

5. Электронные компоненты систем оптической связи

5.1 Передающие оптоэлектронные модули

Передающие оптоэлектронные модули (ПОМ), применяемые в волоконно-оптических системах, предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические. Последние должны быть введены в волокно с минимальными потерями. Производятся весьма разнообразные ПОМ, отличающиеся по конструкции, а также по типу источника излучения. Одни работают на телефонных скоростях с максимальным расстоянием до нескольких метров, другие передают сотни и даже тысячи мегабит в секунду на расстояния в несколько десятков километров.

Типы и характеристики источников излучения

Главным элементом ПОМ является источник излучения. Перечислим основные требования, которым должен удовлетворять источник излучения, применяемый в ВОЛС:

- излучение должно вестись на длине волны одного из окон прозрачности волокна. В традиционных оптических волокнах существует три окна, в которых достигаются меньшие потери света при распространении: 850, 1300, 1550 нм;
- источник излучения должен выдерживать необходимую частоту модуляции для обеспечения передачи информации на требуемой скорости;
- источник излучения должен быть эффективным, в том смысле, что большая часть излучения источника попадала в волокно с минимальными потерями;
- источник излучения должен иметь достаточно большую мощность, чтобы сигнал можно было передавать на большие расстояния, но и не на столько, чтобы излучение приводило к нелинейным эффектам или могло повредить волокно или оптический приемник;
- температурные вариации не должны сказываться на функционировании источника излучения;
- стоимость производства источника излучения должна быть относительно невысокой.

Два основных типа источников излучения, удовлетворяющие перечисленным требованиям используются в настоящее время - светодиоды (LED) и полупроводниковые лазерные, (LD).

Главная отличительная черта между светодиодами и лазерными диодами - это *ширина спектра излучения*. Светоизлучающие диоды имеют широкий спектр излучения, в то время как лазерные диоды имеют значительно более узкий спектр, рис. 5.1 [1, 2]. Оба типа устройств весьма компактны и хорошо сопрягаются со стандартными электронными цепями.

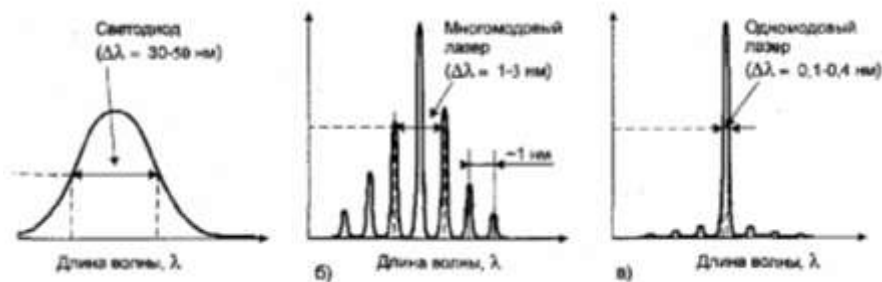


Рис. 5.1. Спектры излучения светодиодов и лазерных диодов

Светоизлучающие диоды

Благодаря своей простоте и низкой стоимости, светодиоды распространены значительно шире, чем лазерные диоды.

Принцип работы светодиода основан на излучательной рекомбинации носителей заряда в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока, рис. 5.2 а. Носители заряда - электроны и дырки проникают в активный слой (гетеропереход) из прилегающих пассивных слоев (р- и п-слоя) вследствие подачи напряжения на р-п структуру и затем испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся излучением света.

Длина волны излучения λ (мкм) связана с шириной запрещенной зоны активного слоя E_g (эВ) законом сохранения энергии $\lambda = 1,24/E_g$, рис. 5.2 б.

Показатель преломления активного слоя выше показателя преломления ограничивающих пассивных слоев, благодаря чему рекомбинационное излучение может распространяться в пределах активного слоя, испытывая многократное отражение, что значительно повышает КПД источника излучения.

