых отечественной промышленностью галогенидосеребряных материалов. В пределе принципиально возможна запись фазово-рельефных мультиплексных голограмм на подходящих регистрирующих средах, например, на фоторезистивных материалах. Это дает возможность тиражирования записанной рассмотренным методом информации известными способами копирования поверхностного рельефа.

# ОПТИЧЕСКИЕ КОГЕРЕНТНЫЕ УСТРОЙСТВА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

## 1. Схема двойного преобразования Фурье при когерентном оптическом излучении

В этом случае оптическая система состоит из двух тонких линз. Расположение линз, пространство предметов и пространство изображений показано на рис. 1. На рисунке изображен случай, когда линзы имеют одинаковое фокусное расстояние  $F$ . В общем случае эти расстояния могут быть различными. При этом появляется лишь масштабные коэффициенты, зависящие от фокусных расстояний.

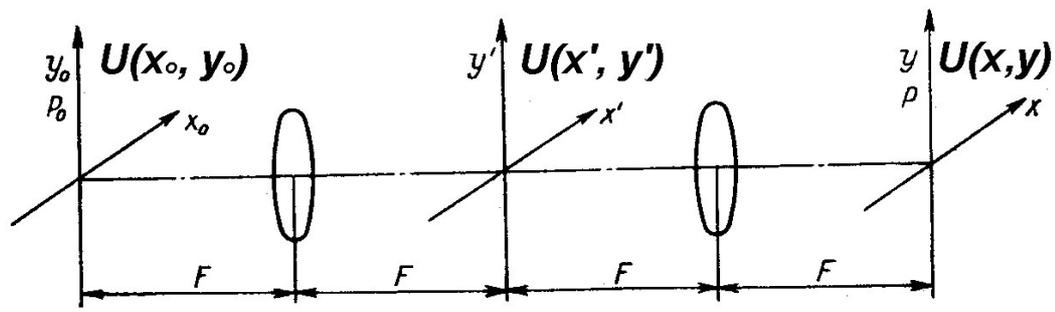


Рис. 1. Оптическая схема для двойного преобразования Фурье

В приближении Френеля для параксиальных лучей распределение комплексных амплитуд в плоскости  $x'O'y'$ , которая совмещена с задним фокусом первой линзы, будет представлять собой двумерное Фурье-преобразование от распределения комплексных амплитуд в плоскости  $x_0O_0y_0$ :

$$\begin{aligned}
 U(x'; y') &= \frac{1}{\lambda F} \iint_{-\infty}^{\infty} U(x_0; y_0) \cdot \exp [j \cdot 2\pi(x_0 f'_x + y_0 f'_y)] dx_0 dy_0 = \\
 &= U(\lambda F f'_x; \lambda F f'_y) = \frac{1}{\lambda F} U(f'_x; f'_y) \quad . \quad (1) \\
 f'_x &= \frac{x'}{\lambda F}; \quad f'_y = \frac{y'}{\lambda F}
 \end{aligned}$$

Вторая линза осуществляет двумерное преобразование Фурье уже от распределения комплексных амплитуд  $U(x'; y')$  так, что в плоскости  $(xOy)$

распределение комплексных амплитуд  $U(x; y)$  будет Фурье-образом от распределения  $U(x'; y')$ . Математически это запишется так:

$$U(x; y) = \frac{1}{\lambda F} \iint_{-\infty}^{\infty} U(x'; y') \cdot \exp [j \cdot 2\pi(f_x x' + f_y y')] dx' dy', \quad (2)$$

где  $f_x = x/\lambda F$ ;  $f_y = y/\lambda F$ . Т. к.  $dx' = \lambda F df'_x$ ,  $dy' = \lambda F df'_y$ , то можно

записать с учетом (1)  $U(x; y) = \frac{1}{\lambda F} U(f'_x; f'_y)$ :

$$U(x; y) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(f'_x; f'_y) \exp [j \cdot 2\pi(f'_x x' + f'_y y')] df'_x df'_y,$$

но

$f_x x' = x x' / \lambda F = f'_x x$ ;  $f_y y' = y y' / \lambda F = f'_y y$ , ПОЭТОМУ

$$U(x; y) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(f'_x; f'_y) \exp [j \cdot 2\pi(f'_x x + f'_y y)] df'_x df'_y. \quad (3)$$

Если направления поперечных осей координат в выходной плоскости сменить на противоположные, то в повернутой системе  $x_n = -x$ ,  $y_n = -y$ . Тогда

$$U(x_n; y_n) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(f'_x; f'_y) \exp [-j \cdot 2\pi(f'_x x_n + f'_y y_n)] df'_x df'_y \quad (4)$$

и будем иметь обратное преобразование Фурье от спектра  $U(f'_x; f'_y)$ , который сам является образом Фурье от распределения комплексных амплитуд  $U(x_0; y_0)$ .

Следовательно, окончательно можно записать

$$U(x_n; y_n) = U(-x_0; -y_0). \quad (5)$$

Таким образом, в плоскости изображений распределение комплексных амплитуд  $U(x_n; y_n)$  будет представлять собой зеркальное отображение комплексных амплитуд  $U(x_0; y_0)$  в плоскости предметов.

