

## 4. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

### 4.1. Физика оптического излучения

#### 4.1.1. Основы и терминология

В оптоэлектронике термин «свет» используется применительно к видимому и прилегающим к нему областям спектра электромагнитного излучения (360...830 нм).

Для оценки оптических свойств фотоприёмников и излучающих приборов используются фотоэлектрические и излучательные характеристики в дальнем поле. Применительно к светоизлучающим диодам (СИД) принципиальное значение имеют две характеристики. Диаграмма направленности излучения (Рис. 4.1) показывает, какое количество энергии получает фотоприёмник, расположенный на оптической оси при отклонении СИД от оси на угол  $\varphi$ . Диаграмма энергетической освещённости показывает, какое количество энергии сигнала получает фотоприёмник, расположенный на оптической оси, при перемещении СИД в плоскости, перпендикулярной оптической оси.

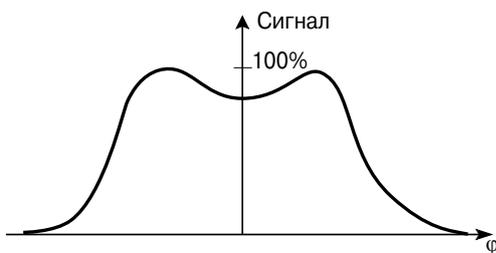


Рис. 4.1. Диаграмма направленности излучения.

Цветовая температура источника света — это температура, которую должно иметь абсолютно чёрное тело для того, чтобы вызывать цветное ощущение источника света.

#### Излучающие приборы

Тепловые излучающие приборы (например, лампы накаливания) характеризуются тем, что подводимая к ним энергия преобразуется в тепло и приводит к генерации излучения. Тепловые излучающие приборы являются источниками излучения со сплошным спектром, т.е. энергия их излу-

чения распределяется непрерывно в пределах широкого диапазона длин волн.

В люминесцентных излучающих приборах (например, светодиодах) подводимая энергия является потенциальной (электроны возбуждаются из валентной зоны в зону проводимости), которая и преобразуется в излучение. Этот тип приборов способен генерировать интенсивное излучение при низкой температуре. Как правило, они являются источниками излучения с линейчатым спектром.

Планковский излучатель — это идеальный излучатель со сплошным спектром (тепловой излучатель). Он определяется как нагретая полость с малым отверстием, через которое выводится излучение. Мощность излучения в этом случае определяется законом Стефана — Больцмана, а положение максимума спектра излучения — законом Вина.

Образцовый источник DIN A определяется в соответствии с IEC 306 и DIN 5033 как лампа с вольфрамовой нитью с температурой 2856 К. В видимой области спектра она аппроксимирует излучение абсолютно чёрного тела (Рис. 4.2).

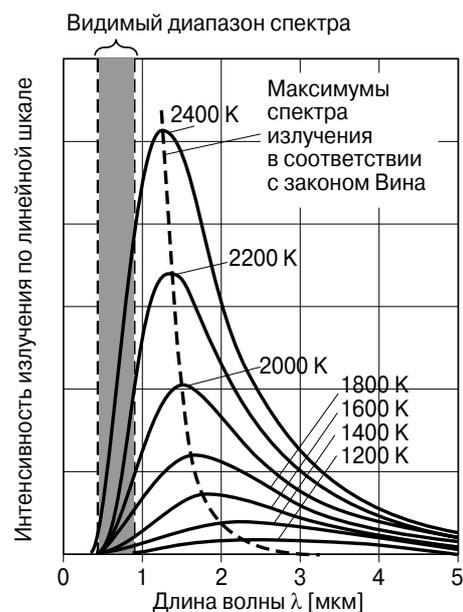


Рис. 4.2. Спектральное распределение излучения чёрного тела при различных температурах.

### Спектральная чувствительность глаза

В пределах оптического диапазона излучения от 100 до примерно 10 нм область видимого излучения простирается от примерно 380 до 780 нм. Спектральная чувствительность адаптированного к свету человеческого глаза достигает максимума в центральной зелёной области и быстро падает в красной и синей областях. Спектральная чувствительность зрения стандартного наблюдателя протабулирована и приведена в стандарте DIN 5031.

Для человеческого глаза, адаптированного к темноте (в типичных условиях фоновой яркости  $< 3 \cdot 10^{-3}$  кд/м), кривая чувствительности смещается примерно на 50 нм в фиолетовую область спектра.

В видимой области спектра для количественного описания световой интенсивности и светового потока используются люмены (лм) и канделы (кд). Эти единицы измерения основаны на особенностях восприятия излучения человеческим глазом. Для других спектральных диапазонов используются радиометрические единицы измерения (Вт/ср и т.д.).

В Табл. 4.1 приведены все радиометрические и фотометрические параметры.

**Таблица 4.1.** Радиометрические и фотометрические параметры и единицы измерения

Параметр	Единица измерения	
<b>Радиометрия</b>		
Мощность излучения/ поток	$\Phi_e$	Вт
Сила излучения	$I_e$	Вт/ср
Энергетическая освещённость	$E_e$	Вт/м <sup>2</sup>
Энергетическая яркость	$L_e$	Вт/м <sup>2</sup> ·ср
<b>Фотометрия</b>		
Световой поток	$\Phi_v$	лм
Сила света	$I_v$	лм/ср = кд
Освещённость	$E_v$	лм/м <sup>2</sup> = кд
Яркость	$L_v$	кд/м <sup>2</sup>

### Поток излучения

Поток излучения — это полная мощность (в Вт) излучения. Световой поток (в лм) — это поток излучения, воспринимаемый глазом с чувствительностью  $V_{\lambda}$ .

Ниже приведены некоторые типичные значения.

- 1 м<sup>2</sup> поверхности солнца:  
 $\Phi_e = 60$  МВт.
- Флуоресцентная лампа на 40 Вт:  
 $\Phi_v = 750 \dots 3200$  лм.
- Лампа накаливания на 100 Вт:  
 $\Phi_v = 1600$  лм.
- Красный светодиод:  
 $\Phi_v = 5$  лм при токе 50 мА.

В области максимальной чувствительности глаза при 555 нм значению 1 Вт потока излучения соответствует световой поток в 683 лм.

### Сила излучения

Сила излучения  $I_e$  (единица измерения Вт/ср) — это поток излучения в пределах телесного угла в 1 стерадиан. Связанный с этим параметр, учитывающий чувствительность глаза  $V_{\lambda}$ , называется силой света  $I_v$  (единица измерения — кандела, кд; 1 кд = 1 лм/ср).

Типичные значения:

- Лампа накаливания в 100 Вт:  
 $I_v = 110$  кд.
- Фара мощностью 100 Вт: в направлении излучения  $I_v$  может составлять вплоть до  $10^6$  кд.
- Для полупроводникового лазера на длину волны 880 нм и мощностью 2 мВт (без использования дополнительной оптики):  
 $I_e = 2 \dots 5$  мВт/ср.
- СИД для индикации (10 мА):  
 $I_v = 1 \dots 1000$  мкд.
- ИК светодиоды для дистанционного управления (100 мА):  
 $I_e = 10 \dots 300$  мВт/ср.

### Телесные углы

Телесный угол  $\Omega$  (единица измерения — ср) охватывает часть пространства, ограниченную лучами, исходящими в виде конуса из точки  $P$  (т.е. из источника лучей) и заканчивающимися на закрытой поверхности пространства. Если эта поверхность лежит на сфере (радиусом в 1 м) с центром в точке  $P$  и если площадь этой поверхности составляет 1 м, то соответствующий телесный угол  $\Omega = 1$  стерадиан (1 ср),  $\Omega = A / R^2$  (Рис. 4.3).

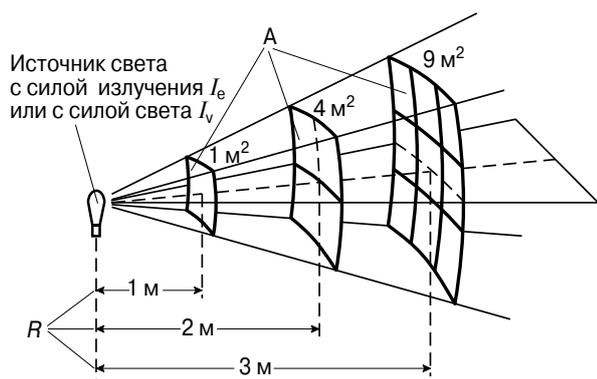


Рис. 4.3. Определение телесного угла  $\Omega = 1$  ср (стерадиан).

### Энергетическая яркость

Энергетическая яркость  $L_e$  (единица измерения — Вт/м<sup>2</sup>·ср) есть поток излучения в единичном телесном углу, отнесённый к единичной площади. Связанная с этим параметром фотометрическая величина называется яркостью  $L_v$  (единица измерения — кд/м<sup>2</sup>). Человеческий глаз воспринимает различия яркости как вариации яркости. Яркость измеряют в нитах, ламбертах и футламбертах.

Типичные значения:

- для поверхности солнца:  $1.5 \times 10^9$  кд/м<sup>2</sup>.
- для нити накаливания:  $5 \dots 35 \times 10^6$  кд/м<sup>2</sup>.
- для современной флуоресцентной лампы:  $0.9 \dots 2.5 \times 10^4$  кд/м<sup>2</sup>.
- для ночного неба: около  $10^{-11}$  кд/м<sup>2</sup>.

### Освещённость

Энергетическая освещённость  $E_e$  (единица измерения — Вт/м<sup>2</sup>) есть падающий поток излучения, отнесённый к площади принимающей поверхности. Связанная с этим параметром фотометрическая величина называется освещённостью  $E_v$  (единица измерения — люкс;  $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$ ) или футкандела ( $10.76 \text{ лк}$ ).

Типичные значения:

- солнечный свет в полдень: максимально  $100 \text{ мВт/см}^2$ ,  $100\,000 \text{ лк}$ .
- рабочее место в офисе:  $500 \text{ лк}$ .
- лунная ночь:  $0.2 \text{ лк}$ .

Для образцового источника излучения согласно стандарту DIN A освещённости в  $1000 \text{ лк}$  соответствует энергетическая освещённость  $4.76 \text{ мВт/см}^2$ .

## 4.1.2. Фотодиоды

Когда фотоны с достаточной энергией проникают в фотодиод, в полупроводнике рождаются электронно-дырочные пары (внутренний фотоэффект). Электрическое поле в области объёмного заряда разделяет данные пары, несущие заряд. В результате во внешней цепи возникает ток (Рис. 4.4).

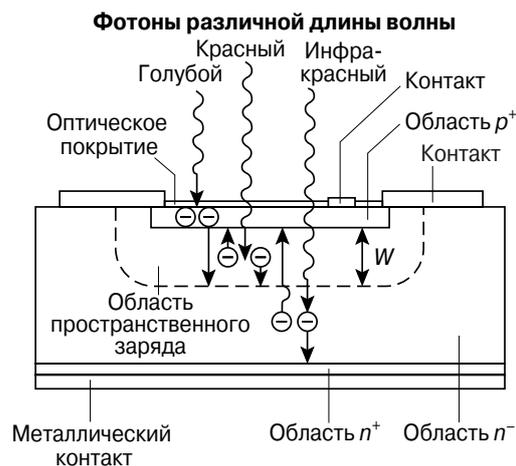


Рис. 4.4. Структура планарного кремниевого фотодиода.

С точки зрения электрического функционирования различают фотодиодный режим (режим с напряжением смещения  $V_R$ , квадрант В) и фотовольтаический режим (квадрант А). Фотовольтаическая ячейка выполняет функцию генератора тока и преобразует энергию излучения в электрическую энергию (Рис. 4.5).

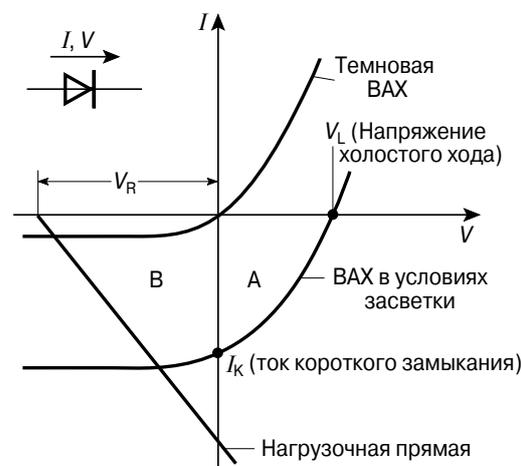


Рис. 4.5. ВАХ фотодиода.

Напряжение холостого хода  $V_L$  не зависит от площади фотодиода и логарифми-

чески возрастает с увеличением освещённости, при этом для кремниевых диодов данный параметр возрастает примерно до 0.5 В при освещённости 1000 лк. Ток короткого замыкания  $I_K$  пропорционален освещённости и площади фотодиода. Допустимое обратное смещение имеет малую величину (приблизительно 1 В), так что работа фотодиода при обратном смещении возможна лишь в определённых границах.

Для извлечения из фотодиода максимальной мощности величина сопротивления нагрузки должна составлять порядка  $V_L/I_K$ .

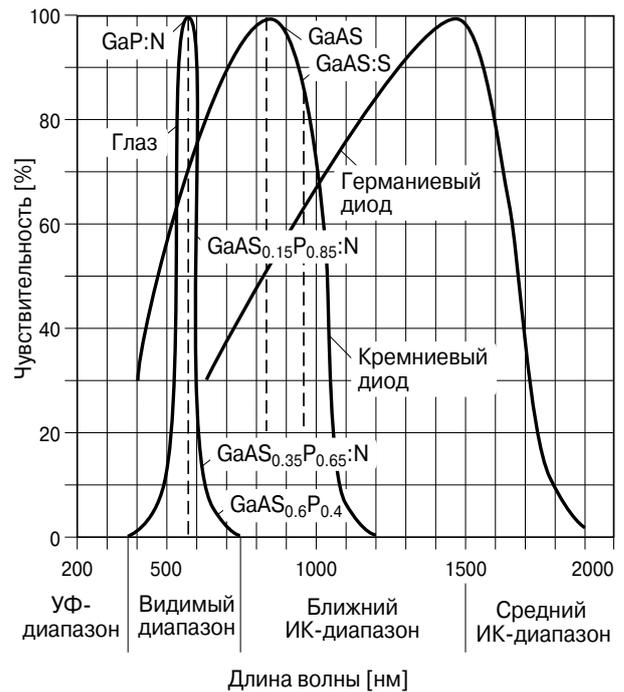
#### 4.1.3. Кремниевые фотодиоды

При соответствующих размерах кремниевые фотодиоды имеют очень малый уровень плотности темнового тока ( $< 10^{-11}$  А/мм<sup>2</sup>). Следовательно, их можно использовать для детектирования излучения с малым уровнем освещённости. Однако они не обладают достаточным быстродействием, так как носители заряда должны сначала диффузионно пройти в узкую область пространственного заряда, сформированную легированием. Образующий ими фототок пропорционален освещённости в пределах нескольких декад.

