

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ВОСП

При создании передающего оборудования в современных волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) используют большой арсенал различных оптоэлектронных компонентов — как пассивных, так и активных, выпускаемых известными зарубежными производителями. Несмотря на сложные условия, в которых оказалась отечественная промышленность в связи с развалом общего экономического пространства, отдельные, вновь образованные компании и специалисты продолжают свои исследования и разработки в области создания названных компонентов, в частности полупроводниковых источников излучения, усилителей и приемников. Предлагаемая статья, содержащая описание оптоэлектронных компонентов для современных ВОСП, известного специалиста в этой области д-ра техн. наук В.П.Дураева (генерального директора компании "Нолатех" — Новые лазерные технологии), посвящена разработке отечественных полупроводниковых источников излучения и усилителей.

Современные ВОСП нельзя представить без применения в них элементов оптоэлектроники. Примерами этого являются полупроводниковые лазеры, приемные и передающие оптические модули и усилители.

В работе кратко представлены результаты исследований, разработки и промышленного выпуска отечественных оптоэлектронных компонентов для ВОСП — полупроводниковых источников излучения (лазеров) и оптических усилителей. Рассмотрены их конструкции, электрические, оптические и ресурсные характеристики, дан перечень основных изделий, выпускаемых промышленностью для волоконно-оптических систем связи.

ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Большинство лазеров для ВОСП используют резонаторы Фабри-Перо [1]. Однако для высокоскоростных ВОСП в последнее время стали применять лазеры, имеющие резонаторы с *распределенной обратной связью* (РОС), или, в международной классификации, — *DFB-лазеры*.

Для ВОСП, использующих мультиплексирование с разделением по длине волны, или волновое мультиплексирование (WDM), требуются динамически стабильные одночастотные лазеры с очень узкой спектральной линией. Этим требованиям больше всего отвечают

лазеры с *распределенным брэгговским зеркалом* (РБЗ), или *лазеры с распределенной брэгговской решеткой* (DFB-лазеры), имеющие ширину линии генерации менее 1 МГц.

Наиболее широко в ВОСП применяются лазеры с длиной волны излучения 1300 и 1550 нм. Они используют диапазон рабочих температур до 100°C без охлаждения и имеют мощность излучения до 50 мВт [1].

Важной экономической и технической проблемой (кроме ВОСП) является внедрение гибридных волоконно-коаксиальных систем связи (кабельное телевидение, сети передачи данных, видеоконференцсвязи и мультимедиа), что позволяет довести оптоволокно до каждой квартиры (используя программу "волокно в дом"). Для ее решения требуются лазеры, обладающие повышенной надежностью и малой себестоимостью. Сейчас с этой целью используются лазеры с теми же длинами волн — 1300 и 1550 нм, но с минимальным значением порогового тока порядка 1–3 мА.

По спектральному составу лазеры, используемые в ВОСП, могут иметь как многомодовый, так и одномодовый (а в пределе одночастотный) режим генерации в зависимости от скорости и дальности передачи информации.

Самыми перспективными источниками излучения для ВОСП являются *инжекционные лазеры* (ИЛ), так как они сочетают в себе свойства генератора несущей частоты и модулятора в широком диапазоне частот.

ИНЖЕКЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

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 режим работы [2, 3].

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, AsP) используются четыре различные модификации этого метода.



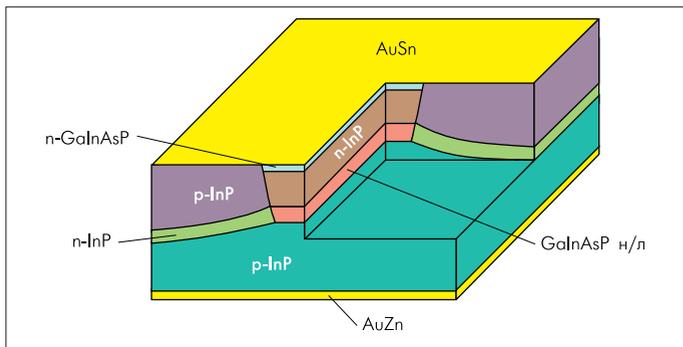


Рис. 1. Конструкция ЛД с зарощенной мезой

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.