Точно также при двухлинзовой схеме при когерентном излучении распределение интенсивности  $I(x_n; y_n)$  в выходной плоскости будет являться

зеркальным отображением распределения интенсивностей  $I(x_0; y_0)$  во входной плоскости

$$I(x_n; y_n) = I(-x_0; -y_0). \quad (6)$$

Если первая линза имеет фокусное расстояние  $F_1$ , а вторая –  $F_2$ , то связь между распределениями комплексных амплитуд  $U(x_n; y_n)$  и  $U(x_0; y_0)$  определится выражением

$$U(x_n; y_n) = \frac{F_1}{F_2} U\left(-\frac{F_2 \cdot x_0}{F_1}, -\frac{F_2 \cdot y_0}{F_1}\right), \quad (7)$$

т. е. будет иметь место преобразование масштаба изображения и значений амплитуд.

Если  $F_2 > F_1$ , то на выходе мы получим зеркальное, но увеличенное изображение. Следовательно, по закону сохранения энергии, первоначальный поток излучения будет распределен по площади в  $(F_1/F_2)^2$  большей. Значит плотность потока излучения в выходной плоскости окажется в 4 раза меньшей.

Так точке с координатами  $(x_n; y_n)$  в выходной плоскости будет соответствовать точка с координатами  $(-x_0; -y_0)$  во входной, связанных выражениями:

$$x_n = -\frac{F_2}{F_1} x_0; \quad y_n = -\frac{F_2}{F_1} y_0. \quad (8)$$

Однако использовать двухлинзовую систему для получения зеркального изображения пусть даже с преобразованием масштаба нерационально, т. к. эти преобразования лучше и качественнее выполняют другие, зачастую более простые оптические системы, например, просто зеркало или одиночная линза. Весь смысл использования подобных двухлинзовых систем, осуществляющих двойное преобразование Фурье состоит в том, что помещая преобразователи спектра в плоскость  $x'O'y'$  можно трансформировать изображение в выходной плоскости с той или иной

целью, для выполнения тех или иных задач. Примеры информационных задач, которые может решать двухлинзовая система рассмотрены ниже.

## 2. Пространственная фильтрация сигналов при когерентном излучении

Располагая схемой двойного преобразования Фурье, можно построить систему пространственной фильтрации когерентного поля излучения. Для реализации такой системы в плоскости  $x'O'y'$ , где формируется двумерный образ Фурье  $(\mathcal{F})^{-1} \cdot U(f'_x; f'_y) = U(\lambda F f'_x; \lambda F f'_y)$  от распределения комплексных амплитуд  $U(x_0; y_0)$ , в плоскости  $x_0O_0y_0$  необходимо построить фильтр с пространственно-частотной передаточной функцией (с модуляционной характеристикой)

$$T(x'; y') = T(\lambda F f'_x; \lambda F f'_y). \quad (9)$$

Такой фильтр может изменять в плоскости  $x'O'y'$  как амплитуду, так и фазу (либо и то, и другое) комплексных амплитуд  $U(\lambda F f'_x; \lambda F f'_y)$ . Здесь все время подчеркивается связь в плоскости пространственных частот линейных координат и пространственных частот

$$x' = \lambda F f'_x; \quad y' = \lambda F f'_y.$$

В общем случае этот фильтр может быть представлен произведением

$$T(f'_x; f'_y) = T_A(f'_x; f'_y) \cdot \exp[j\varphi_T(f'_x; f'_y)], \quad (10)$$

где  $T_A(f'_x; f'_y)$  - амплитудная модуляционная характеристика;  $\varphi_T(f'_x; f'_y)$  - фазовая модуляционная характеристика фильтра. В простейшем случае фильтр с амплитудной  $T_A(f'_x; f'_y)$  может представлять собой кадр, зафиксированный на фотопленке в виде пространственного распределения коэффициента пропускания. Фазовый же фильтр – это пространственное распределение показателя преломления. Получить его можно по технологии отбеливания голограмм.

Если сам фильтр является тонким, то связь распределения амплитуды поля на входе  $U_1(f'_x; f'_y)$  и выходе  $U_2(f'_x; f'_y)$  будет определяться просто произведением входного распределения амплитуд на модуляционную характеристику фильтра

$$U_2(f'_x; f'_y) = U_{1A}(f'_x; f'_y) \cdot T_A(f'_x; f'_y) \times \exp\{j[\varphi_U(f'_x; f'_y) + \varphi_T(f'_x; f'_y)]\}, \quad (11)$$

где  $U_{1A}(f'_x; f'_y)$  - распределения вещественных амплитуд поля на входе в фильтр, а  $\varphi_U(f'_x; f'_y)$  - распределение фаз поля на входе в фильтр, т. е.

$$U_1(f'_x; f'_y) = U_{1A}(f'_x; f'_y) \exp[j\varphi_U(f'_x; f'_y)]. \quad (12)$$

Для краткости

выражение (12) можно записать и так:

$$U_2(x'; y') = U_1(x'; y') \cdot T(x'; y') = U_1(\lambda f'_x; \lambda f'_y) \cdot T((\lambda f'_x; \lambda f'_y)). \quad (13)$$

Вторая тонкая линза преобразует распределение комплексных амплитуд, но уже  $U_2(f'_x; f'_y)$ , в его двумерный образ Фурье согласно выражению

$$U(x; y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_2(f'_x; f'_y) \exp[j \cdot 2\pi(f'_x x + f'_y y)] df'_x df'_y. \quad (14)$$

В качестве примера пространственной фильтрации приведем эксперимент Аббе-Портера. Схема этого эксперимента приведена на рис. 2.