Когда решающее значение имеет быстродействие, используются кремниевые *p-i-n*-фотодиоды. В данном случае большая часть света преобразуется в сравнительно широкой области пространственного заряда, при этом при соответствующем напряжении смещения носители заряда дрейфуют со скоростью насыщения (приблизительно 50...100 км/с). Из-за большой ширины области пространственного заряда ёмкость *p-i-n*-фотодиодов мала (несколько пФ), так что при использовании малого сопротивления внешней нагрузки можно добиться очень малой величины постоянной времени.

Чувствительность фотоприёмников  $S$  есть отношение фототока к мощности падающего излучения или светового потока, при этом она зависит от длины волны и имеет разные значения для различных полупроводников. На **Рис. 4.6** показаны спектры чувствительности  $S$  (единица измерения — А/Вт) для фотоприёмников на основе германия и кремния.

Видно, что кремний с максимальной чувствительностью на длине волны около 850 нм хорошо согласуется со спектром из-



**Рис. 4.6.** Относительные спектры чувствительности различных фотодиодов.

лучения GaAs, тогда как германий с широким максимумом спектра чувствительности вблизи 1.5 мкм перекрывает среднюю инфракрасную область вплоть до 2 мкм. Кроме того, имеется целый набор полупроводниковых соединений, позволяющих оптимизировать фотоприёмники (в виде фотодиодов и фоторезисторов) и расширить их спектральные характеристики в среднюю инфракрасную область (например CdS, PbS, InSb, GaInAsP, HgCdTe и т.д.).

#### 4.1.4. Фототранзисторы

В фототранзисторе переход коллектор — база сконструирован так же, как в фотодиоде. Его фототок, умноженный на коэффициент усиления транзистора (приблизительно от 100 до 1000), является коллекторным током. Таким образом, фототранзисторы обеспечивают большой уровень сигнала и требуют меньшего последующего усиления по сравнению с фотодиодами. Однако их передаточная характеристика менее линейна (из-за нелинейности усиления тока) и они обладают более низким быстродействием из-за эффекта Миллера в сочетании с достаточно большой площадью перехода коллектор — база (**Рис. 4.7**).

Среднее число пар носителей заряда, генерируемых одним фотоном, называется

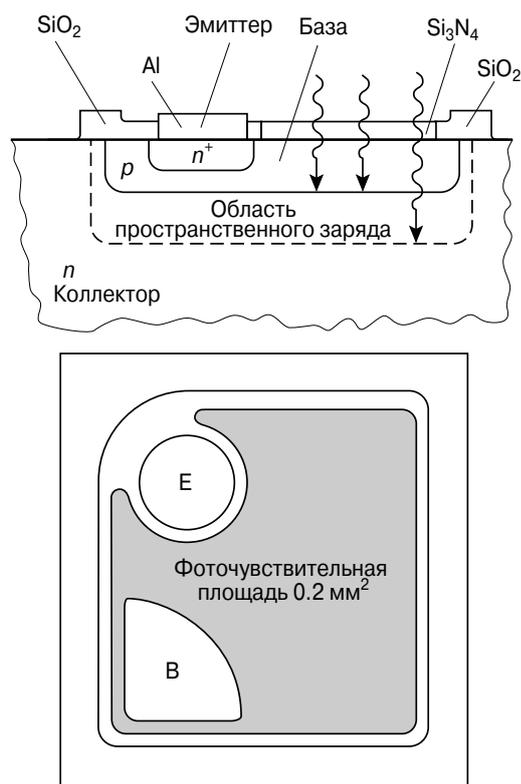


Рис. 4.7. Биполярный фототранзистор.

квантовой эффективностью  $\eta$ . Максимально достижимая чувствительность  $S_{\max}$  фотоприёмника без внутреннего усиления могла бы быть достигнута при  $\eta = 1$ , т.е. когда каждый падающий фотон создавал бы пару носителей заряда. Все носители заряда собираются и таким образом создают фототок. Поскольку энергия фотона

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

( $e_0$  — заряд электрона,  $\lambda$  — длина волны,  $h$  — постоянная Планка), то из этого следует, что

$$S_{\lambda, \max} = \frac{e_0}{E} = \frac{\lambda}{1.24} \text{ (А/Вт)} \quad (\lambda \text{ выражена в мкм}).$$

Таким образом, максимальное значение чувствительности линейно возрастает с длиной волны. Реальные фотодиоды могут обладать чувствительностью, составляющей 90% от этой величины при  $\lambda = 850$  нм.

В случае фотоприёмников дневного или искусственного света практический интерес представляет фоточувствительность, выраженная в нА/лк. Данный параметр связан с освещённостью от конкретного ис-

точника света, которым, как правило, является образцовый источник DIN А. С другой стороны, фоточувствительность фотоприёмников для регистрации инфракрасного излучения выражается в мкА. Этот параметр измеряется в условиях определённой освещённости (например,  $0.5 \text{ мВт/см}^2$ ) на определённой длине волны (например,  $950 \text{ нм}$ ).

В случае детекторов очень слабых сигналов первостепенный интерес представляет такой параметр, как мощность, эквивалентная шуму (Noise Equivalent Power — NEP), выражаемая в Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Этот параметр задаёт мощность излучения, генерирующую на выходе фотоприёмника такой сигнал, который имеет такую же величину, как и шум. В данном случае имеют значения условия измерения (диапазон длин волн, частота модуляции, ширина полосы). Этот параметр учитывает, с одной стороны, то, что ток сигнала пропорционален интенсивности оптического сигнала, а с другой стороны, — что проявляющиеся механизмы шума вызывают шумовой ток, пропорциональный  $\sqrt{\Delta f}$ .

Параметр, обратный NEP, для заданной площади фоточувствительной поверхности  $A$ , называется обнаружительной способностью  $D^*$  (или пределом детектирования):

$$D^* = \frac{\sqrt{A}}{\text{NEP}} \left[ \frac{\text{см/Гц}}{\text{Вт}} \right].$$

Термин темновой ток относится к току, который протекает в отсутствие засветки. В случае фотоприёмников — это обратный ток диода. В случае фототранзисторов и фотодарлингтонов — это усиленный ток утечки перехода коллектор — база, который работает как фотодиод. Темновой ток возрастает с температурой (в случае Si примерно удваиваясь при изменении температуры на 10 К), что может сказываться в случае фототранзисторов и, в особенности, в случае фотодарлингтонов.

#### 4.1.5. Светоизлучающие диоды

Светоизлучающие диоды представляют собой полупроводниковые диоды, генерирующие излучение при протекании через них прямого тока. Этот процесс включает в себя инжекцию избыточных носителей заряда в  $n$ - и  $p$ -области, где часть из них ре-

комбинирует с испусканием фотонов (инжекционная люминесценция).

В отличие от лампы накаливания их спектр излучения ограничен в узком интервале длин волн, который, в первую очередь, определяется шириной запрещённой зоны  $E_g$  ( $\lambda = (h \cdot c) / E_g$ ) полупроводника. Используемыми материалами являются соединения  $A^{III}B^V$ , так как они обладают необходимой шириной запрещённой зоны, а также потому, что, в отличие от непрямозонных полупроводников Si и Ge, их зонная структура обеспечивает эффективную излучательную рекомбинацию.

Излучающие диоды (Рис. 4.8) в основном изготавливаются из GaAs ( $E_g = 1.43$  эВ) или GaAlAs, и они генерируют излучение в ближней инфракрасной области спектра между 800 и 950 нм вблизи максимума спектра чувствительности фотоприёмников на основе Si. Они используются в системах дистанционного контроля и управления, а также в датчиках. К преимуществам этих приборов относятся компактность, механическая надёжность, способность работать при низких температурах, простота модуляции, а также совместимость с ТТЛ-микросхемами и высокая эффективность в несколько процентов.

Часть излучения выводится непосредственно вверх из кристалла или через его боковые грани, но даже та часть излучения, которая направлена к подложке кристалла, может быть использована, если подложка прозрачна и излучение частично отражается от обратной стороны кристалла.

Вновь подчеркнём, что в случае диодов, излучающих в видимой области спектра (СИД), излучение генерируется вследствие

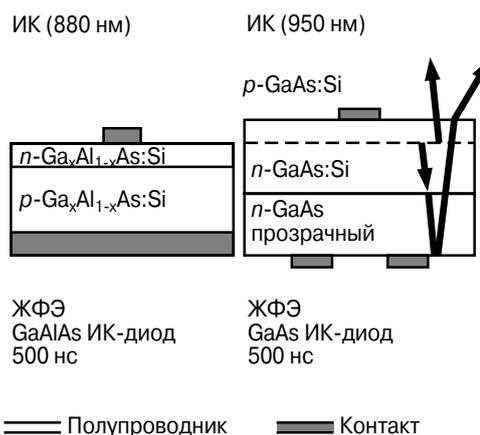


Рис. 4.8. Структура чипа излучающего диода ИК-диапазона.

излучательной рекомбинации пар носителей заряда в полупроводнике с энергией квантов, примерно соответствующей ширине запрещённой зоны  $E_g$ .

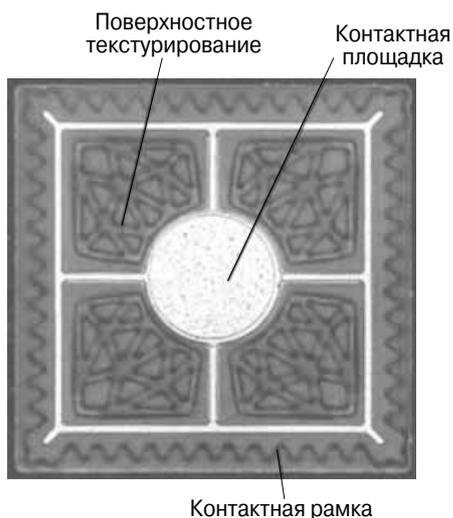
При изготовлении СИД используются структуры на подложках из GaAs (поглощающих свет), а также на подложках GaP, SiC и сапфира (прозрачных для света). В зависимости от желаемой длины волны излучения активная область структур выполняется на основе GaAsP с различным содержанием GaP.

Более современными полупроводниковыми материалами являются InGaN и InGaAlP. С использованием этих соединений определённого состава оказывается возможным перекрыть весь видимый диапазон спектра. В Табл. 4.2 приведены различные полупроводниковые материалы. В зависимости от конкретного применения длина боковой стороны кристалла может варьироваться от 150 мкм до 1 мм.

Таблица 4.2. Наиболее распространённые материалы для СИД (TSN соответствует прозрачной подложке и легированию азотом)

Диапазон	$\lambda$ [нм]	Подложка	$E_g$ [эВ]	Активная область
Инфракрасный	950	GaAs	1.3	GaAs:Si
	800...900	GaAs	1.4	GaAlAs
Красный	700	GaP	1.8	GaP:Zn, O
	660	GaAs	1.9	GaAs <sub>0.6</sub> P <sub>0.4</sub>
	635	GaP	2.0	GaAs <sub>0.35</sub> P <sub>0.65</sub> :N, TSN
Жёлтый	590	GaP	2.1	GaAs <sub>0.15</sub> P <sub>0.85</sub> :N, TSN
Зелёный	565	GaP	2.2	GaP:N
Голубой	465	SiC	2.7	InGaN
	405	сапфир		
Красный-зелёный	560...640	GaAs	2.0	InGaAlP
Синий-зелёный	450...540	SiC или сапфир	2.7	InGaN

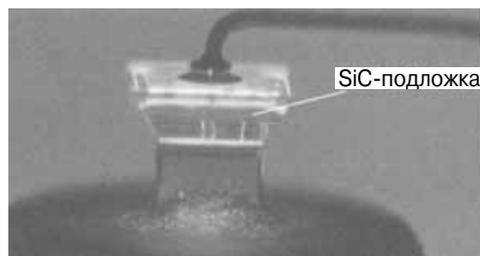
С точки зрения максимально возможного вывода излучения из кристалла первостепенное значение приобретает геометрия кристалла. Значительная часть излучения, генерируемого в полупроводнике, отражается от поверхности обратно вглубь кристалла вследствие полного внутреннего отражения под критическим углом. На **Рис. 4.9** показан кристалл на основе InGaAlP.



**Рис. 4.9.** Поверхность чипа на основе InGaAlP.

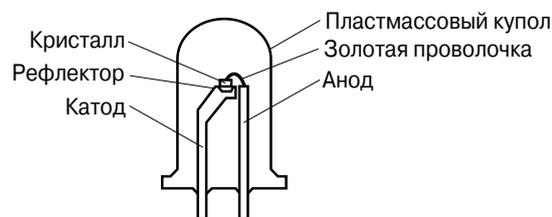
Используемое текстурирование поверхности ослабляет отражение вглубь кристалла, что обеспечивает увеличение выхода света через поверхность. Более того, контактная рамка распределяет электрический ток таким образом, чтобы свет не генерировался в областях, где его выход экранировался бы контактной площадкой. Аналогичным образом, геометрия кристалла на основе структур InGaN на подложках SiC выбирается таким образом (**Рис. 4.10**), что значительная часть генерируемого излучения направляется вглубь кристалла и выводится через боковые грани подложки. В дальнейшем эта часть генерируемого излучения может быть направлена вверх за счёт использования внешнего рефлектора.

Для защиты полупроводникового кристалла от воздействия окружающей среды и упрощения использования приборов при монтаже схемы кристаллы в основном устанавливаются в пластмассовые корпуса. Дополнительным преимуществом в этом случае является то, что пластмассовый корпус уменьшает критический угол полного отражения и, таким образом, обеспечивает усиление вывода света из кристалла. Кристалл



**Рис. 4.10.** Чип на основе InGaN с торцевыми сторонами пирамидальной формы (вид сбоку).

монтируется на основании рефлектора так, что даже боковое излучение отражается вверх. В случае приборов с куполообразным корпусом (**Рис. 4.11**) его искривлённая поверхность действует как линза, коллимирующая излучение вдоль оптической оси.



