

# Оптические передатчики

О.Е. Наний, главный редактор Lightwave RE

## Введение

В цифровых волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) и волоконно-оптических сетях кабельного телевидения (СТV) в качестве несущих информацию сигналов используются инфракрасные световые волны. Источниками и потребителями информации являются информационные системы (ИС), информация в которых представлена в виде электрических сигналов. Поэтому обязательными элементами ВОСП являются передатчики и приемники светового излучения.

● **Передатчик** – устройство, преобразующее поступающие из передающей ИС информационные электрические сигналы в выходные световые сигналы.

● **Приемник** – устройство, преобразующее входные оптические сигналы в выходные электрические сигналы, поступающие в приемную ИС.

Распространение световых сигналов по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) было рассмотрено в предыдущем номере [1]. В настоящей статье будут рассмотрены принципы работы и характеристики передатчиков и приемников оптического излучения.

## Оптические передатчики

Оптические передатчики (трансиверы), применяемые в волоконно-оптических системах связи, предназначены для преобразования

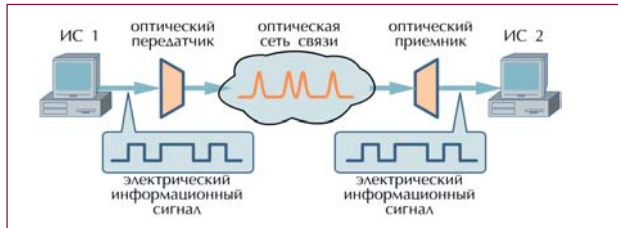


Рис.1. Схема передачи информации между двумя информационными системами по оптической сети связи

электрических сигналов в оптические. С этой целью выходное излучение оптического источника модулируется в соответствии с входными электрическими сигналами, поступающими из передающей ИС (рис.1).

Современные оптические передатчики изготавливают в виде отдельных блоков стандартных размеров. Внешний вид типичного передатчика представлен на рис.2.

Передатчики цифровых ВОСП часто изготавливаются в одном корпусе с приемниками, образуя приемопередающие оптические модули, или транспондеры.

Слово "транспондер" (transponder) было изобретено в сороковых годах нашего столетия. Transponder – это сокращение от transmitter +



Рис.2. Внешний вид передатчика оптического излучения для СТV

responder. В волоконно-оптической связи этот термин эквивалентен термину приемопередающий модуль.

По характеру модуляции оптические передатчики делятся на передатчики с прямой (внутренней) и внешней модуляцией. Схемы передатчиков указанных двух типов представлены на рис.3а, б.

В оптических передатчиках с прямой модуляцией мощность излучения источника света модулируется внешним электрическим током питания. В цифровых системах связи на основе передатчиков с прямой модуляцией используется простейший оптический формат передачи данных, при котором логическому нулю соответствует выключенное состояние источника излучения, а логической единице – включенное.

При скоростях передачи 10 Гбит/с и выше используются передатчики с внешней модуляцией. Источниками излучения в таких передатчиках, как правило, являются узкополосные одномодовые непрерывные полупроводниковые лазеры. Непрерывное оптическое излучение модулируется внешним модулятором, что обеспечивает формирование оптического сигнала с минимальной спектральной шириной. Кроме того, применение внешней модуляции позволяет использовать более сложные форматы модуляции и применять поляризационное разделение сигналов. Передатчики с внешней модуляцией используются в системах дальней связи, в которых требования к качеству оптического сигнала