В плоскости  $x_0 O_0 y_0$  (рис. 2 а) перпендикулярно оптической оси установлена сетка из проволоки с равномерным шагом, освещаемая плоской волной когерентного излучения. В плоскости  $x'O'y'$  первой линзой формируется пространственно-частотный спектр Фурье в виде светящихся кружков, в которых интенсивность имеет круговую структуру. Здесь получается наложение картин дифракции от двух взаимно перпендикулярных дифракционных решеток. Вторая линза осуществляет

обратное двумерное преобразование Фурье, в результате в плоскости  $xOy$  вновь получается изображение сетки.

Если теперь в плоскости  $x'O'y'$ , где расположен спектр  $U(f'_x; f'_y)$ , поставить очень узкую щель вдоль оси  $x'$  (рис. 2 б), которая будет пропускать только излучение, расположенное в ближайшей окрестности около оси  $x'$ , то в плоскости  $xOy$  после второй линзы образуются вертикальные полосы (рис. 2 б). Если же узкую щель расположить вдоль оси  $y'$ , то в плоскости  $xOy$  полосы будут распространяться параллельно оси  $x$  (рис. 2 в).

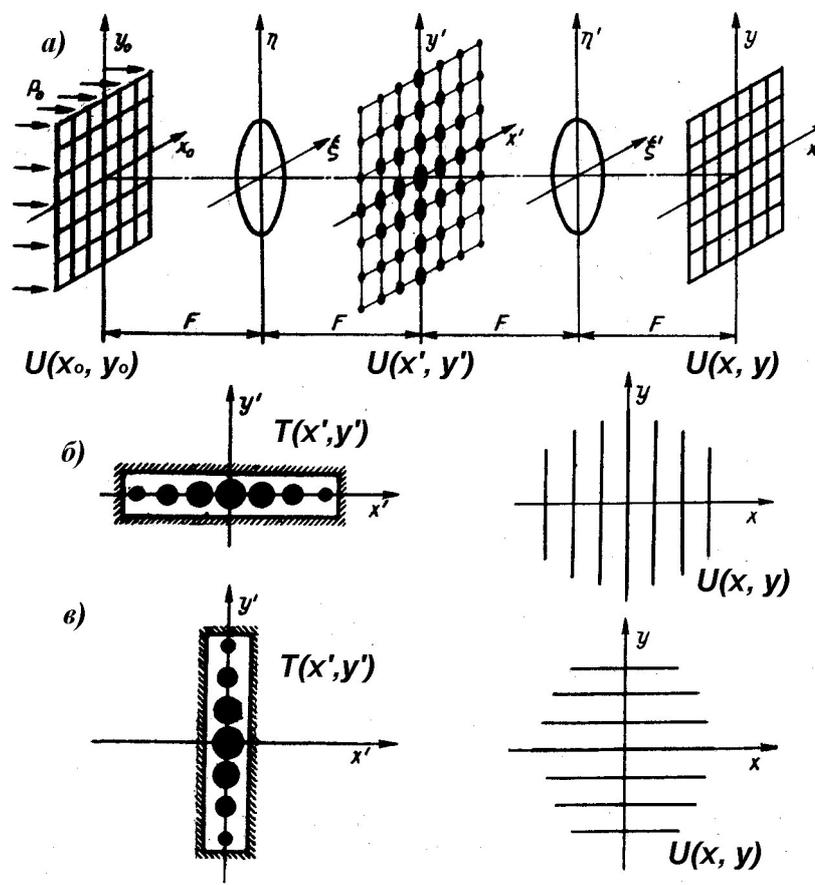


Рис. 2. Схема эксперимента Аббе-Портера

В этом эксперименте щель как раз и выполняет роль пространственного фильтра. Тут и видны перспективы использования подобной двухлинзовой системы, осуществляющей двойное преобразование Фурье: 1) преобразование изображений (из сетки в систему параллельных линий); 2) распознавание прямолинейных объектов заданной ориентации.

Если в плоскости  $x'O'y'$  поставить круглую ирисовую диафрагму, то, постепенно увеличивая диаметр диафрагмы, можно посмотреть последовательность Фурье-синтеза изображения сетки. Если же вместо диафрагмы поставить экран, закрывающий в плоскости  $x'O'y'$  центральный светящийся кружок, являющийся компонентой нулевой пространственной частоты, то в плоскости  $xOy$  получится изображение с обращенным контрастом, т.е. темным полосам в плоскости  $x_0O_0y_0$  будут соответствовать светлые полосы плоскости  $xOy$ , и наоборот.