**Рис. 4.11.** СИД в куполообразном пластмассовом корпусе.

В настоящее время доминируют другие типы приборов, предназначенные для поверхностного монтажа (SMT), при этом приборы не встраиваются в печатную плату, а устанавливаются на её поверхности. Среди данного класса приборов имеется множество различных типов, в зависимости от области применения (**Рис. 4.12**). В частности,



TOPLED® : 3.2×2.8×1.9 мм



SmartLED™ : 2.0×1.4×1.3 мм



DRAGON: 7.0×6.0×1.8 мм,  
для размеров чипа вплоть до 1 мм<sup>2</sup>

**Рис. 4.12.** Различные типы СИД в SMT-корпусах.

существует тенденция разработки приборов как с малыми, так и с большими (с кристаллами площадью  $1 \text{ мм}^2$ ) размерами, обеспечивающими большую мощность излучения.

Светоизлучающие диоды используются преимущественно в системах подсветки приборных панелей, навигационных систем и т.д., в автомобильной электронике или подсветке ЖК-дисплеев, например в мобильных телефонах. За последнее время яркость СИД выросла настолько, что продолжают открываться всё новые области их применения вплоть до использования в системах внешнего освещения. Уже на протяжении нескольких последних лет повторители стоп-сигнала (CHMSL) в автомобилях изготавливаются на основе СИД. Помимо их большей долговечности, эти приборы обеспечивают и другой фактор безопасности, поскольку СИД обладают намного более высоким быстродействием по сравнению с лампами накаливания. В индикаторных мигалках и габаритных фарах также используются некоторые типы СИД. Другими областями применения являются полноцветные дисплеи, содержащие от нескольких тысяч вплоть до миллиона СИД, а также системы подсветки рекламы.

В характеристике, отражающей зависимости мощности и светового потока от тока для излучающих диодов и СИД, имеется область, в которой доминирует безызлучательная рекомбинация, линейная область, а также область, в которой начинает проявляться насыщение вследствие эффектов нагрева и насыщения излучательных переходов (Рис. 4.13). По мере увеличения температуры кристалла возрастает длина волны излучения и падает эффективность излучения.

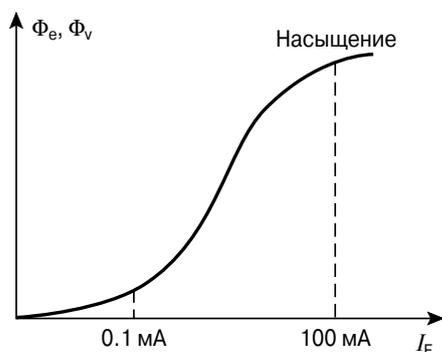


Рис. 4.13. Типичная зависимость величины светотехнических параметров СИД от тока.

Общей для всех излучающих полупроводниковых приборов является деградация их функциональных характеристик (уменьшение эффективности по мере наработки). Параметром надёжности, который используется в этом случае, служит время эксплуатации, в течение которого эффективность излучения при постоянном токе падает вдвое. Это явление не получило своего полного объяснения. В то же время представляется разумным предположение, что деградация связана с миграцией и распространением дефектов в кристалле.

Относительное спектральное распределение прибора определяет, каким образом интенсивность излучения СИД зависит от длины волны. Как правило, для пользователя эта зависимость не очень полезна, поскольку процедура измерения достаточно сложна и занимает много времени. В связи с этим ориентированными на потребителя параметрами, связанными со спектрами излучения, являются следующие:

- $\lambda_{\text{peak}}$  — длина волны в максимуме спектра излучения;
- $\Delta\lambda$  — ширина спектра излучения, измеренная по уровню 50%;
- $\lambda_{\text{Sp}}$  — длина волны в центре тяжести спектра излучения, имеющая важное значение для спектроскопических применений;
- $\lambda_{\text{Dom}}$  — доминирующая длина волны, определяющая цветовой оттенок, воспринимаемый человеческим зрением.

## 4.2. Полупроводниковые лазеры

За последние 20 лет значение полупроводниковых лазеров быстро возросло. Несмотря на то что газовые лазеры продолжают использоваться благодаря их высокой мощности и когерентности, а также возможности генерации коротковолнового излучения, во многих областях применения их достоинства перевешиваются преимуществами лазерного диода:

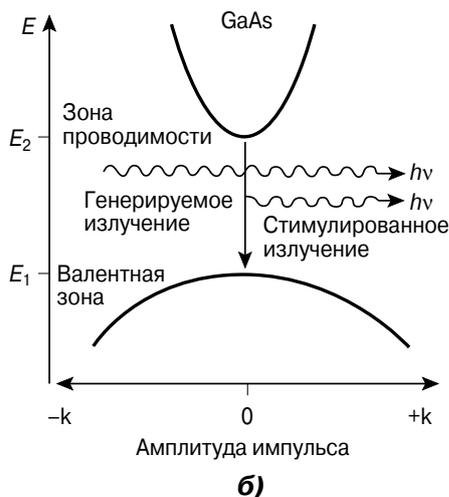
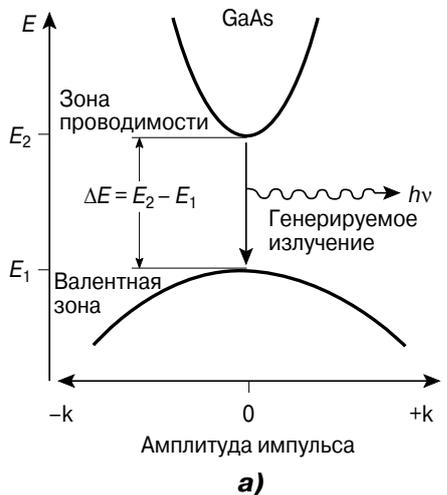
- низкая стоимость;
- малые размеры;
- высокая эффективность;
- большой срок службы.

В телекоммуникационной технологии лазерные диоды стали основным элементом, и даже в устройствах, где требуется высокая оптическая эффективность, полупроводниковые лазеры завоёвывают всё новые

сферы применения. Использование кристаллов с удвоением частоты показывает, что в этом случае функционирование приборов с излучением от видимой до УФ-области спектра более не является технической проблемой.

#### 4.2.1. Основы функционирования полупроводникового лазера

Основным физическим механизмом, ответственным за генерацию излучения в полупроводниках, является взаимодействие фотонов с носителями заряда в валентной зоне и зоне проводимости. Для проявления излучательной рекомбинации полупроводник должен иметь зонную структуру, показанную на **Рис. 4.14**.



**Рис. 4.14.** Зонная энергетическая модель, иллюстрирующая процессы генерации и рекомбинации в арсениде галлия: а — спонтанная эмиссия; б — стимулированное излучение.

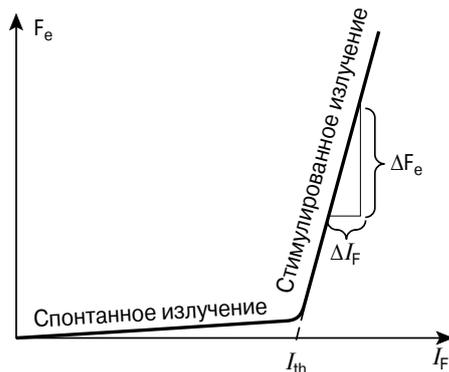
В рассматриваемом случае электрон может перейти вертикально из зоны проводимости в валентную зону с испусканием фотона. Энергия испускаемого фотона соответствует ширине запрещённой зоны полупроводника, что и определяет длину волны излучения.

В случае таких полупроводников, как германий и кремний, эффективная излучательная рекомбинация невозможна из-за того, что собственного импульса фотона недостаточно для выполнения закона сохранения импульса. Когда имеет место излучательная рекомбинация, баланс импульса может быть реализован лишь за счёт третьего участника процесса, такого как фононы (колебания кристаллической решётки) или дефекты. Подобный процесс называется спонтанным излучением, и он используется в светоизлучающих диодах (СИД) и излучающих диодах.

Принцип работы лазера основан на эффекте стимулированного излучения. Этот процесс имеет место, когда фотон с длиной волны, соответствующей  $\Delta E$ , взаимодействует с электроном зоны проводимости с энергией  $E_2$ . В этом случае фотон стимулирует электронный переход, как показано на **Рис. 4.14, б**. Особенностью данного процесса является то, что генерируемый фотон обладает той же длиной волны, фазой, поляризацией и направлением распространения, что и стимулирующий фотон. Стимулированное излучение соответствует режиму усиления падающих фотонов. Отсюда и происходит термин «лазер» — усиление света за счёт стимулированного излучения.

В тепловом равновесии число электронов валентной зоны с энергией  $E_1$  значительно больше числа электронов зоны проводимости с энергией  $E_2$ . В этих условиях вероятность того, что падающий фотон будет поглощён, намного больше, чем вероятность возникновения стимулированного излучения. Для увеличения вероятности процесса стимулированного излучения необходима инверсия заселённости носителей заряда в валентной зоне и зоне проводимости, при которой число электронов зоны проводимости с энергией  $E_2$  резко увеличится. В случае полупроводниковых лазеров такая инверсия заселённости достигается за счёт инжекции носителей заряда в активную область кристалла, содержащего *p-n*-переход. Для того чтобы добиться до-

статочной высокой заселённости зоны проводимости, необходим определённый минимальный ток, называемый пороговым током. На **Рис. 4.15** показана зависимость мощности излучения лазера от тока. При превышении порогового тока  $I_{th}$  происходит переход от изначального режима спонтанного излучения  $F_e$  к режиму стимулированного излучения.  $I_F$  — это прямой ток, протекающий через лазерный диод.



**Рис. 4.15.** Зависимость мощности излучения лазера от тока.

В области ниже порогового тока лазерный диод функционирует как светоизлучающий диод. В этом случае имеет место лишь спонтанное излучение. При превышении порогового тока запускается механизм стимулированного излучения, при этом мощность излучения линейно возрастает. Другим важным параметром полупроводникового лазера, как это следует из **Рис. 4.15**, является так называемая дифференциальная эффективность  $\Delta F_e / \Delta I_F$ , определяющая крутизну характеристики.

В зависимости от требуемого спектрального диапазона полупроводникового лазера в настоящее время в основном используются две полупроводниковые системы. В лазерных диодах на спектральный диапазон 1300...1550 нм (в основном для волоконно-оптических систем связи, см. раздел 4.4) активная область структур выполняется на основе InGaAsP на подложках InP. В лазерных диодах на спектральный диапазон 600...880 нм (для пластиковых волноводов и мощных лазерных диодов, рассматриваемых в подразделе 4.2.3) активная область выполняется на основе GaAlAs, а при длине волны более 880 нм используется InGaAlAs, при этом подложкой для таких структур является GaAs.

#### 4.2.2. Структура полоскового лазера с оксидной изоляцией

Для обеспечения надёжной работы даже при повышенной температуре окружающей среды чрезвычайно важными являются следующие условия:

- для обеспечения достаточно высокой плотности носителей заряда, вызывающей инверсию заселённости, необходима вертикальная локализация инжекции носителей заряда;
- активная область должна быть сконструирована в виде диэлектрического волновода, обеспечивающего высокую плотность фотонов;
- активная область кристалла должна быть сконструирована как оптический резонатор, в котором распространяющаяся волна частично отражается и всё больше усиливается;
- для получения высокой плотности мощности генерируемого излучения (МВт/см<sup>2</sup>) на лазерных зеркалах при обеспечении высокой надёжности и продолжительного срока службы лазерные зеркала должны иметь оптимальные покрытия;
- эффективная генерация излучения и малая скорость деградации приборов требуют высокого кристаллического совершенства используемых структур.

Вертикальная локализация реализуется за счёт использования так называемой двойной гетероструктуры, в которой активная область толщиной 0.1...0.2 мкм заключена между двумя ограничивающими слоями с большей шириной запрещённой зоны, как показано на **Рис. 4.16**. В этом случае формируются энергетические барьеры, локализующие инжекцию электронов и дырок в активную область. Большая ширина запрещённой зоны обуславливает уменьшение коэффициента преломления таким образом, что структура приобретает вид полоскового волновода, аналогичного волоконному волноводу (без начальных ограничений на поперечную ширину). Существует много различных способов обеспечения поперечного ограничения. В случае полоскового лазера с оксидной изоляцией область протекания тока ограничена полосковой областью шириной около 3 мкм, сформированной с использованием изолирующего окисного слоя, как это показано на **Рис. 4.16**.

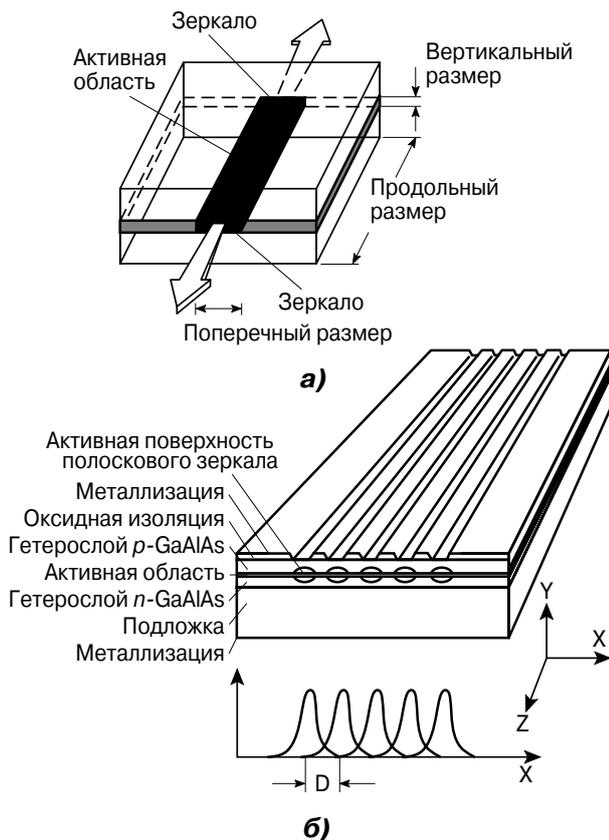


Рис. 4.16. Структура оксидного полоскового лазера на основе GaAlAs/GaAs.

Концентрация носителей заряда в пределах узкой области приводит к такому профилю мнимой части коэффициента преломления, который поддерживает стабильную поперечную фундаментальную моду (распространение волны в анизотропной среде). Волны могут распространяться и усиливаться только в пределах этой области. Любая волна, которая не распространяется параллельно границам данной области, поглощается и затухает. Этот тип волновода соответствует эффекту волноводного усиления. Лазерные диоды подобного типа называются также лазерами с волноводным усилением.