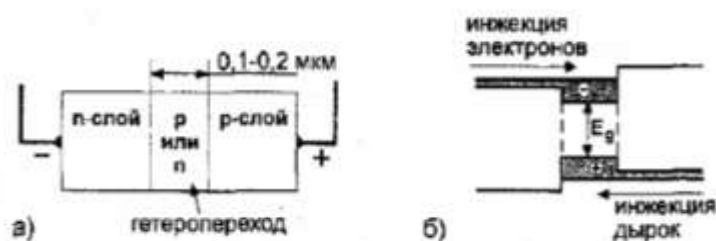


Рис. 5.2. Двойная гетероструктура: а) гетероструктура; б) энергетическая диаграмма при прямом смещении

Гетерогенные структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используются GaAs и InP. Соответствующий композит композиционный состав активного материала выбирается в зависимости от длины волны излучения создается посредством напыления на подложку, табл. 5.1.

Длину волны излучения λ_0 определяют как значение, соответствующее максимуму спектрального распределения мощности, а ширину спектра излучения $\Delta\lambda$ - интервал длин волн, в котором спектральная плотность мощности составляет половину максимальной.

Таблица 5.1. Композиционные материалы, используемые для создания источников излучения различных длин волн [2]

Активный материал	Подложка	Диапазон возможных значений E_g , эВ	Диапазон излучаемых длин волн λ , нм
$Ga_{(1-x)}Al_xAs$	GaAs	2,02...1,42	610...870
$In_{(1-x)}Ga_xAs_yP_{(1-y)}$	InP	0,95	1100...1700
$In_{0,73}Ga_{0,27}As_{0,58}P_{0,42}$	InP	0,95	1310
$In_{0,58}Ga_{0,42}As_{0,9}P_{0,1}$	InP	0,80	1550

Лазерные диоды

Два главных конструктивных отличия есть у лазерного диода по сравнению со светодиодом. Первое, лазерный диод имеет встроенный оптический резонатор. Второе, лазерный диод работает при значительно больших значениях токов накачки, чем светодиод, что позволяет при превышении некоторого порогового значения получить режим индуцированного излучения. Именно такое излучение характеризуется высокой когерентностью, благодаря чему лазерные диоды имеют значительно меньше ширину спектра излучения (1-2 нм) против 30-50 нм у светодиодов, рис. 5.1.

Зависимость мощности излучения от тока накачки описывается ватт-амперной характеристикой лазерного диода. При малых токах накачки лазер, испытывает слабое спонтанное излучение, работая как малоэффективный светодиод. При превышении некоторого порогового значения тока накачки I_{thres} излучение становится индуцированным, что приводит к резкому росту мощности излучения и его когерентности, рис. 5.3.

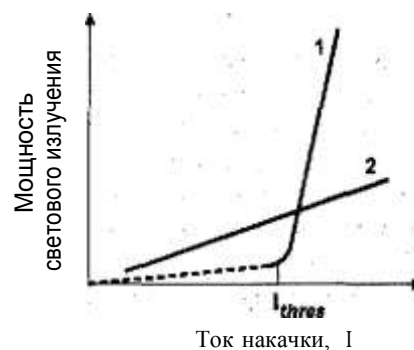


Рис. 5.3. Ватт-амперные характеристики:
1 - лазерного диода; 2 - светодиода

Мощность выходного излучения P_{out} ИЛИ Выходная мощность излучения светодиода (output power) отражает мощность вводимого в волокно излучения. Наряду с традиционной единицей измерения Вт она может измеряться в дБм.

Использование единицы измерения дБм упрощает энергетический расчет бюджета линий. Мощность излучения, приводящаяся в характеристиках оптического передатчика, может варьироваться в некотором диапазоне. В таких случаях указывают диапазон мощности излучения (output power range).

В магистральных ВОЛС используются два окна 1,3 и 1,55 мкм. Поскольку наименьшее затухание в волокне достигается в окне 1,55 мкм, на сверхпротяженных безретрансляционных участках ($L = 100$ км) эффективней использовать оптические передатчики именно с этой длиной волны. В то же время на многих магистральных ВОЛС в состав ВОК входят только ступенчатые одномодовые волокна, имеющие минимум хроматической дисперсии в окрестности 1,3 мкм (волокон со смещенной дисперсией нет). На длине волны 1,55 мкм удельная хроматическая дисперсия у SMF составляет 17 пс/им км. А поскольку полоса пропускания обратно пропорциональна ширине спектра излучения, то увеличить полосу пропускания можно только уменьшив ширину спектра излучения лазера. Из табл. 2.4 (глава 2) видно, что при ширине спектра $\Delta\lambda=4$ нм полоса пропускания на 100 км составляет 63 МГц, а при $\Delta\lambda=0,2$ нм соответственно 1260 МГц. Итак, для того чтобы оптические передатчики на длине волны 1,55 мкм могли в равной степени использоваться на протяженной линии не только с одномодовым волокном со смещенной дисперсией (DSF), но и со ступенчатым волокном (SMF), необходимо делать ширину спектра излучения передатчиков как можно меньше.