В приведенном примере фильтр  $T(f'_x; f'_y)$  осуществляет модуляцию сигнала по амплитуде, т. е. является амплитудным. При этом фильтрация осуществляется по интенсивности излучения. Частотная передаточная функция оптической системы по интенсивности  $W_I(f'_x; f'_y)$  связана с частотной передаточной функцией по амплитуде  $W_U(f'_x; f'_y)$  соотношением

$$W_I(f'_x; f'_y) = |W_U(f'_x; f'_y)|^2. \quad (15)$$

### 3. Частотная пространственная фильтрация в целях распознавания или обнаружения полезного сигнала

Во многих практических случаях в пространстве предметов наряду с полезным сигналом, представленным распределением  $U_C(x_0; y_0)$ , присутствует некоторое количество сигналов-помех, заданных суммой комплексных амплитуд  $U_{ni}(x_0; y_0)$ . Общее распределение комплексных амплитуд в этом случае определяется их суммой

$$U(x_0; y_0) = U_C(x_0; y_0) + \sum_{i=1}^N U_{ni}(x_0; y_0). \quad (16)$$

Необходимо построить фильтр на базе двукратного преобразования Фурье, который позволил бы решить вопрос о наличии полезного сигнала в этой смеси (распознать образ полезного сигнала).

После первой линзы в плоскости  $x'O'y'$  мы получим пространственно-частотный спектр этого распределения, который в силу линейности Фурье-преобразования также будет являться суммой

$$U(f'_x; f'_y) = U_C(f'_x; f'_y) + \sum_{i=1}^N U_{ni}(f'_x; f'_y). \quad (17)$$

Установим в плоскости  $x'O'y'$  пространственный фильтр, комплексное пропускание которого удовлетворяет условию

$$T(f'_x; f'_y) = U_C^*(f'_x; f'_y), \quad (18)$$

где  $U_C^*(f'_x; f'_y)$  - функция, комплексно сопряженная функции  $U_C(f'_x; f'_y)$ . Такой фильтр называется согласованным.

На выходе фильтра получим спектр сигнала, который примет вид

$$\begin{aligned} U'(f'_x; f'_y) &= U(f'_x; f'_y) \cdot U_C^*(f'_x; f'_y) = \\ &= (U_C(f'_x; f'_y))^2 + \sum_{i=1}^N U_{ni}(f'_x; f'_y) \cdot U_C^*(f'_x; f'_y), \end{aligned} \quad (19)$$

где  $U(f'_x; f'_y)$  - Фурье-образ сигнала до согласованного фильтра, а  $U'(f'_x; f'_y)$  - после фильтра. Фильтр, естественно, считается тонким.

Поскольку функция  $|U_C(f'_x; f'_y)|^2$  является действительной, т. е. фаза электромагнитной волны постоянна в Фурье-плоскости, следовательно волна, описываемая выражением  $|U_C(f'_x; f'_y)|^2$  является плоской. Более того ее направление распространения совпадает с оптической осью двухлинзовой системы (осью  $z$ ). Тогда второй линзой этот плоский фронт фокусируется в точку в плоскости  $xOy$ . Слагаемые, стоящие под знаком суммы в (19), формируют в плоскости  $xOy$  некоторое распределение, зависящее от структуры отдельных составляющих, т. е. некоторый фон.

Следовательно, если в центре плоскости  $xOy$  имеется ярко светящаяся точка, то в пространстве предметов находится полезный сигнал  $U_C(x_0; y_0)$ . Если же такой яркой точки нет, то в пространстве предметов полезный сигнал отсутствует. Поскольку от вида распределения  $U_C(f'_x; f'_y)$  зависит и

вид фильтра  $T(f'_x; f'_y)$ , то эта задача может быть отнесена к распознаванию образов.

Все сказанное относится к случаю, когда распределение  $U_c(x_0; y_0)$  и  $U_n(x_0; y_0)$  являются детерминированными. На практике они носят случайный характер. В этом случае решение задачи распознавания и обнаружения будет носить вероятностный характер. Сама процедура решения подобной задачи должно базироваться на методах оптимальной фильтрации.

Здесь опять хочется обратить внимание на то, формирование светящейся точки, соответствующей обнаруженному сигналу происходит со скоростью распространения света от плоскости  $x_0O_0y_0$  до плоскости  $xOy$ , а для фиксации этой точки достаточно одноэлементного или точечного фотоприемника, например, фотодиода. Сигнал одноэлементного фотоприемника формируется гораздо быстрее, чем линейного или матричного.