Для рассеяния выделяемого тепла используются различные типы металлических корпусов. На Рис. 4.17 показана возможная конструкция прибора, предназначенного для телекоммуникации и передачи данных. В рассматриваемом случае лазерный кристалл на основе InGaAsP припаивается на технологическую подложку на основе Si таким образом, чтобы теплоотвод осуществлялся через область с большим поперечным сечением. Стеклопризма направляет боковое излучение кристалла вертикально

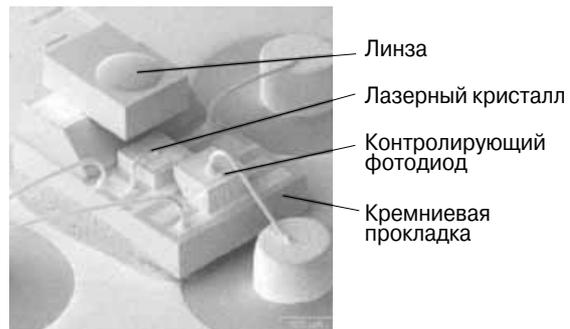


Рис. 4.17. Кремниевая подложка с лазерным кристаллом, линзой и контролирующим фотодиодом.

вверх. Смонтированная на призме линза может сфокусировать излучение в одномодовый волновод. С другой стороны от лазерного кристалла монтируется контролирующий фотодиод, который регистрирует очень слабое излучение от тыльного зеркала. С помощью этого фотодиода можно управлять мощностью излучения лазерного диода. Вся микросборка может быть смонтирована в металлическом корпусе, при этом приёмный световод может быть отъюстирован по оптическому пути излучения (Рис. 4.18).

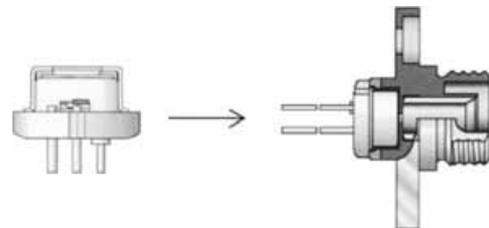


Рис. 4.18. Сборка на кремниевой подложке в металлическом корпусе TO46 с волоконным соединителем (приёмная часть).

### 4.2.3. Лазерные матрицы

Лазерные матрицы представляют собой конфигурацию из нескольких лазерных диодов одного типа, монолитно интегрированных в одном кристалле и предназначенных для увеличения мощности излучения. Последующее рассмотрение относится к 12-полосковой конфигурации (структура типа GRINGSCHSQW).

На Рис. 4.19 представлена фотография лазерного модуля на основе GaAlAs. Лазерный кристалл (выделенный кружком) монтируется в корпус типа TO-3 вместе с контролирующим фотодиодом, термистором с отрицательным температурным коэффици-

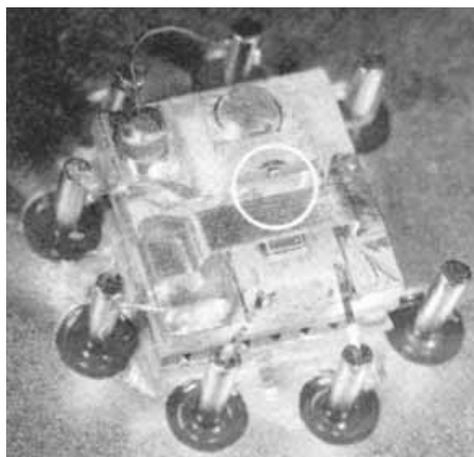


Рис. 4.19. Мощный лазер на основе GaAlAs.

ентом (NTC-термистор) и охлаждающим элементом Пельтье. Контролирующий фотодиод (ФД) регистрирует излучение от тыльного зеркала лазерного кристалла (около 10% от полной мощности излучения) для того, чтобы по его сигналу можно было контролировать и управлять мощностью излучения лазера. Лазерный кристалл монтируется на элемент Пельтье вместе с NTC-термистором, применяющимся в качестве датчика температуры, благодаря чему лазер работает в условиях постоянной температуры за счёт использования внешней регулирующей цепи. Данный режим особенно важен в том случае, когда необходимо обеспечить постоянную длину волны излучения (например, при накачке лазеров на основе алюмо-иттриевого граната), при этом подбор оптимального температурного режима позволяет прецизионно подстроить длину волны излучения и поддерживать её постоянной. Регулирующая цепь, предназначенная для этих целей, рассматривается в соответствующем подразделе ниже.

В постоянном (CW) режиме функционирования 12-полосковая квантово-размерная лазерная матрица обеспечивает мощное излучение в 250 мВт при типичном пороговом токе всего 280 мА, при этом дифференциальная эффективность составляет примерно 0.7 Вт/А. В сочетании с малым последовательным сопротивлением (приблизительно 0.5 Ом) это обеспечивает эффективность свыше 20%. При увеличении мощности вплоть до области, когда начинает проявляться насыщение (приблизительно 600...800 мВт), полная эффективность может составлять вплоть до 40%.

Лазерные диоды выпускаются также в виде модулей в герметичных металлических корпусах. Схемы соединений соответствуют DIL-конфигурации.

В Табл. 4.3 представлены основные характеристики лазерных матриц.

Мощные лазерные диоды пригодны для функционирования в постоянном режиме, что открывает новые области применения, в число которых входит накачка лазеров на алюмо-иттриевом гранате). Вплоть до последнего времени накачка подобных лазеров осуществлялась с использованием мощных ламп. Однако спектр излучения таких ламп очень широк, в то время как спектр поглощения кристалла алюмо-иттриевого граната (YAG) очень узок, что приводит к очень малой эффективности такой системы. В то же время за счёт оптимизации структуры и конфигурации активной области длина волны лазера на основе GaAlAs может быть настроена в точности на положение максимума спектра поглощения лазера на основе YAG. Это обеспечивает целый ряд преимуществ:

Таблица 4.3. Характеристики 12-полосковой лазерной матрицы

		Тип	SFH 4801	SFH 48E1	SFH 48R1
Предельно допустимые режимы	$\Phi_{CW}$	мВт	200	200	1000
	$\Phi_{peak}$	мВт	300	300	1200
	$V_R$	В	3	3	3
	$T_{sub}$	°С	+10...+65	-10...+65	+10...+65
Характерные параметры при $T_{sub} = 25^\circ\text{C}$ $t_p \leq 10 \text{ мкс}$ $D \leq 0.01$	$\lambda_{peak}$	нм	805	805	805
	$\Delta\lambda$	нм	2	2	4
	$\eta$	Вт/А	0.35	0.35	0.35
	$I_{th}$	мА	400	400	2000
	$\Phi_{CW}$	мВт	150	150	800
	$\Phi_{peak}$	мВт	250	250	1000
Особенности			12-полосковая	12-полосковая	Матрица форматом 5×12

- Эффективность системы накачки очень высока, что обусловлено высокой эффективностью полупроводникового лазера (более 20%) и точным согласованием длины волны излучения и максимума поглощения.
- Малая тепловая нагрузка кристалла YAG позволяет в рассматриваемом случае обеспечить лучшие оптические характеристики излучения, уменьшить ширину линии излучения и использовать более простую схему охлаждения.
- Полупроводниковые лазеры используют простые источники питания, в то время как лампы накачки требуют применения мощных высоковольтных систем возбуждения.
- Благодаря высокой эффективности использование мощных лазеров на основе GaAlAs в качестве источников накачки обеспечивает более длительный срок службы системы в целом. При этом очень маловероятным является внезапный катастрофический отказ системы, что, как правило, происходит при применении ламп накачки. Единственное, что происходит при использовании лазерных диодов, так это плавное ухудшение оптических характеристик системы.

#### *Регулирующая схема для лазерной матрицы SFH48E1*

В мощную лазерную матрицу типа SFH48E1 интегрируются контролирующий ФД для управления и регулирования лазером, элемент Пельтье для охлаждения и NTC-термистор в качестве датчика температуры. Вместе с регулирующей схемой эти компоненты обеспечивают оптимальные условия работы прибора.

Мощный операционный усилитель TCA 2465 (2 усилителя в одном корпусе) выдаёт выходной ток вплоть до 2.5 А. Таким образом, прибор идеально подходит для рассматриваемого применения. Описываемая схема поддерживает стабильный режим работы лазерной матрицы, предохраняет её от инверсии полярности, перегрузки по току и напряжению.

Длина волны излучения зависит от рабочей температуры. Благодаря этому она может быть подстроена в определённых пределах и поддерживаться постоянной на уровне, необходимом для конкретного при-

менения. В то же время большая мощность излучения определяется током, протекающим через лазерный диод.

Лазерная матрица вместе с контролирующим ФД, элементом Пельтье и прецизионным NTC-термистором встраивается в корпус типа TO-3. Лазерная матрица монтируется на охлаждающий элемент Пельтье. Элемент Пельтье переносит тепло с одной стороны на другую в зависимости от величины и направления тока, протекающего через него. Вместе с интегральным NTC-термистором через внешнюю регулируемую цепь он обеспечивает поддержание системы при постоянной температуре.

Для функционирования лазерного диода требуются две цепи управления током, работающие независимо: одна цепь предназначена для регулировки температуры и поддержания её постоянной, в то время как вторая — для управления мощностью излучения. Описанная схема обеспечивает такой режим работы, при котором ни при каких обстоятельствах величины тока и напряжения, подводимых к модулю, не превысят допустимых значений даже на короткий промежуток времени.

Как показано на **Рис. 4.20**, два операционных усилителя действуют непосредственно на лазерный диод и элемент Пельтье. Напряжения, пропорциональные их выходным токам, подаются обратно через токовые шунты к каждому из отрицательных входов. Это означает, что схема действует как контроллер пропорциональности (P). Потенциометры позволяют установить заданные значения температуры и мощности излучения.

NTC-термистор, интегрированный в корпус лазера, измеряет температуру, значение которой можно отобразить с помощью вольтметра. Встроенная линия задержки подводит к лазеру ток только через 1 с после включения. Это обеспечивает возможность охлаждения в необходимый момент времени.

Экстренное выключение осуществляется разрывом линий подачи питания при срабатывании переключателей в операционных усилителях. Схема спроектирована и рассчитана на постоянный режим работы лазера. В том случае, когда требуются более высокие уровни тока в импульсном режиме, может быть использован прибор TCA 1365 OP (с выходным током 4 А).

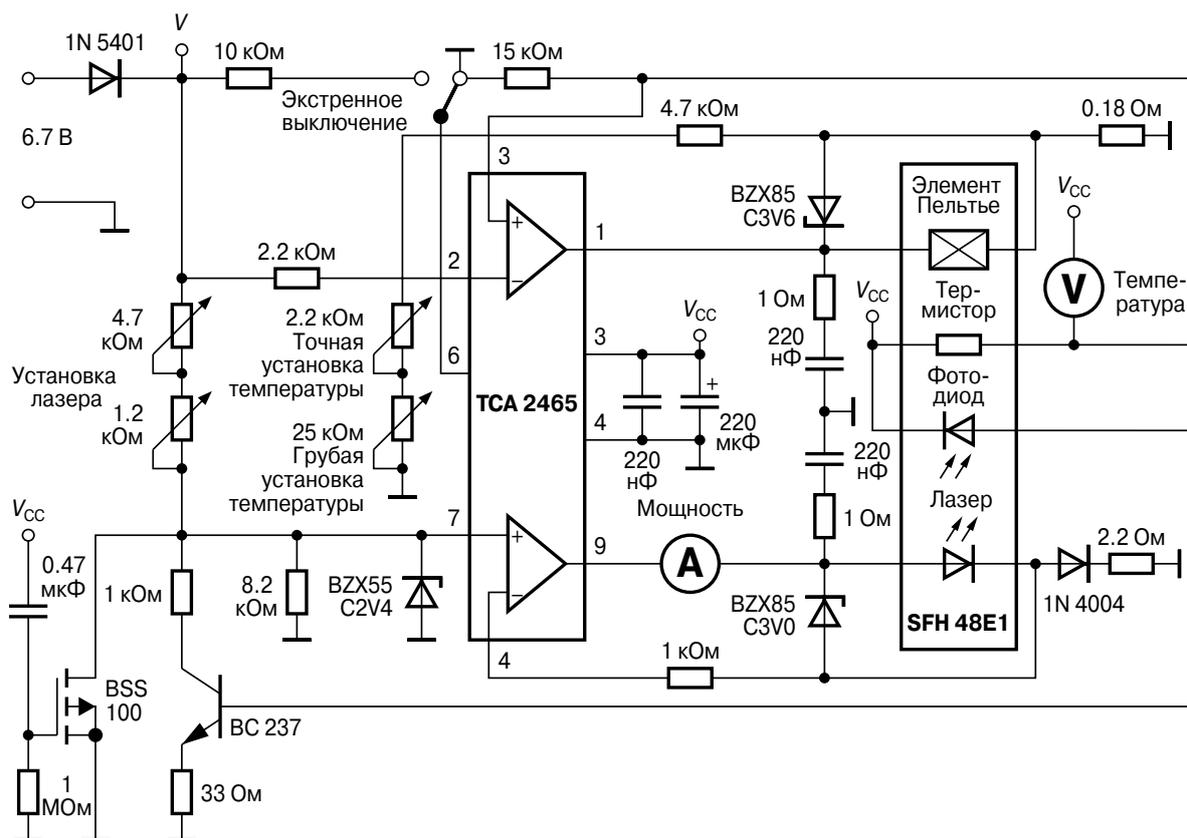


Рис. 4.20. Схема управления мощным лазером.

