

## СВЕТОДИОДЫ

**Светодиод** - полупроводниковый излучающий прибор с одним или несколькими электрическими переходами, преобразующий электрическую энергию в энергию некогерентного светового (электромагнитного) излучения. Используются светодиоды в оптических линиях связи, модуляторах, индикаторных устройствах, в оптопарах и т.д.

В основе принципа действия полупроводниковых излучающих приборов лежит явление электролюминесценции<sup>1</sup>, связанное с самопроизвольной излучательной рекомбинацией носителей заряда, инжектируемых через электронно-дырочный переход. Излучение обусловлено неравновесными носителями и сосредоточено в p-n переходе и прилегающих к нему областях.

Одно из главных требований, предъявляемых к индикаторным светодиодам, излучение света в видимом участке спектра. Поскольку в светодиодах основную роль играет межзонная излучательная рекомбинация, необходимая ширина запрещенной зоны полупроводников, вычисленная для энергии фотонов видимого диапазона, должна быть  $1,8 \text{ эВ} < \Delta E_z = h\nu < 3,2 \text{ эВ}$ . Из-за относительно большой ширины запрещенной зоны исходного полупроводника ток рекомбинации через p-n переход оказывается большим по сравнению с током инжекции, особенно при малых прямых напряжениях, т.е. процесс рекомбинации в этом случае реализуется в основном в p-n переходе.

В качестве основных полупроводниковых материалов для светодиодов применяют арсенид галлия (GaAs), фосфид галлия (GaP), нитрид галлия (GaN), карбид кремния (SiC), трехкомпонентный твердый раствор фосфида и арсенида галлия ( $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ), где  $0 \leq x \leq 1$ , и ряд других двойных и многокомпонентных полупроводниковых соединений. Использование этих материалов позволяет создать светодиоды, работающие в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра. КПД рассматриваемых приборов в основном зависит от внутреннего квантового выхода  $\eta_f$ . Вероятность излучательной рекомбинации, определяющая внутренний квантовый выход, непосредственно связана с видом переходов в используемом полупроводнике. Внутренний квантовый выход в полупроводниках с прямыми переходами во много раз больше, чем с непрямыми.

---

<sup>1</sup> **Электролюминесценция** – излучение света телами под действием электрического поля - является частным случаем люминесценции. Люминесценция – это явление излучения света с интенсивностью, превышающей интенсивность теплового излучения тела при данной температуре, и длительностью, значительно большей периода световых волн.

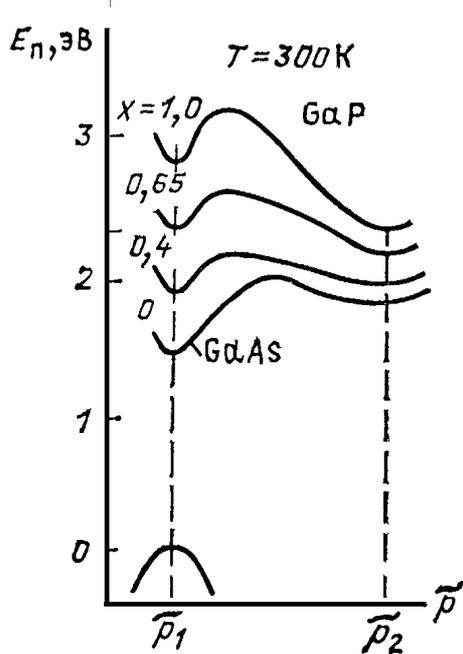


Рис.1

**Светодиоды на основе фосфида галлия.** На Рис.1 (кривая  $x=1,0$ ) представлена энергетическая диаграмма фосфида галлия, где минимумы энергии дна зоны проводимости при значении импульса  $\tilde{p} = \tilde{p}_1$  соответствуют прямым переходам (ширина запрещенной зоны 2,8эВ), а при  $\tilde{p} = \tilde{p}_2$  - непрямым переходам ( $\Delta E_z=2,26$  эВ). Следовательно, чистый фосфид галлия GaP относится к непрямозонным полупроводникам. Его квантовый выход незначителен, однако он широко используется для изготовления светодиодов, так как обеспечивает излучение в видимой области спектра, что особенно важно в индикаторных устройствах. Для увеличения эффек-