### 3. Выполнение операции свертки (корреляции) двумерных функций

Свёрткой или корреляцией двух функций называется интеграл:

$$F(x; y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F_1(x_0; y_0) \cdot F_2(x - x_0; y - y_0) dx_0 dy_0, \quad (20)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – вещественные функции. Физическая интерпретация подобного интеграла применительно к изображениям состоит в том, что, если функция  $F(x, y)$  в некоторой точке с координатами  $(x_m, y_m)$  имеет максимум, то велика вероятность наличия на изображении, описываемого функцией  $F_1(x, y)$ , в точке с координатами  $(-x_m, -y_m)$  имеется фрагмент, очень похожий на на изображение, описываемое функцией  $F_2(x, y)$ .

Для выполнения этой операции опять-таки применима оптическая система с двумя тонкими линзами, собранная по схеме двойного преобразования Фурье. В плоскости  $x_0O_0y_0$  устанавливается фильтр с амплитудной модуляционной характеристикой  $T_1(x_0; y_0) \sim F_1(x_0; y_0)$ , на который направляется плоский фронт волны когерентного излучения с

постоянной амплитудой  $A_0$ . В задней фокальной плоскости в приближении Френеля распределение комплексных амплитуд будет пропорционально образу Фурье от модуляционной характеристики фильтра

$$U(f'_x; f'_y) = U(\lambda F f'_x; \lambda F f'_y) = \frac{A_0}{\lambda F} FT[T_1(x_0; y_0)], \quad (21)$$

где

$$FT[T_1(x_0; y_0)] = \iint_{-\infty}^{\infty} T_1(x_0; y_0) \cdot \exp[2\pi i(f'_x x_0 + f'_y y_0)] dx_0 dy_0 \quad (22)$$

преобразование Фурье в данном случае от функции  $T_1(x_0; y_0)$ .

В плоскости  $x'O'y'$  устанавливается второй амплитудный фильтр с модуляционной характеристикой  $T_2(f'_x; f'_y) = T_2(\lambda F f'_x; \lambda F f'_y)$ , значение которой пропорционально образу Фурье  $F_2(f'_x; f'_y)$  от функции  $F_2(x_0; y_0)$

$$F_2(f'_x; f'_y) = FT[F_2(x_0; y_0)]. \quad (23)$$

Распределение комплексных амплитуд на выходе второго фильтра в плоскости  $x'O'y'$  определится по выражению

$$\begin{aligned} U'(x'; y') &= U'(\lambda F f'_x; \lambda F f'_y) = \\ &= \frac{A_0}{\lambda F} FT[F_1(x_0; y_0)] FT[F_2(x_0; y_0)]. \end{aligned} \quad (24)$$

Это выражение пропорционально произведению спектров Фурье от функции  $F_1(x_0; y_0)$  и  $F_2(x_0; y_0)$ . В соответствии со свойствами преобразования Фурье, произведение спектров двух функций является преобразованием Фурье от интеграла свертки. Таким образом, получив сигнал пропорциональный произведению Фурье-образов двух функций, мы имеем сигнал, пропорциональный Фурье-образу интеграла свертки. Поскольку существует взаимнооднозначное соответствие между Фурье-образом и оригиналом, то после второй линзы, производящей обратное преобразование Фурье, в плоскости  $xOy$  получится распределение комплексных амплитуд

$$U(x; y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_1(f'_x; f'_y) \cdot T_2(f'_x; f'_y) \cdot \exp[-j \cdot 2\pi(f'_x x + f'_y y)] df'_x df'_y, \quad (25)$$

центрально симметричное отображение которого будет пропорционально интегралу свертки

$$F(x; y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(x_0; y_0) \cdot F_2(x - x_0; y - y_0) dx_0 dy_0 \sim U(-x; -y), \quad (26)$$

т. е. значение функций  $F(x; y)$  в точке  $(x; y)$  будет пропорционально значению амплитуды поля в точке с координатами  $(-x; -y)$ .

Поскольку свертка двух вещественных функций есть функция вещественная, то распределение интенсивностей в выходной фокальной плоскости второй линзы будет просто пропорционально  $F^2(x; y)$ . Распределение интенсивностей просто измерить, совместив с этой плоскостью матричный фотоприемник. Матрица сигналов фотоприемника  $S_{ij}$  будет пропорциональна, с учетом центральной симметрии квадратам функции свертки

$$S_{ij} \sim F_{ij}^2. \quad (27)$$

Тогда извлекая квадратный корень из элементов матрицы сигналов фотоприемника можно получить матрицу значений функции свертки с точностью до знака

$$F_{ij} \sim \pm \sqrt{S_{ij}}. \quad (28)$$

Чтобы не проделывать центрально симметричные преобразования координат с электрическим сигналом, т. к. эта процедура может занять много времени, между второй линзой и ее выходной фокальной плоскостью можно установить зеркало так, чтобы линия пересечения его плоскости с плоскостью  $xOy$  составила бы угол  $45^\circ$  с осью  $x$ . Тогда это центрально симметричное преобразование координат будет произведено параллельно и со скоростью света.

## ДВУМЕРНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ И ЕГО МОДЕЛИ.

Оптическим сигналом называют световую волну, несущую определенную информацию.