#### 4.2.4. Другие применения полупроводниковых лазеров

- Благодаря своей когерентности и высокой частоте модуляции (возможна прямая модуляция) описываемые мощные лазеры пригодны для оптической связи через открытое пространство.
- Благодаря большой мощности излучения, которое может быть введено в многомодовое волокно, полупроводниковые лазеры на основе GaAlAs пригодны также для передачи энергии с гальванической развязкой. При помощи современных фотодиодов может быть реализовано эффективное обратное преобразование оптической энергии в электрическую.
- Ещё одно применение связано с практически мгновенным включением высоковольтных тиристоров через волоконно-оптическую сеть.
- Большая мощность излучения делает возможным реализацию режима удвоения частоты в нелинейно-оптических кристаллах. За счёт генерации второй гармоники можно получить когерентное синее излучение, используя инфракрасное излучение.
- Как было описано выше, полупроводниковые лазеры используются для накачки лазеров на основе YAG, предназначенных для обработки материалов, например для сварки панелей при изготовлении автомашин.
- Благодаря своим преимуществам (компактность, эксплуатационный ресурс, модуляционные характеристики, стоимость) по сравнению с газовыми и твердотельными лазерами, лазеры на основе GaAlAs оптимальны для использования в лазерных принтерах.
- Другим известным применением является лазерный пойнтер (указка). Более 10 лет назад предпочтение отдавалось хорошо различимому красному излучению преимущественно от гелий-неонового лазера с типичной длиной волны 633 нм. С тех пор оказалось возможным разработать лазерные диоды с длиной волны около 600 нм, генерирующие очень яркое излучение, сфокусированное практически в точку и имеющее мощность 1 мВт, что достаточно мало по сравнению с безопасным порогом для человеческого зрения.
- Уже на протяжении многих лет импуль-

сные лазерные диоды используются для измерения расстояния и скорости, например в автомобильной электронике для измерения расстояния до впереди идущего транспорта. Импульсные лазерные диоды реагируют на очень короткие, но мощные импульсы тока (длительностью 50...200 нс и амплитудой вплоть до 100 А), что сопровождается столь же короткими и мощными (вплоть до 100 Вт) импульсами инфракрасного излучения (800...1000 нм). Сквасность импульсов достаточно мала (несколько тысяч), но, с другой стороны, возможно использование частот повторения в диапазоне кГц.

- Существуют импульсные лазерные диоды, которые хотя и не могут генерировать излучение такой мощности, но способны обеспечивать импульсы излучения длительностью вплоть до 100 мкс. Импульсы указанной длительности несут такую энергию, которая способна вызывать детонацию взрывчатых веществ. Возможен перенос оптической мощности по волноводу, а также дистанционные подрывы без опасности ложного подрыва из-за влияния электромагнитных полей.
- В разделе 4.4 более подробно рассматривается использование лазерных диодов в области связи и передачи данных при проектировании волоконно-оптических систем.

### 4.3. Оптроны и твердотельные реле

#### Конструкция

Оптроны способны передавать постоянные и переменные сигналы с частотой вплоть до нескольких МГц при обеспечении электрической изоляции. С этой целью источник излучения преобразует входной электрический сигнал в оптическое излучение (видимое или инфракрасное). Внутри корпуса прибора указанное излучение падает на фотодетектор (фототранзистор, фотоэлектрическую ИС, фототриак), который преобразует оптический сигнал обратно в электрический. Твердотельные реле (SSR) используются для замены миниатюрных механических реле, при этом в фотодетекторной секции они содержат набор фотодиодов и два мощных MOSFET.

Наиболее популярным является пластмассовый корпус типа DIL с 4/6/8/16 выводами. В таком корпусе может быть интегрировано вплоть до 4 каналов. Тенденция на-

стоящего времени (если это позволяет специфика применения) — использование корпусов меньшего размера, таких как SOIC-8 и SOT223.

При приложении высокого напряжения между входом и выходом оптрона, возникает внутреннее электрическое поле с напряжённостью вплоть до  $10^4$  В/см. Из-за такой высокой напряжённости поля становится возможной миграция ионов на чип фототранзистора, в результате происходит изменение характеристик транзистора за счёт полевого эффекта. В отдельных случаях это может приводить к полной потере работоспособности оптрона. В оптронах Infineon удалось практически полностью устранить этот эффект за счёт нанесения слегка проводящего прозрачного ионного экрана (TRansparent IOOn Screen — TRIOS®) на поверхность. Для улучшения характеристик поверхности под слоем TRIOS формируется дополнительный слой нитрида кремния, интегрированный в структуру фототранзистора (Рис 4.21). Этот дополнительный слой действует как пассиватор против чужеродных атомов, а также выполняет функцию оптического покрытия.

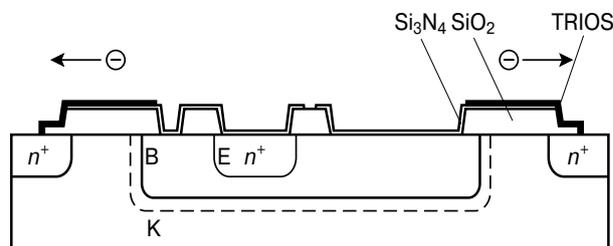


Рис. 4.21. Фототранзистор с TRIOS.

#### Применение

Сферы применения оптронов очень разнообразны, при этом наиболее популярными являются следующие:

- импульсные источники питания для промышленных и бытовых целей;
- программируемые логические контроллеры (PLC);
- системы связи (модемы, средства доступа к данным, устройства передачи данных);
- периферийное оборудование ПК;
- силовая электроника (контроллеры IGBT);
- медицинские технологии.

### Параметры

В случае фототранзисторных оптронов такой параметр, как коэффициент передачи по току (Current Transfer Ratio — CTR) определяет отношение выходного тока к входному. В спецификациях на приборы этот параметр приводится, как правило, для прямого тока через излучающий диод  $I_F = 10$  мА и при напряжении на фототранзисторе  $V_{CE} = 5$  В. В случае оптронов с цифровым выходом, фототриakov и твердотельных реле вместо CTR приводят пороговый ток  $I_{FTH}$  для излучателя, при котором оптрон включается или выключается.

### Безопасность

Оптроны и твердотельные реле конструируются таким образом, чтобы разность потенциалов в несколько сотен вольт между входом и выходом на протяжении многих лет не приводила к ухудшению изолирующих свойств. Они должны выдерживать и импульсное перенапряжение амплитудой в диапазоне кВ, которое может возникать на короткое время в источниках питания на 250 В и приводить к пробое изолирующей области.

В процессе изготовления каждый оптрон проверяется на способность выдерживать испытательное напряжение, приводимое в спецификациях. Оценка оптронов для изоляции магистралей проводится в соответствии со стандартом DIN/VDE. Дополнительные испытания, проводимые в других международных испытательных центрах, включая, например, UL, CSA, BSI, FIMKO, обеспечивают максимальную степень безопасности для пользователя.

### Основные характеристики оптронов

Доминирующей областью применения оптронов является передача сигналов с гальванической развязкой. В этой связи возможные применения оптронов определяют следующие параметры:

- высокая скорость переключения;
- передача постоянного (CW) и переменного сигналов;
- широкий диапазон температур;
- способность выдерживать высокотемпературные циклы;
- малые габариты;
- высокая надёжность;

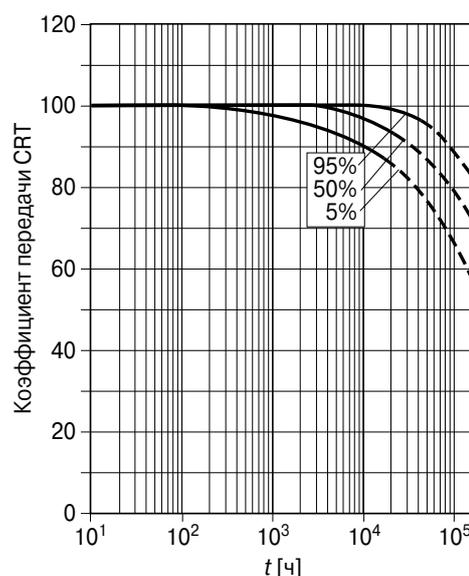
- устойчивость к воздействию высокого напряжения;
- ограниченная скорость деградации светоизлучающих диодов;
- стабильность транзисторных характеристик.

### Стабильность транзистора

В процессе эксплуатации может проявиться существенное различие характеристик светоизлучающего диода на основе арсенида галлия и кремниевого фототранзистора. Если в дополнение к этому предусматривается работа в условиях высоких температур (например при  $+90^\circ\text{C}$ ), то может быть заметным проявление полевого эффекта в фототранзисторе. Оптроны, предназначенные для работы в жестких условиях, должны проходить 100%-ную тренировку. Это означает, что поставка приборов возможна лишь после стабилизации их оптических и электрических параметров.

### Старение светоизлучающих диодов

Минимальное время наработки как характеристика надёжности определяется как промежуток времени, в течение которого интенсивность излучения при постоянном токе падает наполовину по сравнению с первоначальной величиной. На **Рис. 4.22** представлены типичные зависимости, полученные на большом массиве приборов. Рисунок показывает, что минимальное время наработки превышает 200 000 часов эксплуатации. Графики демонстрируют вре-



**Рис. 4.22.** Снижение CTR в процессе наработки.

менную зависимость падения CRT при входном токе  $I_F = 60$  мА (измерения проводились при температуре  $+25^\circ\text{C}$ ,  $I_F = 10$  мА,  $V_{OF} = 5$  В).

Минимальную наработку по критерию 50% называют также эксплуатационным ресурсом (или сроком службы) оптронов.

#### 4.4. Оптические волноводы

В настоящее время открываются всё новые области применения оптических волноводов в виде стеклянных или пластмассовых волокон, предназначенных для оптической передачи данных. Помимо классических применений при проектировании систем дальней связи, они используются и в локальных системах связи (LAN), например в системах передачи данных от центральных компьютеров к периферийным устройствам бортовых систем (самолёты, транспортные средства, корабли), а также во всё возрастающей степени в развлекательной электронике, метрологии, открытых и замкнутых кольцевых системах управления, кабельном телевидении и установках с антенной коллективного пользования.

К числу преимуществ этого вида связи относятся:

- широкая полоса пропускания (высокая пропускная способность);
- гальваническая развязка между передатчиком и приёмником;
- устойчивость к воздействию электромагнитных помех;
- скрытность передачи информации;
- отсутствие рассеянного излучения и, как следствие, отсутствие перекрёстных помех;
- отсутствие цепей заземления;
- отсутствие возможного искрения;
- малый вес и незначительные требования по габаритам;
- практически неограниченная доступность материалов и компонентов.

Основными материалами, используемыми для оптической связи, являются стекло и пластмасса. Для каждого из этих материалов характерны свои применения, использование специфических полупроводников и элементов соединения. Применение стеклянных волокон предпочтительно для систем с высокой скоростью передачи и на большие расстояния или для локальных систем. Пластмассовые волокна пригодны

для использования в локальных сетях с малой скоростью передачи данных, а также для многочисленных применений в контрольно-измерительной технике.

Вследствие того, что пластмассовые волокна имеют больший диаметр волокна (1 мм), допуски на оптические соединители не столь критичны, как для стеклянных волокон, и поэтому они существенно дешевле. В заключительном разделе этой главы описан ряд применений систем связи с пластмассовыми волокнами.

##### 4.4.1. Оптические волокна как среда для передачи информации

Стеклянные волокна, предназначенные для использования в качестве диэлектрических волноводов, изготавливаются либо из чистого силикатного стекла, либо из стёкол, легированных примесными атомами для модификации их коэффициента преломления. Основной принцип волноводного эффекта может быть описан следующим образом (Рис. 4.23): если пучок луча падает на торец волокна в пределах некоторого ограниченного угла  $\gamma$  (числовая апертура, NA), то он входит в волокно и распространяется далее за счёт полного внутреннего отражения на границе сердцевина/оболочка при условии, что угол  $\alpha$  меньше критического угла для полного внутреннего отражения.

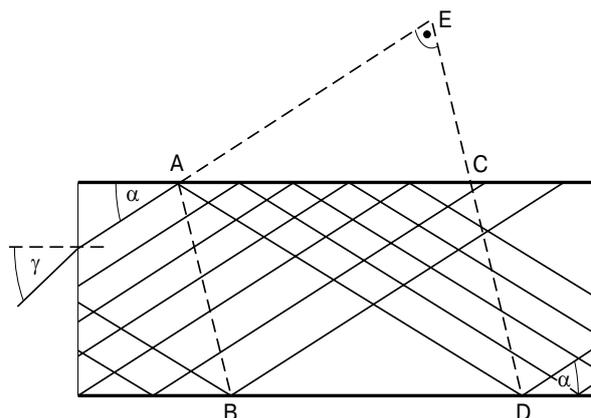


Рис. 4.23. Распространение света в световоде.

Следует различать три типа стеклянных волокон (Рис. 4.24):

- **Многомодовые волокна со ступенчатым профилем коэффициента преломления**  
В этих волокнах с широкой сердцевиной может распространяться набор мод, что

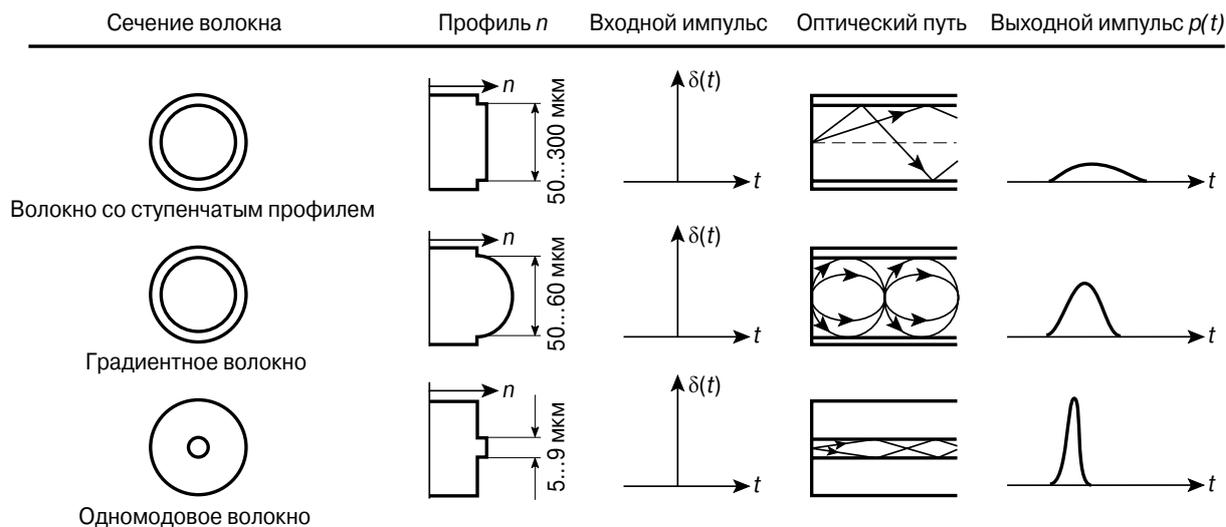


Рис. 4.24. Основные типы волокон и их характеристики.

приводит к удлинению оптического импульса со скоростью 20...50 нс/км. Ослабление/потери в этом случае достаточно велики (несколько дБ/км). Преимуществом является простота (и, следовательно, малая цена) ввода сигнала благодаря большому диаметру сердцевины. К недостаткам следует отнести недостаточную ширину полосы пропускания как следствие увеличения длительности импульса.