тивности излучательных процессов в непрямозонных полупроводниках внедрением примесей создают рекомбинационные центры - ловушки<sup>2</sup>. При введении разных элементов образуются два типа ловушек - донорного<sup>3</sup> и акцепторного<sup>4</sup> типов.

<sup>2</sup> **Ловушки** – это атомы примесей, способные захватывать электроны.

<sup>3</sup> **Донорные ловушки** – образуются внедрением кислорода и серы. Донорные уровни располагаются ниже дна зоны проводимости: для кислорода ( $E_p - 0,896$ эВ), для серы ( $E_p - 0,104$ эВ).

<sup>4</sup> **Акцепторные ловушки** – образуются при введении кадмия, цинка, меди, азота, энергии которых относительно потолка валентной зоны соответственно равны: ( $E_v + 0,097$ )эВ; ( $E_v + 0,064$ )эВ; ( $E_v + 0,68$ )эВ; ( $E_v + 0,008$ )эВ.

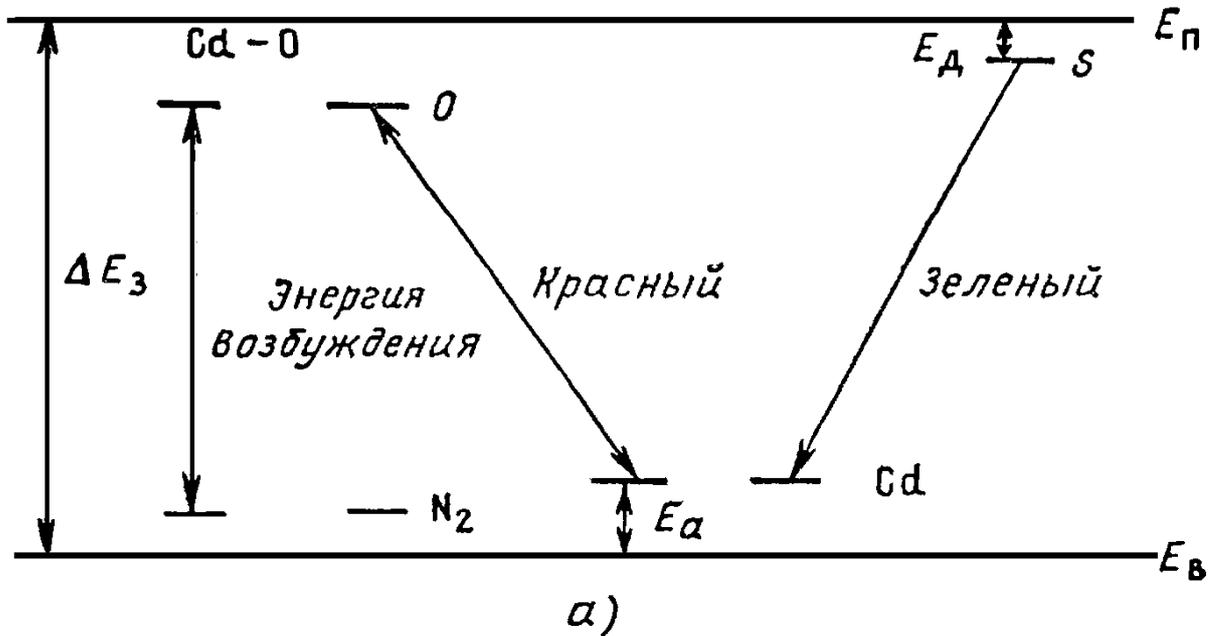


Рис.2

Излучательные переходы между донорными и акцепторными ловушками позволяют получить генерацию света на различных длинах волн (Рис.2, 3). При внедрении цинка, кадмия и кислорода реализуется красное излучение; кадмия, серы и азота - зеленое (см. Рис.2). Физические явления, происходящие в фосфиде галлия при наличии примесей, можно проиллюстрировать на примере легирования азотом. Азот замещает атомы фосфора в узлах кристаллической решетки. Азот и фосфор являются элементами одной группы периодической системы и имеют одинаковую внешнюю, но различную внутреннюю электронные структуры. Различие в строении приводит к возникновению энергетического уровня ловушки вблизи зоны проводимости. Инжектированные из n- в p-область светодиода электроны попадают сначала на уровни ловушек, которые затем захватывают дырку из валентной зоны. В результате фотоны рождаются с энергией, примерно равной разности между энергией запрещенной зоны и энергией связи атома ловушки.