Особенностью световой волны по сравнению с радиоволной является то, что вследствие малой длины волны в ней может быть практически осуществлена передача, прием и обработка сигналов, модулированных не только во времени, но и по пространственным координатам. Это позволяет значительно увеличить объем вносимой в оптический сигнал информации и проводить ее параллельную обработку.

Оптический сигнал в общем случае является функцией четырех переменных: трех пространственных координат  $(x, y, z)$  и времени  $(t)$ .

Электромагнитная волна представляет собой изменение во времени в каждой точке пространства электрического и магнитного полей, связанных между собой законами индукции. Электромагнитная волна распространяется в пространстве от одной точки к другой. В свободном пространстве и однородных изотропных средах она характеризуется взаимно перпендикулярными векторами напряженностей электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей, которые изменяются во времени по одному и тому же гармоническому закону. Вследствие взаимно однозначной связи между векторами  $E$  и  $H$  поведение световой волны можно описать векторной функцией  $U(x, y, z, t)$ , под которой можно понимать вектор напряженности электрического или магнитного полей. В оптике для этой цели чаще всего используют электрические поля, что удобно при рассуждении о взаимодействии волны с электрическими зарядами. Запись  $U(x, y, z, t)$  лишь демонстрирует наше умение переводить рассуждение о электромагнитной волне в какие-то компактные обозначения.

Кроме того, в подавляющем большинстве современных систем обработки информации, использующих пространственную обработку, интересуются изменением амплитуд и состоянием поляризации электромагнитной волны по пространственным координатам. Поэтому

используют представление вектора напряженности электрического поля в форме, позволяющей разделить пространственно-временные зависимости на пространственные и временные. Полное разделение удобно представить, используя комплексное представление вектора напряженности:

$$U(x, y, z, t) = P(x, y, z) \cdot A(x, y, z) \cdot e^{j\varphi(x, y, z)} \cdot e^{j2\pi\nu t} \quad (1)$$

Здесь  $P(x, y, z)$  - единичный по длине вектор, определяющий состояние поляризации световой волны в точке с пространственными координатами  $(x, y, z)$ ,  $A(x, y, z)$  - амплитуда колебаний напряженности электрического поля в точке с координатами  $(x, y, z)$ ,  $\varphi(x, y, z)$  - фаза световой волны в точке  $(x, y, z)$ . Начальную фазу можно принять равной нулю в любой произвольной точке пространства. Тогда функция координат  $\varphi(x, y, z)$  будет характеризовать разность фаз напряженности в этой точке и точке  $(x, y, z)$ . Для лазерных информационных систем рассматриваются когерентные волны, т.е.  $\nu = \text{const}$ , чем и определяется вид временного множителя.

Выражение (1) без конкретизации вида множителей в него входящих также не позволяет решать задачи распространения волн в физических средах. Кроме того, являясь произведением 4-х множителей даже при конкретизации их вида, оно нуждается в дальнейших упрощениях.

Лазерные информационные системы, объектом обработки которых является поперечное сечение лазерного пучка, не изменяют частоту колебаний напряженности электрического и магнитного полей световой волны. Поэтому временной множитель  $\exp(j2\pi\nu t)$ , являющийся гармонической функцией времени, обычно опускают. Он может быть введен, если это необходимо, на любом этапе преобразований.

Системы обработки двумерных распределений напряженности электрического поля представляют собой оптические элементы, на поверхность которых свет попадает почти перпендикулярно. Поэтому они - эти оптические элементы лазерных информационных систем (ЛИС) - практически не влияют на поляризацию взаимодействующего с ними

излучения. Тогда основным элементом преобразования будут амплитуда и фаза световой волны:

$$U(x, y, z) = A(x, y, z) \cdot e^{j\varphi(x, y, z)}, \quad (2)$$

которую называют комплексной амплитудой. Именно комплексная амплитуда и являются объектом преобразования ЛИС. При переходе от (1) к (2) мы привели физическую аргументацию для избавления от двух сомножителей и теперь попробуем конкретизировать вид двух оставшихся сомножителей так, чтобы выражения для них позволили бы нам аналитически решить какой-то пусть и ограниченный класс задач по распространению и взаимодействию электромагнитных волн с оптическими элементами.

Для достижения этой цели привлекаются модели плоской и сферической волн. Во-первых, потому, что аналитические выражения для них известны, просты и изучены, во-вторых, экспериментально умеют получать плоские и сферические волны для экспериментальной проверки полученных выводов и использования в ЛИС.

### 1. Модель плоской волны

Наиболее просто описывается поведение комплексной амплитуды плоской волны в свободном пространстве. Волну называют плоской, если ее амплитуда и фаза в любой момент времени постоянны по всей плоскости.

Уравнение плоскости можно задать в виде (вспомните аналитическую геометрию):

$$\vec{n} \cdot \vec{r} = C = const, \quad (3)$$

где  $\vec{n}$  - единичный вектор, нормальный к плоскости рассматриваемой плоскости,  $\vec{r}$  - радиус-вектор точки  $M(x, y, z)$ , принадлежащей этой плоскости (рис. 1)

Плоская волна имеет комплексную амплитуду

$$U(x, y, z) = A_0 \cdot \exp(-jknr), \quad (4)$$

где  $A_0$  – постоянная амплитуда,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число. Плоскости равных фаз с течением времени перемещаются параллельно самим себе в направлении вектора  $n$ , т. е. волна распространяется в направлении вектора нормали плоскости равной фазы.