Эпитаксиальные структуры делятся на три основных типа: *двухсторонние гетероструктуры* (ДГС), *гетероструктуры с раздельным ограничением* (РОДГС) и *квантово-размерные структуры* (КРС).

Для ВОСП используются в основном источники излучения с полосковой геометрией, в которых область протекания тока ограничена также и по плоскости *pn*-перехода. Ширина полоска *S* 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 сердцевинки одно-модового волокна (7–9 мкм).

Итак, все рассматриваемые здесь устройства для магистральных ВОСП – ЛД, приемники и усилители – изготавливаются из квантово-размерных эпитаксиальных структур на основе фосфида индия с использованием *МОС-гидридной технологии*. Конструкции активного элемента лазерного диода типа "зарощенная меза" и "гребневидная (неотравленная) меза" показаны на рис. 1 и 2.

Полосковая геометрия может быть выполнена различными способами [2]. При использовании для формирования полоска оксидных высокоомных слоев достигается локализация оптической мощности и носителей тока. Такие приборы носят название **лазеров с волноводным усилением**, поскольку свет локализуется в об-

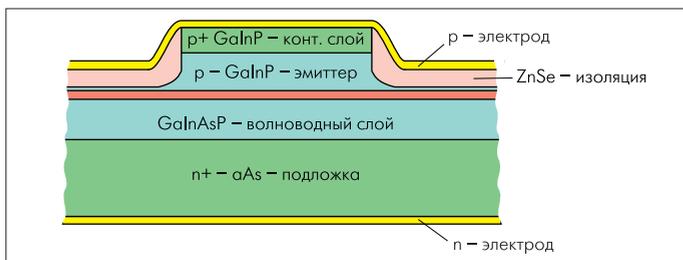


Рис. 2. Конструкция ЛД с неотравленной мезой

ласти с максимальной инверсией населенности. Значительно более сильная боковая локализация обеспечивается в конструкциях, которые называются **зарощенными гетероструктурами**. В таких лазерах образуется *волноводный канал*. При этом имеет место как вертикальное, так и горизонтальное ограничение оптического излучения.

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 ВОСП. В высокоскоростных линиях связи используются в основном **зарощенные мезаполосковые лазеры**, причем зарощивание 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. 3.

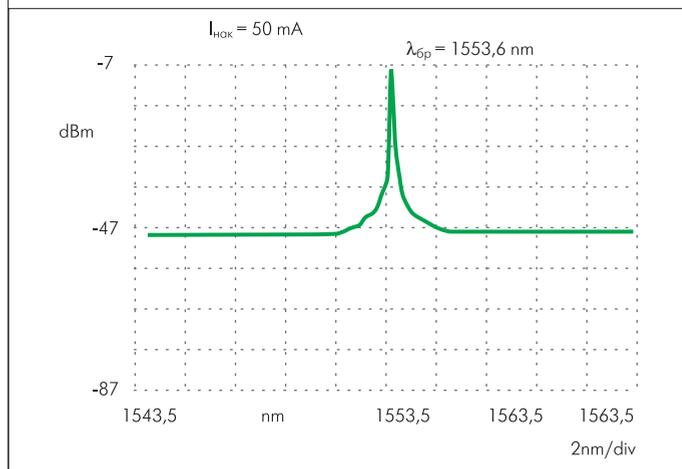


Рис. 3. Спектр генерации одночастотного ЛД

Наиболее полно требованиям ВОСП 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. 4. Такие ЛД нормально работают до температуры 100°C без охлаждения и имеют мощность излучения до 50 мВт [2–4].

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 ВОСП 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 DIL). Наибольшее распространение получили конструкции типа "Баттерфляй" с 8 или 14 выводами (рис. 5 а, б).