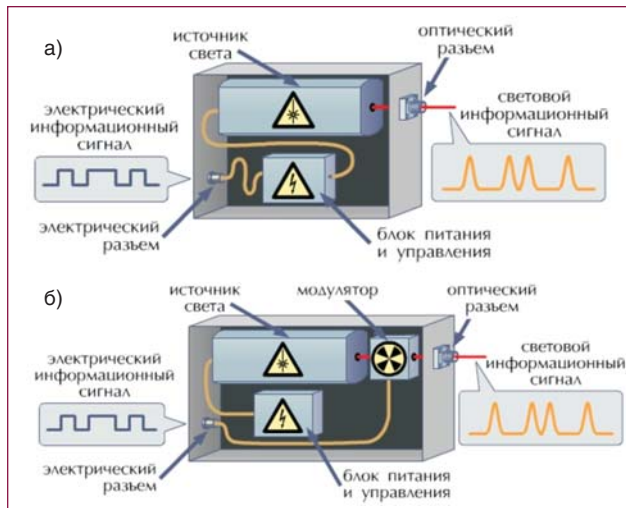


Рис.3. Схемы оптических передатчиков с прямой (а) и внешней (б) модуляцией

особенно высоки [2 – 4]. Они позволяют передавать сигналы со скоростью в десятки гигабит в секунду на тысячи километров (с использованием оптических усилителей). Максимальная скорость передачи информации, ограниченная быстродействием модулятора, составляет 40 Гбит/с. Для увеличения скорости передачи по одному каналу свыше 40 Гбит/с была предложена техника оптического временного уплотнения (OTDM). Такие системы работают со специальными источниками излучения – лазерами с синхронизацией мод. Они генерируют непрерывную последовательность ультракоротких импульсов (УКИ) света [5].

## Источники излучения в передатчиках с прямой модуляцией

Источниками излучения в оптических передатчиках с прямой модуляцией



ей являются полупроводниковые светоизлучающие диоды (светодиоды) или лазеры. Передатчики на основе светодиодов используются совместно с многомодовым волокном в низкоскоростных системах передачи информации на короткие расстояния, но постепенно вытесняются лазерными передатчиками. Основными недостатками светодиодов являются малая скорость передачи информации, малая выходная мощность, широкая полоса спектра и большая расходимость излучения.

С другой стороны, светодиоды – более дешевые и неприхотливые приборы, которые вполне подходят для ряда систем небольшой протяженности или средней протяженности, но с малой скоростью передачи информации ( $\ll 1$  Гб/с). Поэтому они широко используются в замкнутых системах видеонаблюдения, в локальных вычислительных сетях (ЛВС), в измерительных и других сетях, построенных на основе многомодового оптического волокна. Применение светодиодов в аппаратуре связи позволяет существенно удешевить приемопередающее оборудование, что и является причиной использования кабелей с многомодовым волокном при строительстве ЛВС. В настоящее время с учетом снижения стоимости лазеров целесообразно применять вместо многомодового оптического волокна со светодиодами одномодовое оптическое волокно с лазерами в качестве оптических передатчиков.

В городских сетях связи и системах дальней связи в качестве источников излучения используются полупроводниковые лазеры, обеспечивающие существенно большую вводимую в одномодовое волокно мощность, максимальную скорость передачи информации и обладающие существенно более узким спектром излучения по сравнению со светодиодами.

В системах связи со скоростью менее 2,5 Гбит/с используются простейшие лазеры с резонатором Фабри – Перо и прямой модуляцией (рис.4).

При скоростях передачи информации  $V = 2,5$  Гбит/с и выше необходимо использовать лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) или лазеры с распределенными брэгговскими отражателями (РБО), в которых обеспечивается эффективная селекция мод и сужение спектра излучения (рис.5, б). При скорости 2,5 Гбит/с допустимо использование прямой модуляции РОС-лазера.

В будущих сетях связи возможно широкое использование лазеров с вертикальным резонатором (рис.7). Важнейшее потенциальное достоинство таких лазеров заключается в возможности массового производства и тестирования (на одном полупроводниковом кристалле может быть изготовлено несколько сот лазеров одновременно), что, как ожидается, приведет к значительному снижению их стоимости.

Главное преимущество лазеров с прямой модуляцией – экономическое, т.к. такие устройства намного дешевле лазеров с внешней модуляцией. Главный недостаток – наличие паразитной частотной модуляции (ЧМ), или чирпа (Chirp). Чирп приводит к расширению спектра излучения и, как правило, к сокращению дальности широкополосной передачи информации.

В лазерах с вертикальным резонатором излучение направлено перпендикулярно р-п-слою. Сверху и снизу от активной среды расположены слои полупроводников с периодически изменяющейся величиной показателя преломления. Слои выполняют функции лазерных зеркал, и излучение лазера направлено вертикально вверх, то есть перпендикулярно плоскости слоев.