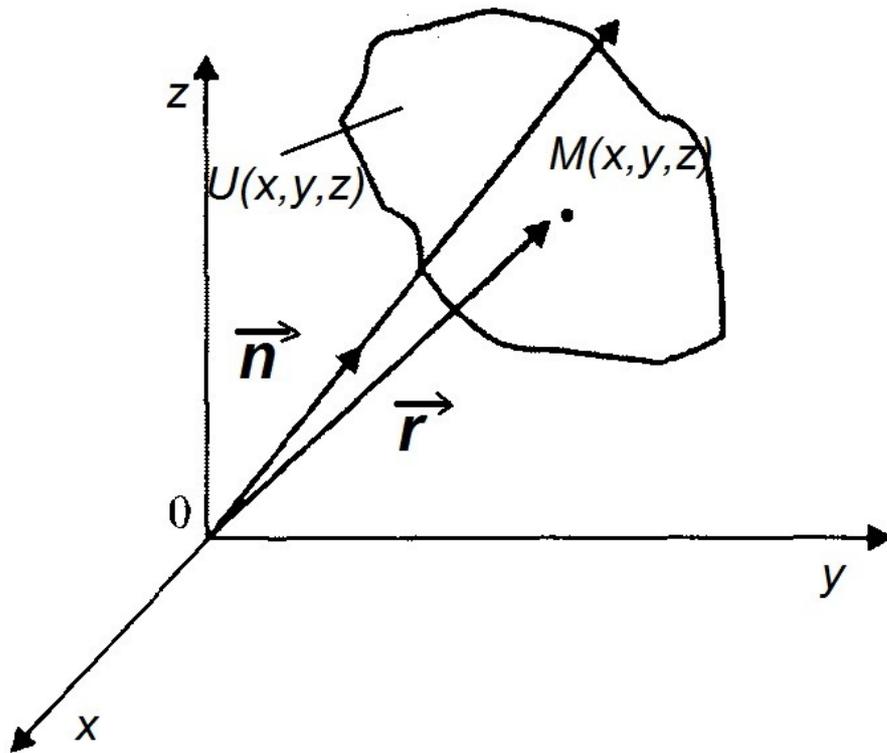


Рис. 1. Представление плоской волны

Если  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$ ,  $\cos \gamma$  – направляющие косинусы вектора  $n$ , то выражение (4) примет вид

$$\begin{aligned}
 U(x, y, z) &= A_0 \cdot \exp \left[ -2\pi i x \left( \frac{\cos \alpha}{\lambda} + y \frac{\cos \beta}{\lambda} + z \frac{\cos \gamma}{\lambda} \right) \right] = \\
 &= A_0 \cdot \exp[-2\pi i(\xi x + \eta y + \zeta z)]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где

$$\xi = \frac{\cos \alpha}{\lambda} \quad \eta = \frac{\cos \beta}{\lambda} \quad \zeta = \frac{\cos \gamma}{\lambda}.
 \tag{6}$$

Величины  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$  представляет собой пространственные частоты, обратные периодам волн, измеряемым соответственно по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  в обратных метрах.

Поскольку

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1,$$

то

$$\lambda^2 \xi^2 + \lambda^2 \eta^2 + \lambda^2 \zeta^2 = 1$$

и

$$\zeta = \pm \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \xi^2 - \lambda^2 \eta^2}.$$

При описании преобразований, производимых ЛИС над поперечным сечением лазерного пучка, систему координат выбирают таким образом, чтобы волна распространялась практически вдоль оси  $z$ , отклоняясь от нее на небольшие углы, т. е. рассматривается параксиальное приближение ( $\gamma \approx 0^\circ$ ,  $\alpha, \beta \approx 90^\circ$ ). Тогда, если ввести дополнительные углы

$$\alpha_1 = 90^\circ - \alpha \quad \beta_1 = 90^\circ - \beta \quad \gamma_1 = 90^\circ - \gamma,$$

то

$$\cos \alpha = \sin \alpha_1 \approx \alpha_1; \quad \cos \beta = \sin \beta_1 \approx \beta_1; \quad \cos \gamma = \sin \gamma_1 \approx 1.$$

В этом случае комплексная амплитуда плоской волны примет вид:

$$\begin{aligned} U(x, y, z) &= A_0 \cdot \exp[-jk(\alpha_1 x + \beta_1 y + z)] = \\ &= A_0 \cdot \exp(-jkz) \cdot \exp[-jk(\alpha_1 x + \beta_1 y)] \end{aligned} \quad (7)$$

Если плоская волна распространяется точно вдоль оси  $z$ , то амплитуда поля в плоскости  $z=0$ , т. е. в плоскости, проходящей через начало координат и перпендикулярной оси  $z$ , т. е. в плоскости  $xOy$  есть

$$U(x, y, z) = A_0, \quad (8)$$

т. к.  $\alpha_1 = \beta_1 = 0$  и  $z = 0$ .