Четыре основных типа лазерных диодов получили наибольшее распространение: с резонатором Фабри-Перо; с распределенной обратной связью; с распределенным брэгговским отражением; с внешним резонатором.

Лазерные диоды с резонатором Фабри-Перо (FP лазеры, Fabry-Perot). Резонатор в таком лазерном диоде образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетерогенный переход. Одна из поверхностей отражает свет с коэффициентом отражения, близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход излучения наружу.

На рис. 4.1 б показан спектр излучения промышленного лазерного диода с использованием резонатора Фабри-Перо. Как видно из рисунка, наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы. Причина их возникновения связана с условиями образования стоячих волн. Для усиления света определенной длины волны необходимо выполнение двух условий. Первое, длина волны должна удовлетворять соотношению $2D = N\lambda$, где D - диаметр резонатора Фабри-Перо, а N - некоторое целое число. Второе, длина волны должна попадать в диапазон, в пределах которого свет может усиливаться индуцированным излучением. Если этот диапазон достаточно мал, то имеет место одномодовый режим с шириной спектра меньше 1 нм. В противном случае в область $\Delta\lambda 0,5$ могут попасть два или более соседних максимумов, что соответствует многомодовому режиму с шириной спектра от одного до нескольких нм. FP лазер имеет далеко самые высокие технические характеристики, но для тех приложений, где не требуется высокая скорость передачи данных, он, в силу более простой конструкции, наилучшим образом подходит с точки зрения цена-эффективность.

Следует отметить, что даже в том случае, когда соседние максимумы малы, то есть где реализуется одномодовый режим излучения и $\Delta\lambda$ мало, с ростом

скорости передачи у лазера наблюдается перераспределение мощности в модах, которое приводит к паразитному эффекту - динамическому уширению спектра λ_X (до 10 им при частоте модуляции 1-2 ГГц).

Этот эффект отсутствует у перечисленных трех других более совершенных типов лазерных диодов, отличающихся способом организации оптического резонатора, и являющихся некоторой степенью модернизацией простого резонатора Фабри-Перо [2].

Лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB лазер) и с распределенным брэгговским отражением (DBR лазер). Резонаторы у этих двух довольно схожих типов представляют собой модификацию плоского резонатора Фабри-Перо, в которой добавлена периодическая пространственная модуляционная структура. В DFB лазерах периодическая структура совмещена с активной областью (рис. 4.4 а), а в DBR лазерах периодическая структура вынесена за пределы активной области (рис. 4.4 б). Периодическая структура влияет условия распространения и характеристики излучения. Так, преимуществами DFB и DBR лазеров по сравнению с FP лазером являются: уменьшение зависимости длины волны лазера тока инжекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и практически 10 процентная глубина модуляции. Температурный коэффициент $\Delta\lambda/\Delta T$ для FP лазера порядка 0,5-1 им/°С, в то время как для DFB лазера порядка 0,07-0,09 им/°С. Основным недостатком DFB и DBR лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, более высокая цена.

Лазерный диод с внешним резонатором (ЕС лазер). В ЕС лазерах один или оба торца покрываются специальным слоем, уменьшающим отражение, и соответственно, одно или два зеркала ставятся вокруг активной области полупроводниковой структуры. На рис. 4-4 в) показан пример ЕС лазера с одним внешним резонатором. Антиотражательное покрытие уменьшает коэффициент отражения примерно на четыре порядка, в то время как другой торец активного слоя отражает до 30% светового потока благодаря френелевскому отражению. Зеркало, как правило, совмещает функции дифракционной решетки. Для улучшения обратной связи между зеркалом и активным элементом устанавливается линза.