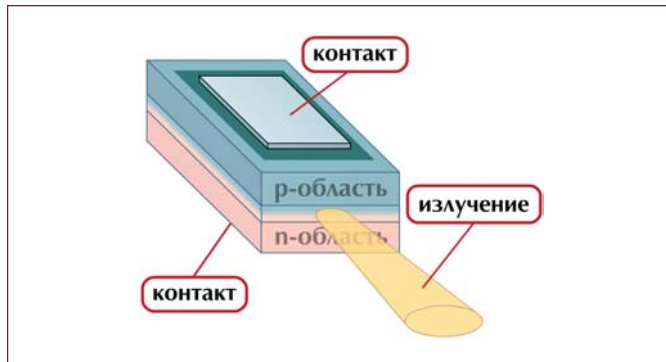


Рис.4. Полупроводниковый лазер с резонатором Фабри – Перо. Роль зеркал-отражателей выполняют торцы полупроводникового кристалла

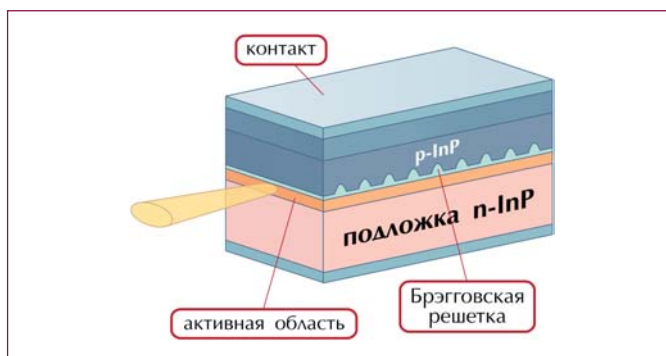


Рис.5. Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью

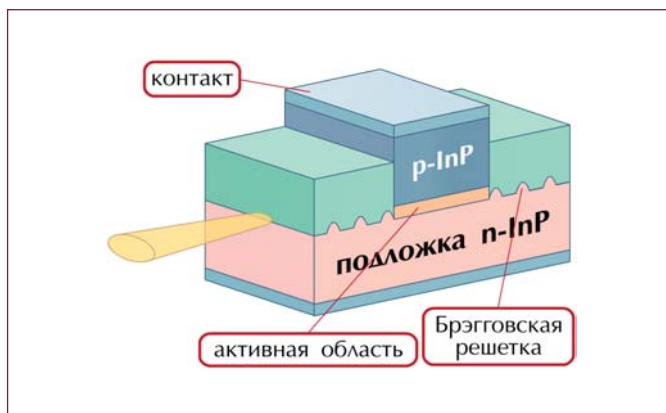


Рис.6. Полупроводниковый лазер с распределенными брэгговскими отражателями (РБО)

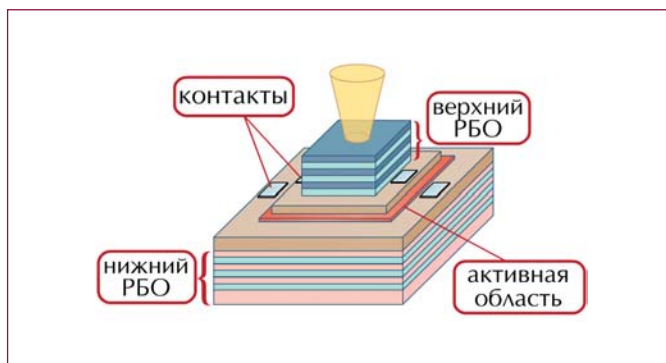


Рис.7. Полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором и поверхностным излучением (VCSEL)

**Источники излучения в передатчиках с внешней модуляцией**

Источниками излучения в современных передатчиках протяженных телекоммуникационных систем передачи ВОСП являются непрерывные полупроводниковые лазеры. Для ослабления влияния хроматической дисперсии они должны работать в одномодовом одночастотном режиме, т.к. в этом случае достигается минимальная ширина спектра излучения.