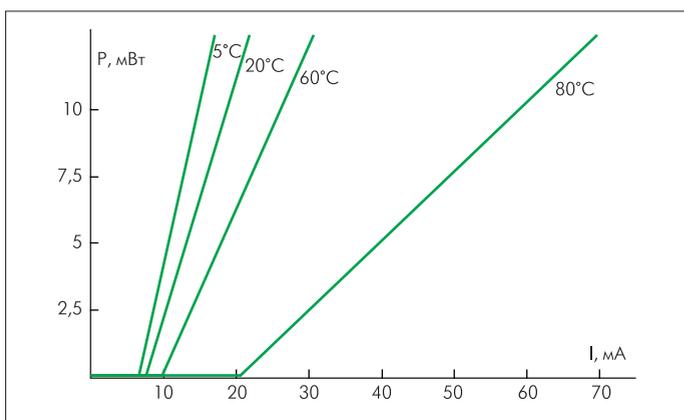


Рис.4. Ватт-амперные характеристики ЛД

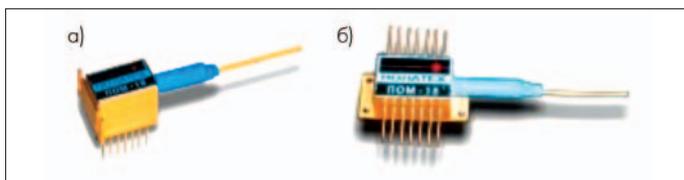


Рис.5. Конструкции лазерных модулей

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.

ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Наряду с лазерными диодами в ВОСП большое место занимают приемники оптического излучения. В настоящее время отечественной промышленностью созданы приемники излучения в спектральном диапазоне от ультрафиолета до глубокой инфракрасной области, работающие в диапазоне скоростей приема до 2,5 Гбит/с.

Наиболее широкое применение среди них нашли *приемные оптические модули* (ПРОМ) на основе *rip*-фотодиодов, или *фотодиодные модули* (ФДМ), с длиной волны излучения от 500 до 1600 нм.

Для высокоскоростных ВОСП разработаны приемные оптические модули, имеющие в своем составе полупроводниковый (твердотельный) усилитель с полосой до 2,5 ГГц.

Основные параметры приемного модуля ФДМ-14-2К и приемного модуля с предусилителем ФДУ-1 (при температуре 25°C) представлены в табл.2 и 3.

Таблица 1. Лазерные модули для ВОСП

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

Таблица 2. Параметры приемного модуля ФДМ-14-2К

Параметр	Мин.	Тип.	Макс.
Чувствительность, А/Вт	0,9	0,95	1,0
Темновой ток, нА	0,5	1,0	2,0
Обратное напряжение, В	5	10	30
Длина волны, нм	1000	1300	1700
Емкость, пФ	0,5	1,0	2,0

Таблица 3. Параметры приемного модуля ФДУ-1

Параметр	Мин.	Тип.	Макс.
Длина волны, нм	1200	1550	1600
Динамический диапазон, дБм	-39	–	+3
Чувствительность фотоприемника, А/Вт	0,9	0,9	1
Емкость фотоприемника, пФ	–	0,7	1
Дифференциальный коэффициент усиления, кОм	0,2	–	200
Длительность фронтов выходных импульсов, нс	–	–	2
Ширина полосы пропускания, МГц	115	–	–
Диапазон рабочих температур, °С	- 40	+25	+70
Напряжение питания, В	–	4,5	–

Внешний вид конструкции указанных модулей приведен на рис.6. Приемные модули имеют волоконно-оптический выход с оптическими разъемами типа FC и PC как в одномодовом, так и в многомодовом исполнении.

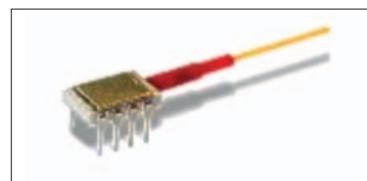


Рис.6. Приемный модуль ФДМ-14-2К

ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

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).