- **Многомодовые градиентные волокна**

Параболический профиль распределения коэффициента преломления по сечению волокна вызывает волноводное распространение излучения вдоль границ сердцевины (вместо эффекта полного внутреннего отражения от границы между сердцевиной и оболочкой), что приводит к существенному уменьшению модовой дисперсии. Два стандартных типа волокна имеют сердцевину диаметром 50 и 62.5 мкм. Коэффициент ослабления составляет 2.5...3 дБ/км на длине волны 850 нм и 0.6...0.8 дБ/км на длине волны 1300 нм. Вновь отметим, что простота ввода излучения благодаря большой ширине сердцевины является преимуществом данного типа волокна. В то же время его стоимость несколько выше по сравнению с одномодовым волокном. Пропускная способность для стандартных волокон составляет 500 МГц/км на длине волны передачи 1300 нм. Волокна, оптимизированные для лазерных систем передачи, обладают полосой пропуска-

ния, обеспечивающей скорость передачи 1 Гбит/с на расстояния от 300 до 1000 м.

- **Одномодовые волокна со ступенчатым профилем коэффициента преломления**

В сердцевине этих волокон, типичная ширина которых составляет всего 9 мкм, может распространяться всего одна мода. Коэффициент ослабления составляет 0.15...0.25 дБ/км. Граничная скорость передачи превышает 10 Гбит/с, что обеспечивает возможность передачи данных с такой скоростью на расстояния свыше 100 км. Этот тип волокна имеет невысокую стоимость, но требует использования прецизионных оптических компонентов (стыковочные узлы, оптические разъёмы).

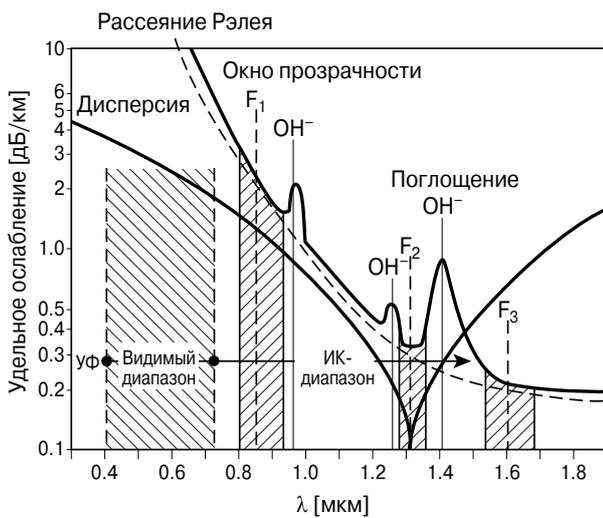
Стекланные волокна стандартизированы международным стандартом IEC 60793.

На Рис. 4.24 показаны общепринятые типы волокон и их характеристики.

#### 4.4.2. Передающие и приёмные модули для оптоволоконных применений

Вследствие спектральной зависимости коэффициента ослабления стекланных волокон (Рис. 4.25) передатчики и приёмники на длину волны около 850 нм изготавливаются на основе Si, GaAs или GaAlAs, а на длину волны около 1300 и 1550 нм — на основе Ge и четырёхкомпонентных структур, таких как InGaAsP.

Оптико-механическое соединение накладывает очень жёсткие требования по взаимной юстировке полупроводниковых компонентов и оптического волновода (до-



**Рис. 4.25.** Спектральная зависимость ослабления в кварцевом волокне.

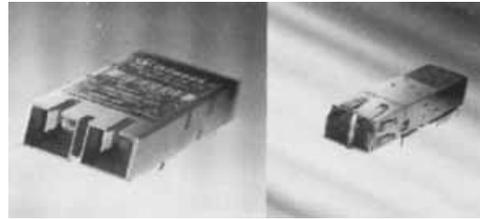
пуск при использовании одномодовых волокон составляет всего  $\pm 0.1$  мкм). По этой причине законченные модули, рассчитанные на конкретные применения, включают в себя передатчик и приёмник, интегрированные в едином модуле.

Всё более усиливающейся тенденцией при разработке оптических систем становится применение так называемых трансиверов (приёмопередатчиков, TRX), которые в передающем терминале оснащаются светодиодами или лазерами. Наиболее часто используемыми спектральными диапазонами в рассматриваемом случае являются 850 и 1300 нм, при этом они делятся на 3 категории в зависимости от дальности передачи: длина волны 850 нм используется для локальных сетей (LAN) на расстояния вплоть до 2 км, длина волны 1300 нм — для городских сетей (MAN) на расстояния примерно до 15 км, а для глобальных сетей (WAN) — на расстояния примерно 100 км.

В приёмном терминале обычно размещаются *p-i-n*-фотодиоды, которые подсоединяются к схеме приёмника. В том случае, когда из-за большого расстояния сигнал слишком слаб, может оказаться необходимым использовать лавинный фотодиод (ЛФД) в приёмной цепи.

В то время как трансиверы на основе СИД используются для передачи данных со скоростью до 300 Мбод, применение лазерных трансиверов позволяет существенно увеличить этот предел. При типичной современной скорости передачи вплоть до 10 Гбит/с они наиболее часто используются

при оптоэлектронном преобразовании. По мере расширения области применения лазерных модулей возросла скорость передачи данных, а также вдвое уменьшились габариты приборов (**Рис. 4.26**).



**Рис. 4.26.** Сравнение универсального 1×9 и SFF-модулей.

В отличие от прежних источников питания на 5 В, в современных модулях практически исключительно используется напряжение 3.3 В, при этом тенденцией является разработка всё более низковольтных модулей. К тому же TTL-интерфейс, который прежде был практически стандартным для подключения светодиодных компонентов, уступает место более быстродействующим интерфейсам, таким как PECL, CML или LVDS.

В **Табл. 4.4** приведены справочные данные для типичного трансивера со скоростью передачи 1.25 Гбод на основе лазера как передающего прибора.

Другим отличием от трансиверов на основе СИД является требование по лазерной безопасности, а также необходимость контроля характеристик трансивера.

В отличие от лазеров, из-за большого угла излучения, составляющего практически  $180^\circ$ , излучение СИД практически не способно повредить человеческое зрение. В то же время лазеры, используемые в трансиверах, имеют угол излучения величиной всего в несколько градусов. Вследствие этого всё излучение может пройти через зрачок в человеческий глаз и, в зависимости от интенсивности излучения, привести к различным повреждениям.

В зависимости от мощности и длины волны излучения лазерные трансиверы разбиваются на классы. Каждый трансивер содержит контролируемую схему, которая отслеживает, чтобы мощность излучения не превысила предельного значения, установленного для конкретного класса трансивера.

Помимо требований по лазерной безопасности, которые должны удовлетворять-

Таблица 4.4. Справочные данные для трансивера на скорость передачи 1.25 Гбод

Параметр	Обозначение	MIN	TYP	MAX	Единица измерения
<b>Рекомендуемые условия эксплуатации</b>					
Окружающая температура	$T_{AMB}$	0	—	70	°C
Напряжение питания	$V_{CC} - V_{EE}$	3.1	3.3	3.5	В
<b>Передатчик</b>					
Дифференциальное напряжение входного сигнала	$V_{DIF}$	250	—	1600	мВ
<b>Приёмник</b>					
Центральная длина волны	$\lambda_c$	770	—	860	нм
<b>Электрооптические характеристики передатчика</b>					
Введённая мощность (средняя)	$P_0$	-9.5	-6	-4	дБм
Амплитуда оптической модуляции	OMA	156	450	—	мкВт
Центральная длина волны	$\lambda_c$	830	850	860	нм
Спектральная ширина (RMS)	$\sigma_1$	—	—	0.85	нм
Относительная интенсивность шума	RIN	—	—	-117	дБ/Гц
Отношение затухания (динамическое)	ER	9	13	—	дБ
Порог сброса	$V_{TH}$	2.5	2.75	2.99	В
Полное время сброса	$t_{RES}$	140	240	560	мс
Время сброса (20%...80%)	$t_R$	—	—	260	пс
Ток питания	—	—	40	65	мА
<b>Электрооптические характеристики приёмника</b>					
Чувствительность (средняя мощность)	$P_{IN}$	—	-20	-17	дБм
Насыщение (средняя мощность)	$P_{SAT}$	0	—	—	дБм
Минимальная амплитуда оптической модуляции	OMA	—	19	31	мкВ
Чувствительность приёмника при 50-мкм опто-волоконне	SPIN 50 $\mu\text{m}$	—	24	55	мкВт
		—	-17	-13.5	дБ
Чувствительность приёмника при 62.5-мкм опто-волоконне	SPIN 62.5 $\mu\text{m}$	—	32	67	мкВт
		—	-16	-12.5	дБ
Уровень установки сигнала LOS	$P_{LOSA}$	—	-21	-18	дБм
Уровень сброса сигнала LOS	$P_{LOSD}$	-30	-22	—	дБм
Гистерезис сигнала LOS	$P_{LOSA} - P_{LOSD}$	0.5	1	—	дБ
Время установки сигнала LOS	$t_{ASS}$	—	—	100	мкс
Время сброса сигнала LOS	$t_{DAS}$	—	—	350	мкс
Полоса пропускания по уровню -3 дБ	—	—	1.25	1.5	Гц
Полоса пропускания по уровню -10 дБ	—	—	1.5	3	Гц
Дифференциальное напряжение на выходе данных	$V_{DIFF}$	0.5	0.7	1.23	В
Ослабление отражённого сигнала	$A_{RL}$	12	—	—	дБ
Ток потребления	—	—	60	90	мА

ся в случае сбоев в работе трансиверов, потребителю предоставляется ряд параметров для целей контроля. К их числу относятся такие параметры, как мощность входного излучения приёмника, сигнал при получении данных, ток смещения лазера и выходная мощность передатчика (лазера).

Одновременно с этим для увеличения уровня сигнала в магистральных системах во всё большей степени используются волоконные усилители, устраняющие прежде существовавшую необходимость преобразования оптического сигнала в электрический с последующим его усилением и повторным преобразованием в оптический сигнал. В рассматриваемом случае волокно, легированное эрбием, приводится в возбуждённое состояние излучением накачки. Длина волны излучения накачки должна соответствовать одной из полос поглощения эрбия (например, 1480 нм). При появлении фотона с длиной волны около 1555 нм, переносящего сигнал, несколько электронов переходят на более низкий энергетический уровень, при этом излучается фотон с длиной волны 1555 нм. Это и приводит к эффекту усиления. Для окна прозрачности вблизи 1300 нм используется легирование празеодием.

#### 4.4.3. Ретрансляторы для волоконно-оптических применений

Помимо упоминавшихся в разделе 4.4.2 трансиверов, преобразующих сигнал последовательных данных в световой сигнал и обратно, используются так называемые транспондеры (ретрансляторы) и оптические модули параллельного преобразования. Эти приборы предоставляют системному разработчику дополнительные возможности, поскольку, кроме чисто последовательного оптоэлектронного преобразования, они способны реализовывать дополнительные комбинации функций.

Для объединения каналов, подключённых параллельно, в транспондере используется мультиплексор, при этом транспондер формирует последовательные сигналы и вводит их в световод.

При помощи демультиплексора в секции приёмника последовательные сигналы преобразуются в первоначальный параллельный вид, что позволяет пользователю осуществлять их дальнейшую обработку.

Благодаря этому электрические сигналы на входе, поступающие параллельно, считываются в мультиплексоре с тактовой частотой, генерируемой в данном модуле. Затем сигналы последовательно выводятся из мультиплексора с тактовой частотой, которая превышает частоту считывания в число раз, равное числу входных электрических каналов. В дальнейшем, совершенно аналогично приёмопередатчику, сигнал подаётся в драйверную цепь СИД или лазера, которые и преобразуют его в оптический сигнал.

Последовательные оптические сигналы проходят оптоэлектронное преобразование, после чего они вводятся в демультиплексор, восстанавливающий тактовую частоту из поступающих данных.

Эта тактовая частота используется для преобразования входящих данных в обратной последовательности по сравнению с мультиплексором снова в параллельный вид, после чего они становятся доступными для пользователя.

Другую возможность параллельной передачи сигналов данных предоставляют оптические модули параллельной передачи. Эти приборы имеют столько же выходных оптических каналов, сколько и входных электрических каналов, что по сути делает прибор набором трансиверов, соединённых последовательно, при этом прибор компактнее в 6...12 раз. Поскольку данные модули используются преимущественно для распределения сигналов магистральной, принципиально важна синхронная передача сигналов. Для этого, в свою очередь, необходимо, чтобы время распространения сигналов по стеклянным волокнам, идущим параллельно, было абсолютно одинаковым. При длительности импульсов 400 пс (2.5 Гбит/с) и длине линии 100 м это означает, что допустимое различие длины всех 12 волокон составляет 0.01%, что соответствует значению всего около 10 мкм.

В оптической части упомянутых выше модулей используются оптические разъёмы, соответствующие различным стандартам, которые рассматриваются в разделе 4.4.4.

#### 4.4.4. Подсоединение к стеклянным волокнам

Для соединения оптических волокон используются два основных способа: неразъёмное соединение (сплавное соединение) и

разъёмное соединение (оптические разъёмы, полуразъёмные соединения).

### Сплавные соединения

Когда стеклянные волокна соединяются путём сплавления, концы двух волокон оплавляются нагревом электрической дугой. Высокой механической точности и контроля за тепловым процессом добиваются за счёт использования полностью автоматических установок сплавления (**Рис. 4.27**), обеспечивающих оптические потери в местах сплавления менее 0.5 дБ для одномодовых волокон. Место сплавления должно быть защищено. Этот способ используется для соединения отрезков кабелей из многих волокон по маршруту линии, а также для подсоединения к оптическим элементам терминала (разъёмы, передатчики, приёмники, при этом в каждом случае через выведенные отрезки волокна).



**Рис. 4.27.** Устройство полностью автоматизированного сращивания волокон.

### Разъёмные соединения

Оптические разъёмы используются для быстрого и воспроизводимого приведения в контакт волокон при возможности быстрого их разъединения в любой момент времени.

По мере технического развития на рынке утвердился целый ряд таких систем, часть из которых имеет лучшие характеристики. Наиболее распространённые разъёмы стандартизируются в соответствии с международным стандартом IEC 60874.

Базовый принцип наиболее распространённых разъёмов заключается в следующем: концы соединяемых волокон вводятся в ориентирующий элемент. Это обеспечи-

вает (возможно с использованием дополнительных элементов) точную геометрическую юстировку двух волокон (по оси, радиусу, углу). Торцы волокон тонко полируют с тем, чтобы обеспечить по возможности качественную оптическую границу раздела с минимально возможными обратными отражениями (потери на обратные отражения). Для того чтобы не оставалось воздушного зазора между двумя волокнами, который может приводить к ослаблению сигнала из-за френелевских потерь на величину около 0.3 дБ и потерь на обратные отражения величиной 14 дБ, торцы волокон делают выпуклыми, полируются и прижимаются друг к другу с помощью пружины (так называемый физический контакт).