Одним из решений этой задачи является использование лазеров с распределенной обратной связью. Вместо размещения зеркал на концах усиливающей области в ней самой создается периодическая решетка показателя преломления, как показано на рис. 5. Период решетки  $d$  подобран так, чтобы условие Брэгга выполнялось для отражения в обратном направлении. С учетом показателя преломления  $n_e$  условие Брэгга имеет вид

$$2n_e d = \lambda.$$

Условие отражения от периодической структуры выполняются для лучей обоих направлений. Таким образом, периодическая решетка создает обратную связь в обоих направлениях, распределенную по всей длине лазера. Поскольку обратная связь, создаваемая периодической решеткой, является селективной, то в РОС-лазерах обеспечивается режим одномодовой генерации. Еще одно преимущество РОС-лазеров – возможность размещать такие лазеры непосредственно на поверхности полупроводниковой подложки и подключать их к волноводам на поверхности этой подложки, создавая интегральные оптические устройства.

Другой перспективный тип полупроводниковых лазеров – лазеры с распределенными брэгговскими отражателями (РБО-лазеры). Спектр отражения брэгговского отражателя определяется числом интерферирующих отраженных пучков, которое равно числу штрихов решетки. С увеличением числа интерферирующих пучков ширина спектра отражения уменьшается. Поэтому увеличением числа штрихов можно добиться того, что условия генерации будут выполняться только для одной моды. Это обеспечивает поддержание режима одночастотной одномодовой генерации в РБО-лазерах.

**Литература**

1. Наний О.Е. Основы цифровых волоконно-оптических систем связи. Lightwave Russian Edition, 2003, №1, с. 48 – 52.
2. Jacobs I. Optical fiber communication technology and system overview, in Fiber Optics Handbook, McGraw-Hill Companies Inc., 2002.
3. Agrawal G.P. Fiber-optic communication systems, Second edition, John Wiley&Sons Inc., 1997.
4. Волоконная оптика, сборник статей, М., ВиКо, 2002.
5. Щербаткин Д.Д. Источники излучения на основе твердотельных лазеров с синхронизацией мод. Lightwave Russian Edition, 2003, №2, с. 25 – 26.
6. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA. Lightwave Russian Edition, 2003, №1, с. 22 – 28.

**Приложение 1**

Физический механизм работы лазеров заключается в создании активной области (среды), в которой одновременно присутствуют носители зарядов двух типов: электроны, находящиеся в зоне проводимости, и дырки, находящиеся в валентной зоне. Вынужденная рекомбинация электронно-дырочных пар под действием световой волны вызывает усиление света в этой области.

В обычных (стационарных) условиях в полупроводниках присутствуют носители заряда только одного типа: электроны зоны проводимости в полупроводниках **n**-типа и дырки валентной зоны в полупроводниках **p**-типа. Распределение электронов и дырок по уровням энергии в стационарных условиях показано на рис. 8а. Электроны заполняют незанятые уровни с минимально возможной энергией, так что заполненными оказываются все разрешенные уровни энергии, лежащие ниже некоторого уровня энергии  $E_F$ , называемого уровнем Ферми. Некоторые значения энергии электроны не могут иметь по законам квантовой механики. Эта область значений энергии называется запрещенной зоной. В полупроводниках **n**-типа (рис. 8а) часть электронов и уровень Ферми  $E_F$  находятся выше запрещенной зоны – в зоне проводимости. Этим определяется электронный тип проводимости полупроводников **n**-типа. В полупроводниках **p**-типа, напротив, уровень Ферми  $E_F$  лежит ниже запрещенной зоны – в валентной зоне. Незаполненные электронами уровни энергии валентной зоны называются дырками.

В отсутствие внешнего напряжения уровни Ферми двух полупроводников, находящихся в контакте, совпадают. В области **p-n**-перехода энергетические зоны искривляются, что препятствует взаимному проникновению электронов и дырок в области с другим типом проводимости (можно сказать, что в области **p-n**-перехода возникает контактная разность потенциалов). Для создания активной области к **p-n**-переходу прикладывается внешнее напряжение. Величину этого напряжения выбирают почти соответствующей энергетической ширине запрещенной зоны кристалла  $E_g$ , т.е.

$$V_{np} \approx \frac{E_g}{e},$$

где  $e$  – абсолютная величина заряда электрона. При наличии внешнего напряжения значения энергии уровней Ферми по обе стороны **p-n**-перехода оказываются неодинаковыми. В области **p-n**-перехода появляется узкая активная область, которая содержит электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Проходящее через эту область световое излучение резонансной длины волны усиливается.