Увеличивая или уменьшая расстояние до зеркала, а также одновременно разворачивая зеркало-решетку - это эквивалентно изменению шага решетки можно плавно изменять длину волны излучения, причем диапазон настройки достигает 30 им. В силу этого, ЕС лазеры являются незаменимыми при разработке аппаратуры волнового уплотнения и измерительной аппаратуры для ВОЛС [3]. По характеристикам они схожи с DFB и DBR лазерами.

Другие характеристики

Также важными характеристиками источников излучения являются: быстродействие источника излучения; деградация и время наработки на отказ.

Быстродействие источника излучения. Экспериментально измеряемым параметром, отражающим быстродействие источника излучения, является максимальная частота модуляции. Предварительно устанавливаются пороги на уровне 0,1 и 0,9 от установившегося значения мощности светового излучения при низкочастотной модуляции прямоугольными импульсами тока. По мере роста

частоты модуляции, т.е. при переходе на меньшие масштабы по временной шкале, форма световых фронтов становится более полой.

Максимальная частота модуляции определяется как частота входных электрических импульсов, при которой выходной оптический сигнал перестает пересекать пороговые значения 0,1 и 0,9, оставаясь при этом во внутренней области. Для светодиодов эта частота может достигать до 200 МГц, а у лазерных диодов значительно больше (несколько ГГц). Времена нарастания и спада предоставляют информацию о полосе пропускания W .

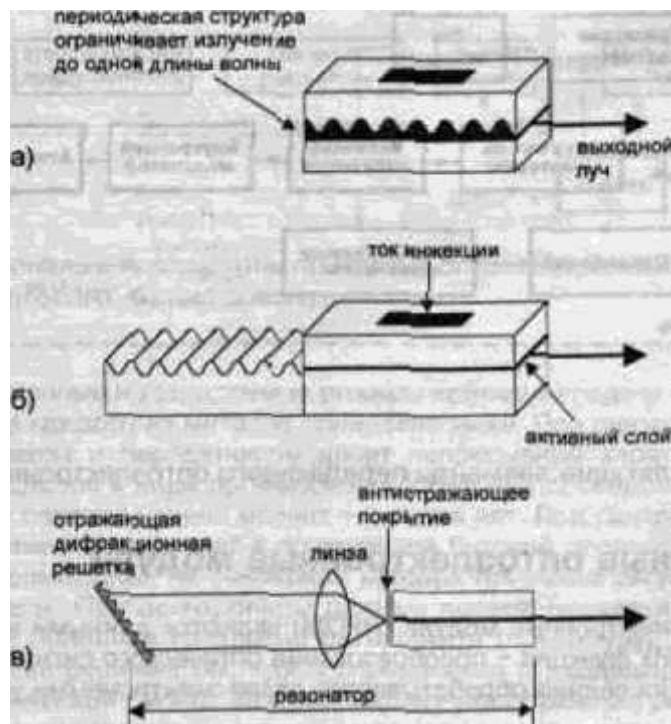


Рис. 5.4. Три основных типа лазерных диодов: а) лазер с распределенной обратной связью, DFB лазер; б) лазер с распределенным брэгговским отражением, DBR лазер; в) лазер с одним внешним резонатором, ЕС лазер

Деградация и время наработки на отказ. Ухо мере эксплуатации оптического передатчика его характеристики постепенно ухудшаются - падает мощность излучения, и, в конце концов, он выходит из строя. Это связано с деградацией полупроводникового слоя. Надежность полупроводникового излучателя определяется средней наработкой на отказ или интенсивностью отказов. Лазерные диоды, выпускаемые десять лет назад, обладали значительно меньшей надежностью по сравнению со светодиодами. Однако в настоящее время, благодаря совершенствованию конструкций и технологии изготовления, удалось значительно повысить надежность лазерных диодов и приблизить их к светодиодам по времени наработки на отказ, которое составляет до 50000 часов и более (5-8 лет).

5.2 Приемные оптоэлектронные модули

Приемные оптоэлектронные модули (ПРОМ) являются важными элементами волоконно-оптической системы. Их функция преобразование оптического сигнала, принятого из волокна, в электрический. Последний обрабатывается далее электронными устройствами.

Основные элементы приемных оптоэлектронных модулей

Основными функциональными элементами ПРОМ являются:

- фотоприемник, преобразующий полученный оптический сигнал в электрическую форму;
- каскад электрических усилителей, усиливающих сигнал и преобразующих его в форму, пригодную к обработке;
- демодулятор, воспроизводящий первоначальную форму сигнала.