Зависимость внутреннего квантового выхода  $\eta_{\text{кв.отн}}$  (в относительных единицах) от энергии излучаемых фотонов представлена на Рис.3. Полный КПД светодиода, излучающего зеленый свет, приблизительно равен 0.1%, а излучающего красный - 3%. Хотя КПД светодиодов с зеленым свечением мал, они применяются в индикаторной технике, поскольку чувствительность глаза к зеленому свету в 30 раз выше, чем к красному.

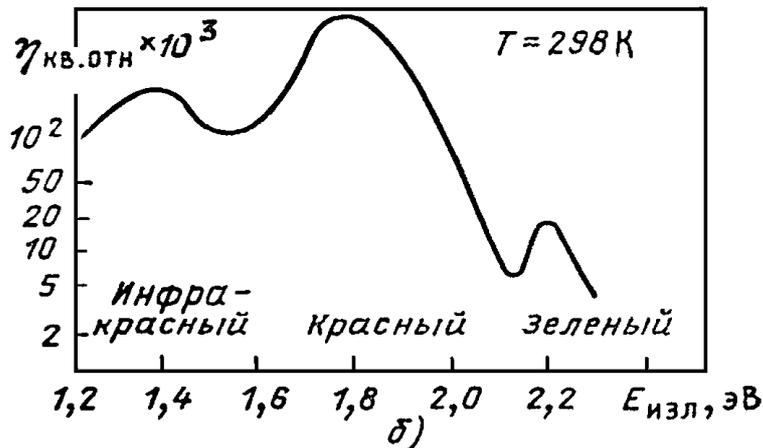


Рис.3

**Светодиоды на основе арсенида галлия.** При увеличении фосфора в решетке арсенида галлия изменяется энергетическая диаграмма полупроводника (см. Рис.1). При  $x=0$  энергетическая диаграмма (кривая 1) соответствует чистому арсениду галлия, а при  $x=1$  чистому фосфиду галлия. При возрастании  $x$  от 0 до 0,45 ширина запрещенной зоны соединения  $\Delta E_z$  увеличивается с 1,42 эВ до 1,98 эВ (Рис.4). В светодиодах на основе таких материалов преобладают прямые переходы (кривая 1 на Рис.4). Дальнейшее увеличение содержания фосфора приводит к непрямым переходам (кривая 2 на Рис.4), что вызывает уменьшение вероятности межзонной излучательной рекомбинации и, соответственно, внутреннего квантового выхода (кривая 1 на Рис.5). Для увеличения эффективности излучательной рекомбинации в фосфид арсенида галлия, как и в фосфид галлия, вводят примеси. На Рис.5 проиллюстрировано влияние азота на величину внешней квантовой эффективности  $\eta_{\phi}$ , представляющей собой отношение количества фотонов, излученных светодиодом, к количеству носителей заряда, протекающих через его электрический переход.