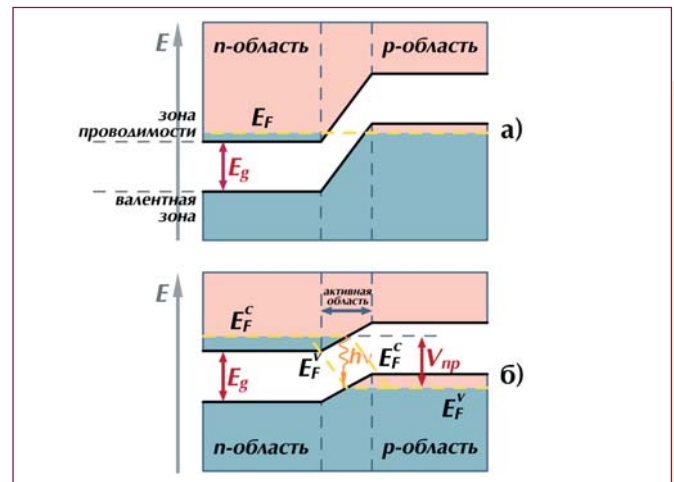


Рис. 8. Зонные схемы, поясняющие возникновение активной области в полупроводниковом кристалле с **p-n**-переходом. Заштрихованы области энергетических зон, заполненные электронами: а) внешнее напряжение к кристаллу не приложено (нулевое смещение); б) к кристаллу приложено напряжение  $V_{np}$  (прямое смещение)



### Приложение 2 Зонная структура полупроводников

Важнейшее свойство микросистем, состоящих из связанных микро-частиц (атомов, молекул, кристаллов), заключается в том, что внутренняя энергия системы  $E$  (энергия, не связанная с ее движением как целого) не может быть произвольной. Она может принимать лишь определенные дискретные (прерывные) значения  $E_1, E_2, E_3 \dots$  ( $E_1 < E_2 < E_3 \dots$ ). Возможные значения энергии электронов в атомах, молекулах, жидкостях и твердых телах, соответствующие определенным электронным состояниям, называются уровнями энергии электронов.

В кристаллах уровни энергии электронов сгруппированы в разрешенные полосы (зоны), разделенные участками энергий, которым не отвечает ни одно электронное состояние (запрещенные зоны). Заселенность электронами различных уровней энергии, т.е. относительное число электронов в данной системе, обладающих тем или иным значением энергии, описывается распределением Ферми. Электроны подчиняются принципу Паули, согласно которому в одном и том же состоянии не может находиться более одного электрона. (Однако одному и тому же значению энергии может отвечать более чем одно состояние электрона. В этом случае энергетический уровень называется вырожденным, а число соответствующих ему состояний – степенью вырождения, или статистическим весом.)

Если система, например атом, содержит только один электрон, то при абсолютном нуле температуры ( $T=0$  К) электрон займет состояние с наименьшей энергией. Т.к. в каждом состоянии не может находиться более одного электрона, то увеличение числа электронов в системе приводит к последовательному заполнению ими все более высоких энергетических уровней. При  $T=0$  К в каждом состоянии с энергией  $E$ , меньшей, чем энергия верхнего заполненного уровня, находится один электрон, а все состояния с большими энергиями пусты. Поэтому распределение Ферми при  $T=0$  К имеет вид ступеньки. Энергия последнего заполненного уровня называется уровнем Ферми  $E_F$ . Чем больше число электронов в системе, тем выше расположен уровень Ферми.