На практике функциональные элементы могут несколько отличаться у разных ПРОМ. Например, детектор типа лавинный фотодиод обеспечивает внутреннее усиление, в результате чего собственные шумы последующего электронного усилителя становятся не столь заметными по сравнению с уровнем полезного сигнала. В некоторых ПРОМ отсутствует демодулятор, или цепь принятия решения, поскольку электрический сигнал с выхода каскада усилителей приемлем для непосредственной обработки другими электронными устройствами. Иногда для более эффективной работы ПРОМ перед детектором устанавливается оптический усилитель.

На рис. 5.5 даны функциональные элементы аналогового (а) и цифрового (б) ПРОМ. Аналоговые ПРОМ принимают аналоговый оптический сигнал и на выходе также выдают аналоговый электрический сигнал. К аналоговым приемникам предъявляются требования высокой линейности преобразования и усиления сигнала при минимуме вносимых шумов - в противном случае возрастают искажения сигнала. На протяженных линиях с большим количеством приемо-передающих узлов искажения и шумы накапливаются, что снижает эффективность аналоговых много ретрансляционных линий связи.

При цифровой передаче не требуется очень точная ретрансляция форм импульсов. Цифровой приемник должен включать узел принятия решения или дискриминатор, имеющий установленные пороги на принятие сигналов 0 и 1, который распознает, какой сигнал пришел, устраняет шумы и восстанавливает необходимую амплитуду сигнала. Правильное выделение нужного сигнала может происходить при большом уровне шумов.

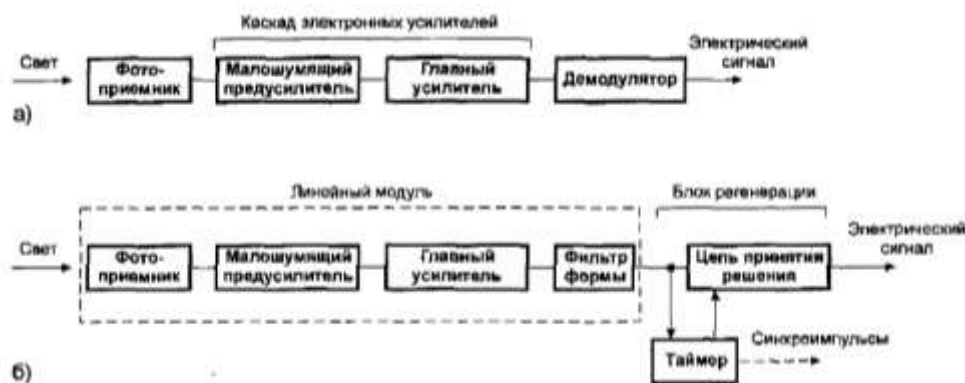


Рис. 5.5. Функциональные элементы приемных оптоэлектронных модулей (ПРОМ): а) аналогового; б) цифрового

Различают *синхронные* и *асинхронные* режимы приема-передачи цифрового сигнала [6]. Упрощенное описание каждого из методов приведено ниже. При *синхронном режиме* битовый поток между приемником и передатчиком носит непрерывный характер. При асинхронном режиме данные передаются в виде организованных битовых последовательностей - пакетов. В промежутках между пакетами линия молчит - сигнала нет. При синхронном режиме приема-передачи таймер приемника выделяет в проходящей битовой последовательности специальные сигналы - синхроимпульсы, на основании которых приемник регулярно настраивает или подстраивает свои часы. При *асинхронном режиме* приема-передачи приемник имеет свой независимый таймер. Принимая начальные биты пакета (преамбулу), таймер приемника настраивает узел принятия решения так, чтобы определение проходящего бита выполнялось на его середине. Электрический сигнал, который выдает узел принятия решения, идет на частоте таймера. Так как есть погрешность у разных таймеров, то, по мере принятия последующих битов пакета, момент определения проходящего бита плавно смещается в одну из сторон относительно середины проходящего бита. Для правильной идентификации всех битов пакета важно, чтобы смещение за время принятия пакета не превысило 0,5 бита. Это приводит к ограничению на максимальную длину пакета. Чем меньше погрешность таймеров, тем большая длина пакета может использоваться для передачи.