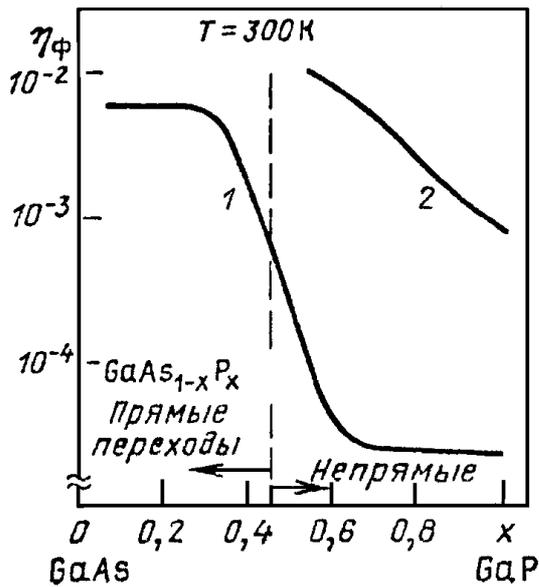


Рис.5

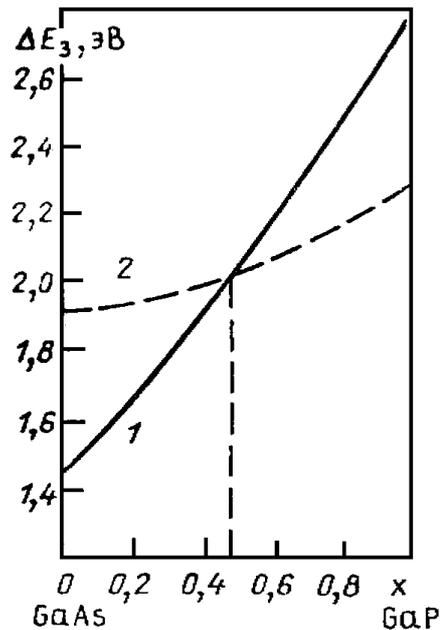


Рис.4

### **Параметры светодиодов**

К основным параметрам светодиодов относятся:

**Яркость В** ( $\text{кд/м}^2$ ) характеризует свечение светодиода в избранном направлении. Для светодиодов яркость составляет несколько сот  $\text{кд/м}^2$ .

**Минимальное прямое рабочее, или пороговое, напряжение Упор** светодиода определяется энергией излучаемых фотонов; например, для зеленого света энергия фотона - 2,2 эВ, а пороговое напряжение - 2,4 эВ.

**Максимальные рабочее напряжение** ограничивается допустимой мощностью рассеяния светодиода. Оно в основном зависит от контактной разности потенциалов р-п перехода и сопротивления базы. Указанные напряжения определяют и соответствующие токи светодиода.

**Постоянные времени нарастания и спада импульса** излучения при импульсном возбуждении светодиодов характеризуют их инерционные свойства. Эти параметры измеряются между значениями яркости, составляющими 0,1 и 0,9 максимальной величины. Инерционность светодиодов определяется временем перезаряда емкости прибора. Для светодиодов значения постоянных времени составляют доли микросекунд.

**КПД** зависит от внутреннего квантового выхода и конструкции светодиодов. Потери энергии связаны с поглощением света в полупроводнике, контактах и элементах конструкции прибора.

И другие общеизвестные, такие как: мощность излучения, длительность волны излучаемого света или его цвет, наибольший прямой или импульсный ток, долговечность и др.