В чистых полупроводниках все разрешенные полосы либо полностью заполнены, либо пусты. Заполненная зона называется валентной зоной, а незаполненная – зоной проводимости. Уровень Ферми в этом случае попадает в середину запрещенной зоны. При наличии примесей, увеличивающих число электронов (донорных), часть электронов попадает в зону проводимости, а следовательно, уровень Ферми также находится в зоне проводимости. Такие полупроводники называют полупроводниками n-типа. При наличии примесей, уменьшающих число электронов (акцепторных), электроны не полностью заполняют валентную зону и уровень Ферми также перемещается в валентную зону. Незаполненные электронами состояния называются дырками, т.к. формально их поведение можно описывать как поведение положительно заряженных частиц. Такие полупроводники (с акцепторными примесями) называются полупроводниками p-типа. Распространение тока в полупроводниках p-типа описывается как направленное движение положительно заряженных частиц (дырок) под действием внешнего электрического поля.

### Приложение 3 Полупроводниковые лазеры на гетеропереходах (гетеролазеры)

Создание активной среды в большинстве полупроводниковых лазеров основано на инжекции носителей заряда (электронов и дырок) в область p-n-перехода (см. Приложение 1). Поэтому лазеры такого типа называются инжекционными полупроводниковыми лазерами. В первых инжекционных лазерах активная среда создавалась вблизи p-n-перехода между двумя областями одного и того же полупроводникового кристалла; p- и n-области такой структуры отличаются только типом примеси (акцепторная или донорная), которой они легированы. Такой p-n-переход называется гомопереходом, а полупроводниковый лазер на основе этого перехода – гомолазером. Существенным недостатком гомолазеров является то, что толщина  $t$  активного слоя существенно меньше толщины  $d$  области локализации лазерной моды. Так, например, для p-n-перехода, приготовленного в кристалле GaAs,  $t$  1 мкм,  $d$  3 мкм. Поскольку  $d > t$ , то активный слой взаимодействует только с центральной частью световой волны. Другая ее часть оказывается за пределами этого слоя и не только не усиливается, но, напротив, поглощается. В результате этого пороговый ток гомолазеров недопустимо высок и их практическое использование затруднено.

Радикально улучшить характеристики полупроводниковых лазеров удалось при создании гетеропереходов. Структура гетероперехода (гетероструктура) сложнее, чем структура гомоперехода. Наилучшими характеристиками обладают лазеры на основе двойного гетероперехода, который состоит из  $p_w$ - и  $n_w$ -областей полупроводника с широкой запрещенной зоной (широкозонного полупроводника), между которыми расположен тонкий слой полупроводника с узкой зоной (узкозонный полупроводник) (рис. 9а). Активная область в таком переходе совпадает со слоем узкозонного полупроводника. Именно в этой области накапливаются одновременно электроны зоны проводимости и дырки валентной зоны. Структура гетероперехода обеспечивает достижение более высокой концентрации электронов и дырок в активной области и, следовательно, более высокого коэффициента усиления. Кроме того, такая структура обладает свойствами волновода, т.к. показатель преломления узкозонного полупроводника выше, чем показатель преломления широкозонного. Это обеспечивает ограничение поперечных размеров усиливаемой световой волны (рис. 9б).

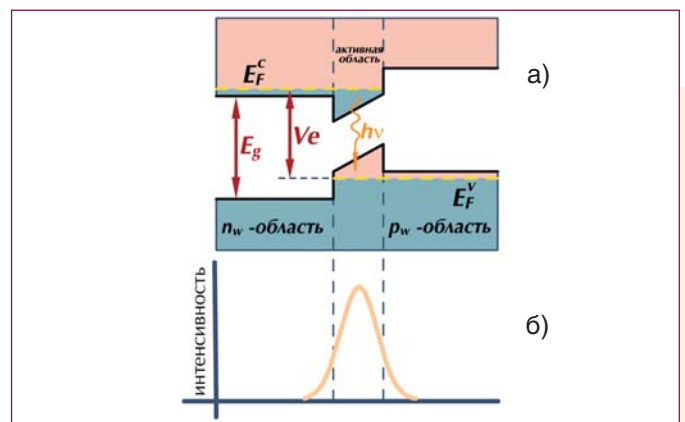


Рис.9. Структура энергетических уровней гетероперехода с двойным ограничением во внешнем электрическом поле а) и поперечное сечение световой волны б)