Широко распространённые соединители второго поколения основаны на принципе, при котором волокно встраивается в прецизионную керамическую втулку с внешним диаметром 2.5 мм. Волокно приклеивается в аксиальное отверстие втулки, после чего торцы подвергаются обработке. Две втулки центрируются относительно друг друга с помощью прецизионного керамического рукава. Затем внешние элементы соединителя прижимают контактирующие поверхности, и соединитель вставляется через замковое соединение в соответствующий адаптор.

Это поколение соединителей включает в себя следующие типы: ST (штыковое соединение), FC, DIN-LSA (винтовая фиксация), SC (возвратно-поступательный неразрезной замок, представленный на **Рис. 4.28**), E200 и двухпозиционные соединители ESCON и FDDI-PMD (без винта и защёлкивающимися крючками).



**Рис. 4.28.** Соединитель типа SC.

Третье поколение соединителей основано на том же принципе, но диаметр центральных компонентов (втулки и рукава) уменьшен до 1.25 мм. Соответственно, это позволяет уменьшить габариты корпуса. Данное поколение соединителей включает в себя такие типы, как LC и MU (**Рис. 4.29**).



Рис. 4.29. Соединитель типа LC.

Потери на ввод в этих втулочных керамических соединителях варьируются от значения 0.5 дБ и ниже вплоть до 0.05 дБ в зависимости от прецизионности типа волокна. Потери на обратное отражение могут составлять менее 50 дБ.

Четвёртое поколение представляет собой группу многоволоконных соединителей. Наиболее популярный принцип так называемых МТ-разъёмов заключается в расположении волокон в прямоугольной втулке с ячейками сетки размером 250 мкм. Два торца разъёмов ориентируются друг относительно друга с помощью направляющих иголок или отверстий, сформированных по сторонам втулок. Используя этот принцип, был разработан целый ряд соединителей: МРО (возвратно-поступательный разъём для 12 волокон), SMC (Рис. 4.30, сеточная ориентация на 12 волокон), МТ-RJ (малогабаритный разъём на 4 волокна, аналогичный электрическому разъёму RJ-45).



Рис. 4.30. Соединитель типа SMC на 12 волокон.

Потери на ввод в этих разъёмах также составляют менее 0.5 дБ на одно волокно.

#### 4.4.5. Оптические разъёмы для пластиковых волокон

Разъём представляет собой направляющий канал, диаметр которого соответствует поперечному сечению световода. Волокно просто вводят в этот направляющий канал и фиксируют с помощью капельки клея.

Большой диаметр оболочки пластикового волокна (1 мм) накладывает значительно меньшие требования на геометрические допуски оптических соединительных элементов. Излучающие диоды и фотоприёмники SFH довольно дешёвы, а винтовые соединители позволяют легко подстыковывать и отстыковывать волокно. Для оптического

соединения надо просто ввести волокно в отверстие до ограничителя и зафиксировать винтовым зажимом. При этом нет необходимости удалять защитную оболочку пластикового волокна.

На Рис. 4.31 приведена конструкция диодов типа SFH, а на Рис. 4.32 показана конструкция компонентов с винтовой фиксацией.

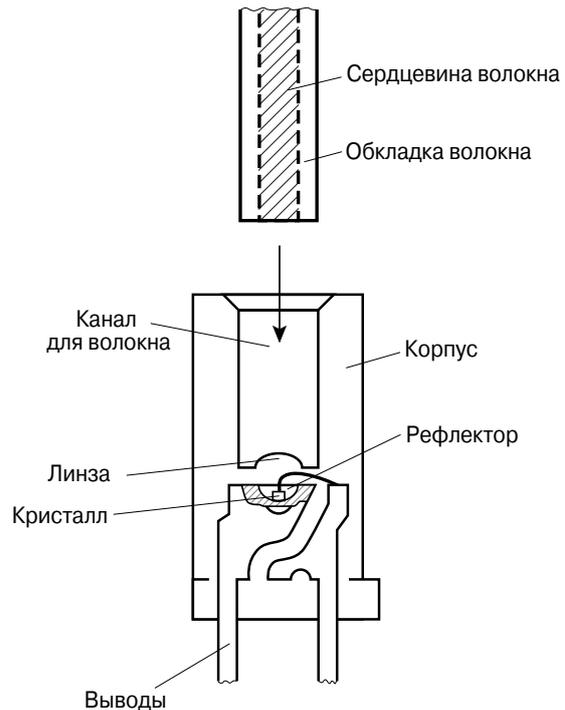


Рис. 4.31. Диоды для передачи и приёма данных через пластмассовые световоды.

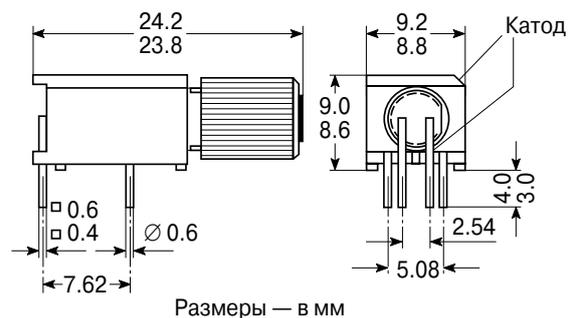


Рис. 4.32. Оптические световоды с винтовым креплением.

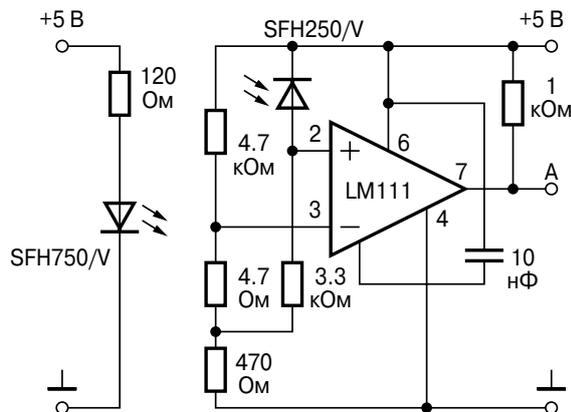
#### 4.4.6. Типичные применения пластиковых волокон

Благодаря своим преимуществам пластиковые оптические волноводные волокна (Plastic Optical Fiber — POF) всё более широко используются в замкнутых и разомк-

нутых промышленных системах управления и контроля.

Ниже приводятся всего лишь несколько примеров.

В тех случаях, когда речь идёт об экстремально высоких напряжениях, становится невозможным добиться электрической изоляции с использованием корпусных оптронов. Эту проблему решает использование пластиковых волокон. На **Рис. 4.33** показана линия связи, обеспечивающая передачу данных на расстояние более 20 м со скоростью 1 Мбод.



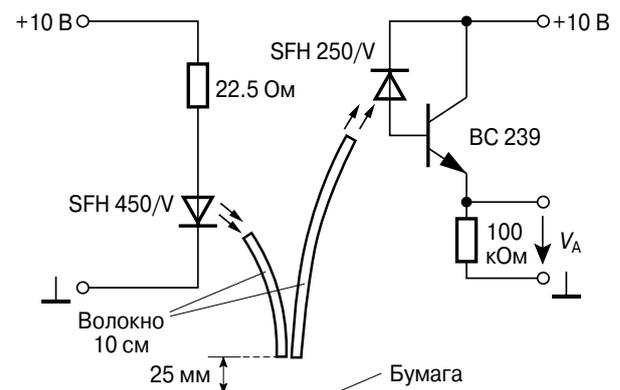
**Рис. 4.33.** Оптическая передача со скоростью 1 Мбод на расстояния до 20 м.

Помимо использования в качестве элементов оптических дисплеев, пластиковые оптические волокна могут применяться в качестве датчиков. Зависимость их характеристик от температуры и изгиба приводит к изменению параметров пропускаемого излучения. Эти эффекты могут быть использованы в измерительной технике. Благодаря конфигурации с разделёнными волокнами, можно разработать различные типы волоконно-оптических световых барьеров (гибридных и работающих на отражённом излучении). Например, такой подход обеспечивает возможность определения направления движения объектов в зоне измерения при одновременном сохранении гальванической развязки между зонами измерения и анализа.

Открытые торцы волокон могут отстоять друг от друга на расстояние вплоть до 5 мм. В принтере, как правило, необходимо несколько световых барьеров. Благодаря использованию пластиковых волокон оказывается возможным компактно установить электронику в одном месте без необходи-

мости подводить электрические соединения ко всем световым барьерам. Это более надёжно с эксплуатационной точки зрения, более экономично и делает систему менее чувствительной к интерференционным эффектам: характеристики оптической развязки лучше и к тому же данный подход обеспечивает большую гибкость при конструировании.

Пример барьера на принципе отражённого света приведён на **Рис. 4.34**.



**Рис. 4.34.** Световой барьер на принципе отражения.

Типичные уровни ослабления в промышленных пластиковых волокнах различной длины и для различных длин волн:

- 660 ± 15 нм:  
при длине 1 м — 0.3 дБ/м;  
при длине 20 м — 0.25 дБ/м;  
при длине 50 м — 0.2 дБ/м.
- 950 ± 15 нм:  
при длине 1 м — 4 дБ/м.

#### 4.4.7. Использование технологий оптической передачи данных по пластиковым волокнам в транспортных средствах

Первые попытки использовать системы оптической связи по пластиковым волокнам в транспортных средствах были сделаны около 10 лет назад.

Однако из-за малой скорости передачи по шине данных (например, CAN) для различных систем управления в транспортных средствах, использование оптической связи оказалось неэкономичным.

Вследствие всё более широкого применения мультимедийных устройств, а также предоставления новых коммуникационных услуг, объём обрабатываемых данных вырос

настолько, что оптическая связь стала абсолютно необходимой.

Одновременно с этим стало технически возможным встраивание пластикового волокна в фурнитуру обычного кабеля. На первоначальном этапе исследовались различные конфигурации (кольцевая, в виде двух колец и в виде звезды). Применительно к мультимедийным средствам (MOST) предпочтение было отдано кольцевой конфигурации, в то время как для системы безопасности (byteflight) предпочтительной оказалась конфигурация звезды.

Для реализации оптической связи необходим диод-передатчик с драйвером, обеспечивающим необходимый ток. Использование в транспортных средствах обычных крупногабаритных СИД на длину волны 650 нм оправдало себя. Они надёжны, имеют довольно высокое быстродействие и обладают достаточной температурной стабильностью. В будущем возможно возникнет потребность в системах с большей длиной линии связи, что потребует использования передатчиков зелёного цвета свечения. Как всегда, особую проблему представляет широкий температурный диапазон устойчивости приборов, предназначенных для работы в транспортных средствах.

При конструировании приёмника использовался фотодиод на основе кремния в сочетании с маломощным трансимпедансным усилителем (предусилителем). Далее по схеме следует другой усилитель, усиливающий сигнал до требуемого логического уровня. Применительно к системам с малой скоростью передачи, предусилитель и основной усилитель удалось успешно интегрировать в одной ИС. Ведётся постоянная работа с тем, чтобы сделать то же самое и для систем с большей скоростью передачи (вплоть до 500 Мбит/с). Следующий шаг заключается в интеграции фотодиода в одном кристалле с усилителем. Это позволит уменьшить габариты компонентов и, прежде всего, добиться меньшей чувствительности к интерференционным эффектам.

#### Конструкция трансиверов типа MOST

Отдельные компоненты, такие как фотодиоды и СИД, вместе с конденсаторами и ИС монтируются на обработанную и очищенную металлическую рамку (выводную рамку). Электрические контакты между

этим компонентами формируют с использованием золотой проволоки. Корпус прибора должен обладать двумя важными характеристиками: помимо удовлетворения механическим требованиям, он должен обладать наилучшими оптическими свойствами в диапазоне температур  $-40...+85^{\circ}\text{C}$ .

С этой целью при корпусировании используется технология литья, хорошо зарекомендовавшая себя при изготовлении миллионов СИД и обеспечивающая изготовление компонентов, пригодных для автомобильного применения. Компоненты отливаются в небольшой форме при закрытом оптическом окне (Рис. 4.35).

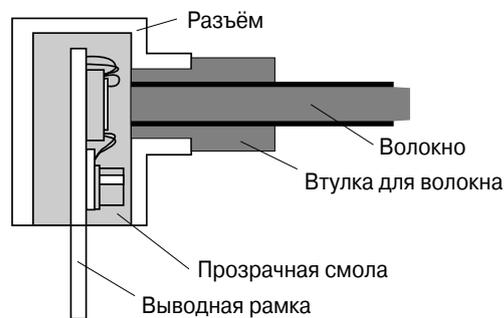


Рис. 4.35. Полостной интерфейс (CAI).

После отливки окно вскрывается, при этом образуется полость, в которую вставляется оптический разъем. Поэтому такая конструкция называется CAI (Cavity As Interface — полость как интерфейс).

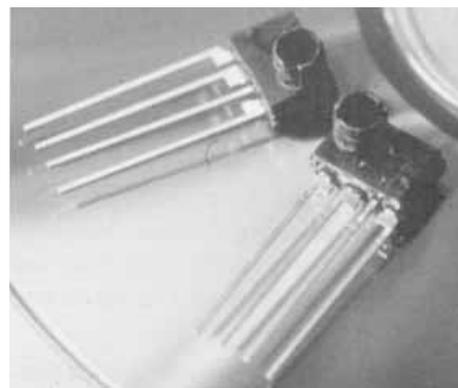


Рис. 4.36. Передатчик (слева) и приёмник (справа) MOST.

На Рис. 4.36 показан законченный прибор (слева MOST-передатчик, а справа MOST-приёмник). На Рис. 4.37 и Рис. 4.38 показан фронтальный вид изготовленного MOST после вскрытия, чтобы можно было

увидеть выводную рамку. На рисунках видны MOST-передатчик в виде СИД с драйверной ИС, а также приёмник в виде фотодиода, ИС усилителя и конденсаторного модуля.

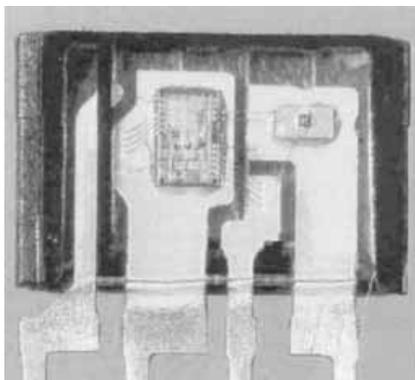


Рис. 4.37. Передатчик MOST и СИД.