### Основные характеристики светодиодов

К ним относятся:

- **Яркостная характеристика** - это зависимость яркости  $V$  от тока через р-п переход. Вид яркостной характеристики зависит от структуры р-п перехода и области, в которой происходит преимущественная рекомбинация носителей

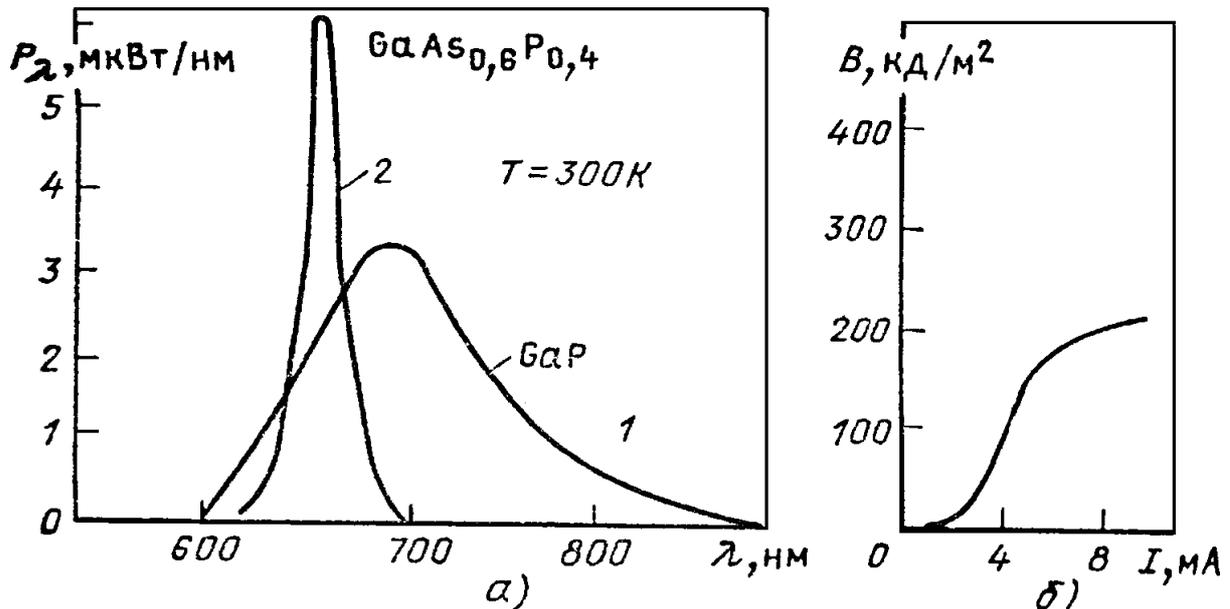


Рис.6

заряда. При малых токах и, соответственно, малых напряжениях излучение отсутствует. Излучение возникает при напряжениях, соответствующих энергии излучаемого фотона, приблизительно равной ширине запрещенной зоны, т.е. при  $U=U_{пор}$  (напряжению  $U_{пор}$  соответствует  $I_{пор}$  на (Рис.6.б). Рост напряжения (тока) увеличивает число рекомбинирующих с излучением носителей, и яркость возрастает. При больших токах начинает сильно проявляться безизлучательная рекомбинация из-за заполнения ловушек, в результате уменьшается квантовый выход и наклон характеристики к оси абсцисс становится меньше.

- **Спектральная характеристика** – это зависимость интенсивности светового потока (яркости или мощности, или силы света, или энергии) от длины волны. На (Рис.6.а) представлены спектральные характеристики, дающие зависимость относительной мощности от длины волны излучения, для светодиода из фосфида галлия (кривая 1) и фосфида арсенида галлия (кривая 2).

- **Вольт-амперная характеристика  $I=f(U)$**  – совпадает с ВАХ обычного диода.

**Конструктивное исполнение светодиодов** сильно влияет на величину внешнего квантового выхода, а, следовательно, и на КПД прибора. Из-за высокого коэффициента преломления исходного материала светодиодов большая часть света испытывает полное внутреннее отражение на границе раздела полупроводник-воздух. В результате из-за многократных переотражений от границ (Рис.7) происходит поглощение света в полупроводнике, и только малая часть энергии излучения выходит из светодиодов простейшей плоской конструкции.