Введенные упрощения, с одной стороны, сохраняют основные атрибуты, присущие плоской волне, распространяющейся приблизительно вдоль оси  $z$  (постоянную амплитуду, пространственную частоту вдоль оси  $z$ ), а, с другой стороны, позволяют отвечать на вопросы, что будет происходить, если возникнут небольшие отклонения распространения от оси  $z$ . Например, если хотят измерить разность фаз сигнала вдоль оси  $z$ , то должны отслеживать расстояния между двумя фотоприёмниками (если бы таковые существовали) с погрешностями в доли  $\lambda$  или иметь пространственное разрешение в доли  $\lambda$ . Если же подобные измерения проводить в направлениях  $x$  или  $y$ , то будет достаточно более грубого разрешения  $\lambda/(\alpha_l$  или  $\beta_l$ ). Фазу волны можно измерить голографическими методами. Ещё можно заметить, что выражение (7) проще чем (5), т.к. не содержит тригонометрических функций в показателе степени.

## 2. Модель сферической волны

Амплитуда расходящейся сферической волны представляется в виде

$$U(x, y, z) = A \frac{\exp(-jkr)}{r}, \quad (9)$$

где  $A$  – нормировочная постоянная.

Если волна исходит из начала координат, то

$$U(x, y, z) = \frac{A \cdot \exp\left(-jk\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}. \quad (10)$$

Поверхность равных фаз сферической волны определяется из условия  $kr = \text{const}$ . Это означает, что поверхностью равных фаз, т. е. волновой поверхностью, является сфера. Направление распространения волны совпадает с направлением радиуса-вектора  $r$ .

Параксиальное приближение для сферической волны имеет в том случае, когда

$$z^2 \gg x^2 + y^2. \quad (11)$$

При этом

$$\begin{aligned}
\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} &= z\sqrt{1 + \frac{x^2 + y^2}{z^2}} = \\
&= z\sqrt{1 + \frac{x^2 + y^2}{z^2} + \left(\frac{x^2 + y^2}{z^2}\right)^2 - \left(\frac{x^2 + y^2}{z^2}\right)^2} \approx . \\
&\approx z\left(1 + \frac{x^2 + y^2}{2z^2}\right) = z + \frac{x^2 + y^2}{2z}
\end{aligned} \tag{12}$$

Выражение (12) получается из следующих соображений. Пусть  $a^2 \gg b^2$

$$\begin{aligned}
\sqrt{a^2 + b^2} &= a\sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} = a\sqrt{1 + 2\left(\frac{b^2}{2a^2}\right) + \frac{b^4}{4a^4} - \frac{b^4}{4a^4}} = \\
&= a\sqrt{\left(1 + \frac{b^2}{2a^2}\right)^2 - \frac{b^4}{4a^4}} \approx a\left(1 + \frac{b^2}{2a^2}\right)
\end{aligned} \tag{13}$$

которое часто используется для избавления от радикалов (корней). Присутствие радикалов в показателях степеней часто делает невозможным получение аналитических решений.

Теперь комплексная амплитуда сферической волны в параксиальном приближении приобретает вид:

$$U(x, y, z) \approx \frac{A}{z} \cdot \exp(-jkz) \cdot \exp\left(-jk \frac{x^2 + y^2}{2z}\right). \tag{14}$$

В выражении (14) в знаменателе вместо  $r$  записывается просто  $z$ , т. к. при выполнении условия  $z^2 \gg x^2 + y^2$  частное от деления  $\frac{A}{2}$  будет мало меняться при подобной замене. А вот в числителе отбросить множитель  $\exp\left(-jk \frac{x^2 + y^2}{2z}\right)$  не всегда правомерно. Его можно отбросить лишь при выполнении условия

$$\frac{x^2 + y^2}{2z} k \approx 0$$

$$\frac{x^2 + y^2}{2z} \frac{2\pi}{\lambda} \approx 0$$

$$\pi \frac{x^2 + y^2}{z\lambda} \approx 0$$

$$x^2 + y^2 \ll z\lambda$$

$$\rho^2 \ll z\lambda$$

$$\rho \ll \sqrt{z\lambda} = \sqrt{1 \text{ см} \cdot 1 \text{ мкм}} = \sqrt{1 \text{ см} \cdot 10^{-4} \text{ см}} = \\ = 10^{-2} \text{ см} = 0,1 \text{ мм}$$

$$\rho = 0,1 \sqrt{z\lambda} = 0,01 \text{ мм} = 10 \text{ мкм}$$

т. е. для конфигураций поля на расстоянии  $\sim 10 \text{ мкм}$  от оптической оси, тогда как интересуются распределением поля на гораздо больших расстояниях от оптической оси. Поэтому экспоненту с отношением  $\frac{(x^2 + y^2)}{z}$  оставляют.