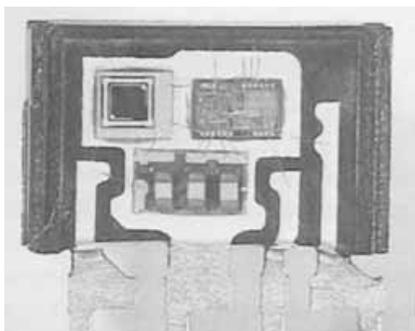


Рис. 4.38. Приёмник и фотодиод.

В дальнейшем эти компоненты встраиваются в корпус соединителя, обеспечивающего необходимую оптическую и электрическую экранировку.

### Трансивер *Byteflight*

В трансивере *Byteflight* технология CAI также используется как основа формирования компонентов, что обеспечивает двунаправленное функционирование при отсутствии больших потерь на рассеяние в соединителе.

В принципе при данном подходе используется преимущество большого диаметра сердцевины пластикового волокна, составляющего примерно 1 мм. Фотодиод с большой площадью поверхности на конце линии связи преобразует весь падающий свет в ток.

Излучающие диоды передатчика по размерам значительно меньше, что позволяет вводить сжатый световой пучок в волокно без существенного влияния на фотоприёмную секцию.

В конфигурации *Byteflight* прогрессивная технология «кристалл на кристалле» обеспечивает возможность размещения сравнительно малого кристалла СИД непосредственно на фотодиоде, что позволяет подстыковать передатчик без потерь в мощности излучения. Площадь затеняемой области фотодиода приводит к потерям порядка 1 дБ по сравнению с полностью освещаемым фотодиодом. На Рис. 4.39 показан законченный прибор *Byteflight* в конфигурации CAI, а на Рис. 4.40 — внутренний вид прибора с ИС трансивера, которая будет иметь защитное оптическое покрытие для устранения интерференционных эффектов от рассеянного света.

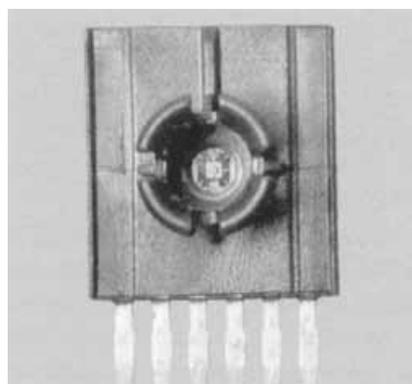


Рис. 4.39. Вид законченного прибора.

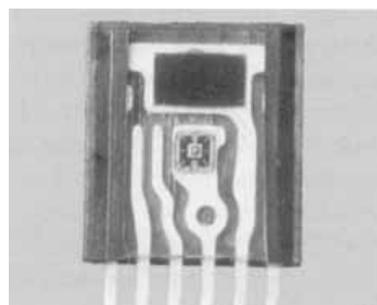


Рис. 4.40. Внутренний вид прибора с ИС трансивера.

Во время работы передатчика часть излучения попадает на фотодиод. Поскольку мощность этого излучения намного превышает минимальный уровень принимаемого излучения, в таком виде прибор не может одновременно передавать и получать сигналы, что было бы необходимо в случае дуплексного режима. Это обстоятельство учтено в *Byteflight*: система предназначена для работы в полудуплексном режиме.

### Бюджет мощности

Для того чтобы обеспечить стабильное и надёжное функционирование системы, очень важным является расчёт бюджета мощности. При этом должны учитываться как уровень мощности, необходимый для передачи, так и минимальная мощность принимаемого сигнала. При расчётах необходимо учитывать следующие факторы:

- мощность излучения в волокне даётся для оптимально подсоединённого волокна, например при длине 30 см и 10 мА;
- в расчёт принимаются возможные дополнительные потери после первого метра POF по сравнению с нормальным ослаблением в волокне;
- величина тока драйвера даётся с определённым допуском, что влияет на мощность излучения;
- вследствие температурного коэффициента излучения, температура влияет на эффективную мощность распространяющегося излучения, что требует учёта минимальной и максимальной величины этого параметра;
- потери в интерфейсе передатчика;
- длина волокон определяет степень ослабления излучения, что, в свою очередь, зависит от длины волны излучения;
- разъём-расщепитель или заменённый соединитель приводит к дополнительным потерям;
- потери на прокладку кабеля и старение волокна.

Минимальная и максимальная величина переносимой мощности, а также минимальный и максимальный уровни затухания в кабеле задают максимальную и минимальную величину принимаемой мощности.

Фототок на входе усилителя может быть определён после учёта потерь в интерфейсе фотоприёмника и чувствительности фотодиода. Как правило, должен быть предусмотрен резервный запас на переменные факторы, величина которого может составлять вплоть до 20 дБ (100 раз).

Не вдаваясь в детали, приведём результат по мощностным параметрам: типичные величины при комнатной температуре, минимальные значения во всём температурном диапазоне и эксплуатационный ресурс (см. Табл. 4.5).

Таблица 4.5. Типичные рабочие характеристики

Параметр	Значение	Единица измерения
Скорость передачи	45 (max)	Мбит/с
Мощность излучения	-6 (typ), -10 (min)	дБм
Принимаемая мощность	-26 (typ), -24 (min)	дБм
Допустимое затухание	20 (typ), 14 (min)	дБ

### Интерфейс IEEE 1394

IEEE 1394 представляет собой гибкий, простой и недорогой интерфейс, разработанный для связи мира потребительской электроники с персональными компьютерами. Благодаря стандарту HAVi (Home Audio Video interoperability) практически все лидирующие производители аппаратуры для досуга и развлечений пришли к единому набору инструкций, что обеспечивает взаимную совместную работу устройств различных производителей.

Версия для систем на кабелях с медной жилой продолжает использоваться и сейчас (S400 со скоростью передачи 500 Мбит/с).

Стандарт IEEE 1394 определяет среду, топологию и протокол. Его преимущества заключаются в следующем:

- разъёмное соединение и отсоединение с нагревом в процессе функционирования;
- масштабирование скорости передачи — в настоящее время доступны скорости передачи 100, 200 и 400 Мбит/с, при этом оптимальная скорость выбирается автоматически;
- гибкость — системы могут быть построены в желаемой конфигурации, при этом кольцевой охват не требуется;
- высокая гарантированная ширина полосы — IEEE 1394 устанавливает гарантированные критические данные.

Сравнительно высокие скорости передачи требуют использования технологии оптической связи на большие расстояния.

В настоящее время выпускаются трансиверы для организации интерфейса между MOST на 45 Мбод и S100 (125 Мбод).

С использованием мощных ИД (RCLED) и новых приёмников с повышенной степенью интеграции легко построить систему связи с длиной линии 100 м на основе стандартных POF. Во всём мире проводятся разработки трансиверов типа S200

(250 Мбод) и S400. В случае S400 традиционные пластиковые волокна уже исчерпывают свои предельные возможности, в особенности, когда существует потребность в большей длине линии связи. Здесь следует отметить, что новые волокна, представленные на многочисленных конференциях, должны быть доведены до стадии массового производства.

#### 4.5. IrDA — передача данных с использованием инфракрасного излучения

Использование инфракрасного (ИК) излучения сегодня стало практически обычным делом, в частности, для дистанционного управления телевизором, видеоманитофоном, HiFi-системами и другими электронными устройствами. Как правило, мы пользуемся несколькими системами дистанционного управления, например для автоматического управления дверями гаража или замком в дверях автомобиля.

Большое число таких систем дистанционного управления содержат ИК-компоненты, производимые компанией Infineon. Однако в будущем использование инфракрасного излучения для передачи данных не будет ограничиваться лишь бытовой электроникой, а во всё большей степени станет охватывать офисную технику и мобильную связь: системы передачи данных для ПК, КПК, DVD-плееры, принтеры, мобильные телефоны и многие другие приборы, так как такие системы связи надёжны, безопасны и к тому же дешёвы. Другим аргументом в пользу ИК-излучения является то, что, в отличие от ВЧ связи, его использование никоим образом не ограничено условиями, в которых происходит передача данных. Благодаря единому стандарту, который действует во всём мире, у потребителя нет необходимости заботиться ни о специальных кабельных адапторах, ни о проблеме интерфейса.

Для этих новых рынков будущего подразделение оптоэлектроники компании Infineon разработало ряд ИК-трансиверов, специально адаптированных к требованиям передачи данных (IrDT). Эти IrDT-приборы передают данные со скоростью 2.4 Кбит/с...4 Мбит/с и совместимы со спецификациями так называемого физического уровня стандарта IrDA.

##### 4.5.1. IrDA — один стандарт для всех приборов

Ассоциация IrDA была учреждена в 1993 году с целью разработки стандартов для универсального обмена данными с использованием ИК-излучения (Рис. 4.41). С тех пор более 140 международных компаний зарегистрировались в ней в качестве официальных членов. Среди них и компания Infineon, поддерживающая эту ассоциацию. Тем временем существуют различные спецификации как для физического уровня, так и для уровня программного обеспечения, которые разрешают неограниченный обмен данными между приборами. Они оснащены соответствующими интерфейсами. В настоящее время IrDA является самым большим и наиболее эффективным в мире консорциумом для разработки ИК-систем и технологий. В качестве члена IrDA компания Infineon имеет возможность активно участвовать в разработке будущей стратегии.



Рис. 4.41. Логотип IrDA.

*КПК обмениваются данными с мобильными телефонами, ПК или принтерами*

Диапазон возможных применений ИК-трансиверов очень широк. Без сомнения, одним из наиболее полезных применений является обмен данными между КПК и периферийными устройствами. Можно ожидать, что все новые КПК будут оснащены интерфейсами IrDA. Владельцы КПК смогут передавать данные со своих устройств настольному ПК или принтеру без использования каких-либо проводных соединений между приборами. Уже сегодня многие пользователи PDA («персональных цифровых помощников») пользуются данной опцией, когда периферийные устройства оснащены ИК-интерфейсом. Другими вида-

ми продукции, которые могли бы получить большие преимущества от использования этой технологии, являются мобильные телефоны. Передача данных при помощи ИК-излучения между мобильными телефонами и КПК позволит пользователям во время путешествий, например, проверять электронную почту или общаться с бизнес-партнёрами по электронной почте. Крупный производитель цифровых камер анонсировал своё намерение оснащать выпускаемую им продукцию совместимыми IrDA-интерфейсами.

*IrDA обладает преимуществами даже при разработке инструментов и предоставлении различных услуг*

Системы IrDA имеют огромные преимущества не только в бытовой технике, но и в промышленной электронике. Во всё большем объёме на рынок выходят высокофункциональные PDA для промышленных применений. Подобно отвёртке и плоскогубцам, они становятся всё более незаменимым стандартным инструментом в мастерском ящике технического специалиста сервисной службы. Системы IrDA используются также и в ряде других насущных применений, таких как диагностические приборы для двигателей автомобилей или приборы ввода данных для дантистов, медсестёр, учителей, обслуживающего персонала и т.д.

В случае применений, требующих высокой безопасности, таких как «электронный кошелёк», благодаря инфракрасному излучению невидимым образом изменяется, например, владение денежными средствами. Компьютерные игры, которые уже являются фаворитами, в будущем не будут нуждаться в проводах для подключения к приборам. В принципе, любой прибор, которому сегодня требуются провода для передачи данных управления, является потенциальным кандидатом для переноса данных с помощью ИК-излучения. IrDA-модуль, который может передавать и принимать данные, является ключевым компонентом, готовым для использования в таких продвинутых системах.

Для дистанционного управления радио- и телевизионными приёмниками знакомый ИК-излучатель используется в качестве передатчика, излучение которого модулируется ИС. В этом случае данные передаются только в одну сторону.

#### 4.5.2. Полный IrDA-стандарт

При соответствующем программном обеспечении сигналы будут полностью удовлетворять требованиям стандарта IrDA. Имея размеры  $13 \times 6 \times 6$  мм, IrDA-модуль может быть размещён практически в любом корпусе, что не всегда возможно при использовании альтернативных схем на дискретных компонентах.

Для устройств, где пространство для установки чрезвычайно мало, выпускается модуль IRV 6000 (Рис. 4.42, левый прибор) с размерами всего  $9.1 \times 4.1 \times 4.3$  мм, что делает его идеально пригодным для применения в PDA или мобильных телефонах. Его технические данные в значительной степени сравнимы с параметрами модулей IRM 3001/3105 (Рис. 4.42, правый прибор) и, кроме того, впервые становится возможной двунаправленная связь с использованием одного компонента. Это позволяет передавать и принимать сигналы в полудуплексном режиме на короткие расстояния (вплоть до 1 м). При использовании даже на очень небольшом расстоянии не происходит перемодуляции. И поскольку электронная схема модуляции уже встроена в модуль, отпадает необходимость подключения внешних компонентов.

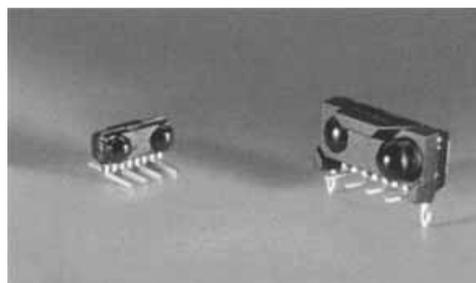


Рис. 4.42. Модули типа IRM 6000 и IRM 3105.

Все типы устройств могут быть реализованы в однорядной или DIL-конфигурации, которая более пригодна для SMT-сборок. По требованию выпускается серия IRM 300X с набором боковых направляющих штырей для автоматического встраивания.

В процессе разработки находятся модули IRM 3401 и 3405 на более высокие скорости передачи вплоть до 4 Мбит/с. Эти модули также полностью совместимы с IrDA.

Пользователям, желающим получить полностью готовое решение, предлагается ИС кодера/декодера IRM 7000, значитель-

но упрощающая подключение к интерфейсу асинхронного приёмопередатчика (UART).

Подразделение оптоэлектроники компании ориентировано и на удовлетворение специальных требований заказчика — на тот случай, когда невозможно найти оптимальное решение с использованием стандартных компонентов.

### *Информация в Интернете*

Справочные данные и другие рекомендации по применению можно найти в Интернете на сайте: <http://www.infineon.com>, а информация об организации IrDA находится по адресу: <http://www.irda.org>.