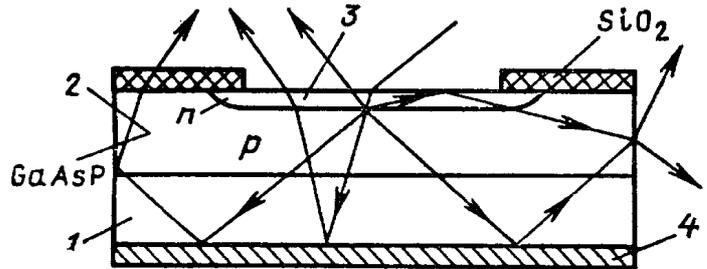


Рис.7

Светодиоды на основе фосфида арсенида галлия (см. Рис.8) получают наращиванием эпитаксиального слоя 2 на подложку из арсенида галлия 1. Излучаемый в области p-n перехода 3 свет падает на подложку 1 и частично поглощается, что приводит к дополнительным потерям энергии. С улучшением технологии эпитаксиальный слой 2 выращивают на прозрачной подложке из фосфида галлия с отражающим нижним покрытием. Это увеличивает выход полезного излучения. Внешний квантовый выход можно также увеличить за счет применения более сложных конструкций светодиодов.

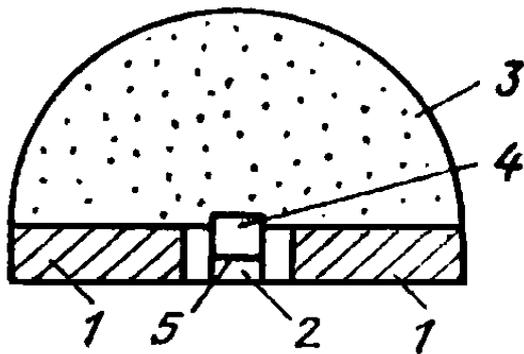


Рис.8

На рис 8 приведен пример устройства такого светодиода, у которого 3 n-база, выполненная в виде полусферического монокристалла полупроводника, 1 и 2 металлические контакты, 4 эмиттер. Для повышения КПД светодиодов применяют прозрачные полусферические покрытия из стекла и пластмасс с высоким показателем преломления, просветляющие (прозрачные для излучаемых волн) покрытия внешней поверхности прибора и т.д.

Для получения излучения различного цвета в индикаторах или индикаторных матрицах светодиоды могут иметь несколько переходов. Пример двойной диодной структуры, которая излучает красный или зеленый свет, либо тот и другой одновременно, изображен на Рис.9, где 1 и 3 - контакты к р- областям диода, генерирующим соответственно красный и зеленый свет; 2 - n- GaP подложка; и 4 и 6 - p-n переходы; 5 - общий контакт.

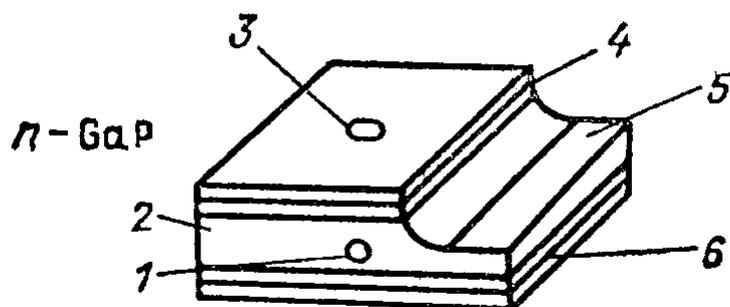


Рис.9

На практике используются также приборы на основе чистого арсенида галлия с излучением инфракрасного света ( $\lambda=900$  нм), нитрида галлия - голубого света и другие материалы, по своим характеристикам уступающие рассмотренным.

Высокая надежность, большой срок службы (долговечность), малые рабочие напряжения и потребляемые мощности, небольшие масса и габариты светодиодов обусловили их широкое применение в устройствах самого различного назначения.