Не вдаваясь в предысторию, усилители, используемые в настоящее время в ВОЛС, можно разделить на несколько основных типов [5, 6]:

- оптоволоконные (ОВ) усилители (главным образом на основе ОВ, легированного эрбием – Er³⁺, в международной классификации они именуются EDFA; усилители на основе ОВ, легированного другими редкоземельными металлами; в меньшей степени – оптоволоконные усилители на основе эффекта Рамана);
- полупроводниковые усилители;
- параметрические усилители.

Далее кратко рассмотрены только полупроводниковые ОУ (ПОУ), более подробно ознакомиться с ними можно в работе [6].

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

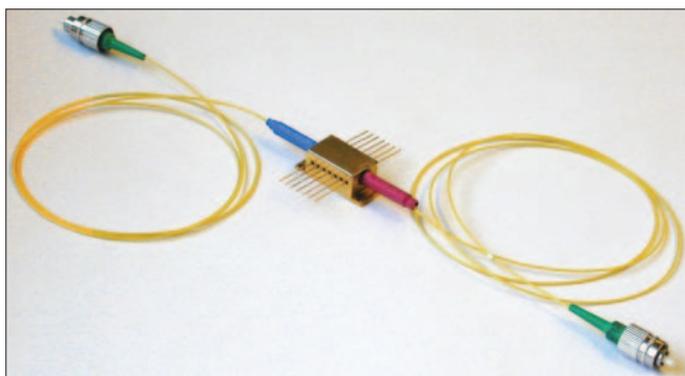


Рис.7. Общий вид ПОУ

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 InAlAs-InGaAs-InP с квантово-размерными слоями, изготовленными методами МОС-гидридной эпитаксии на подложках p -InP и n -GaAs. Эти структуры излучают в диапазоне 840–1560 нм [7]. 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.

В результате удается получить ОУ с коэффициентами усиления до 30 дБ, максимальной выходной мощностью до 20 мВт и шириной полосы усиления 35–60 нм [7]. Это делает ОУ пригодными для усиления не только в системах с одной несущей, но и в системах WDM.

Общий вид полупроводникового ОУ показан на рис.7, а более подробно основные характеристики одной из серии таких усилителей приведены в табл.4.

Таким образом, представленные в данной работе основные характеристики отечественных полупроводниковых лазеров, светодиодов, фотоприемников, оптических усилителей и приемно-передающих модулей на их основе, подтверждают, что отечественные оптоэлектронные приборы для ВОЛС (лазерные диоды, приемники излучения, усилители) не хуже соответствующих зарубежных образцов оптоэлектронных компонентов, применяемых в волоконно-оптической связи, и могут найти самое широкое при-

Таблица 4. 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 "волоконно-волоконно", дБ	НВ, $I_{\text{нак}} = 200$ мА	8	10	–
Чувствительность на входе, дБм	НВ, усиление – 10 дБ	-30	–	–
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	–	–

менение в устройствах и системах ВОСП и электронной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дурьев В.П. Источники оптического излучения. – В кн.: Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы: Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Изд. Connect, 2000, с. 73–92.
2. Дурьев В.П. и др. Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530–1560 нм. – Квантовая электроника, 2001, т. 31, №6, с. 529–530.
3. Дурьев В.П. Инжекционные лазеры для ВОСП. – Лазерная техника и оптоэлектроника, 1992, №3–4, с. 40.
4. Дурьев В.П. и др. Одночастотный полупроводниковый лазер на длине волны 1,06 мкм с распределенным брэгговским зеркалом в волоконном световоде. – Квантовая электроника, 1998, т.25, №4, с. 301–302.
5. Дурьев В.П. и др. Полупроводниковые оптические усилители на длину волны 630–1560 нм. – Фотон-экспресс, 2004, №1, с. 14.
6. Слепов Н.Н. Оптические усилители. – В кн.: Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы: Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Изд. Connect, 2000, с. 97–116.
7. Дурьев В.П. и др. – Квантовая электроника, 2001, т.31, №6, с. 529–530.