

## ТЕМА 12

Не смещенный p-n переход. Прямосмещенный p-n переход. Механизм инжекции

Идеальный гомогенный p-n переход.

1. Основные понятия физики полупроводников. В литературе прочно утвердилось понятие о мелких донорных и акцепторных уровнях. Эти примесные центры создают локальные энергетические уровни. (Рис.12.1, b), удалённые соответственно от зоны проводимости и валентной зоны на расстояние порядка нескольких  $kT$  (при комнатной температуре,  $T=300K$ ). Эти центры обычно образуются при замещении атомов основного кристалла атомами вводимой примеси. Например, атом серы (элемент VI группы), замещая атом фосфора (элемент V группы) в решетке фосфида галлия, превращается в донор с мелким уровнем, поскольку у него одним валентным электроном больше, чем у фосфора. Когда же атом цинка (элемент II группы) замещает атом галлия (элемент III группы), образуется мелкий акцепторный уровень. Вносимые этими двумя типами примеси избыточные электроны или дырки (недостающие электроны) в большинстве своём при 300 K будут находиться в ионизированном состоянии. Это означает, что они не будут пребывать в связанном состоянии на своих примесных центрах, а перейдут соответственно в зону проводимости или валентную зону кристалла и при сколь угодно малом электрическом поле создадут электрический ток. Если концентрации доноров и акцепторов столь малы, что взаимодействием примесных уровней можно пренебречь, то вносимые ими электроны и дырки заполняют соответственно в зоне проводимости и валентной зоне лишь малую часть состояний. Концентрация последних в интервале энергий  $dE$  равна

$$\rho(E)dE = (1/4\pi^2)(2m^*/\hbar^2)^{3/2} E^{1/2}dE,$$

где  $\rho(E)$ -энергетическая плотность состояний,  $m^*$ -эффективная масса электрона или дырки, характеризующая нелинейность зависимости энергии  $E$  от волнового вектора  $k$ :

$$E = (\hbar^2 k^2) / 2m^*.$$

Эта зависимость входит в описание движения носителя. В обычных полупроводниках вблизи края зоны проводимости или валентной зоны имеет место вырождение, зонная структура сложна; эффективная масса  $m^*$  при этом представляет собой тензор.

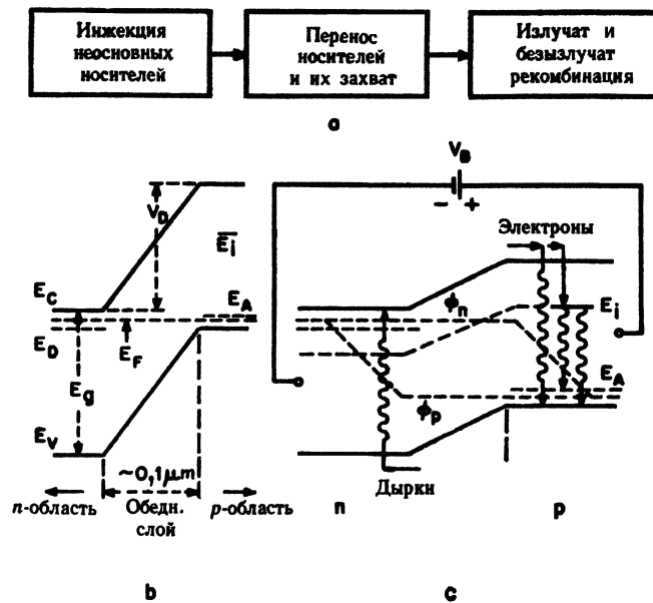


Рис.12.1. **а** - Схематическое разбиение элементарных актов возбуждения люминесценции в полупроводнике; **б** - схематическое изображение зонной диаграммы p-n перехода в условиях термодинамического равновесия (при нулевом смещении); **с** - схематическое изображение зонной диаграммы p-n перехода при прямом смещении (инжекция неосновных носителей).  $E_F$  - уровень Ферми,  $\Phi_n$  и  $\Phi_p$  - квазиуровни Ферми,  $E_i$  - примесные уровни, через которые идет излучательная рекомбинация.

Важным параметром является уровень Ферми  $E_F$ . Это энергетический уровень, вероятность заполнения которого электронами равна  $1/2$ . Для невзаимодействующих мелких доноров с концентрацией  $N_D \gg n_i$  ( $n_i$  - концентрация носителей в собственном материале) в отсутствие компенсирующих акцепторов уровень Ферми проходит примерно посередине между дном зоны проводимости  $E_c$  и донорным уровнем  $E_D$  с точностью до малого члена, содержащего  $kT \ln N_D / N_c$ .

В принципе можно пренебречь эффектами, вносимыми многодоллинностью дна зоны проводимости и рядом других эффектов, присущих полупроводникам с непрямыми переходами, тогда выражение для энергии ионизации возбужденных состояний водородоподобной модели примесного центра приобретет вид  $E = E_D / n^2$ , где  $n$  - целое число ( $n > 1$ ).

Диффузионные токи в p-n переходе. Существен тот факт, что в n-области полупроводника с избыточными мелкими донорами уровень  $E_F$  расположен вблизи  $E_c$ .

Аналогично в p-области полупроводника уровень Ферми близок к потолку валентной зоны  $E_v$  (Рис.12.1). Когда n- и p-области полупроводникового кристалла непосредственно примыкают друг к другу возникает состояние, иллюстрируемое Рис.12.1. Вначале электроны из n-области устремляются в p-область, а дырки из p-области в n-область; ток течет до тех пор, пока на пограничном слое не установится разность потенциалов, при которой общий ток равен нулю. Эта разность потенциалов создается

объёмным зарядом термически ионизированных доноров и акцепторов в слое полупроводника, примыкающего к границе раздела между n- и p-областями. Благодаря уходу основных носителей из каждой области в соседнюю носителей в этом слое остается значительно меньше, чем примесных центров, поэтому слой получил название обедненного. Термодинамическое рассмотрение показывает, что в равновесных условиях на p-n переходе устанавливается такая контактная разность потенциалов  $V_D$ , при которой положение уровня Ферми становится единым для обеих областей полупроводника.

Роль прямого смещения сводится в основном к экспоненциальному увеличению в n-области концентрации таких электронов, которые могут преодолеть барьер, вызванный контактной разностью потенциалов. При  $V=0$  этот ток уравнивает обратный ток неосновных носителей из n-области, а при прямом смещении  $V$  концентрация электронов, способных преодолеть барьер, пропорциональна  $\exp(eV/kT)$ .

Существует также туннельная инжекция в p-n переходе. Туннелирование – это явление, обусловленное просачиванием основных носителей через потенциальный барьер вследствие того, что волновая электронов вблизи слоя объёмного заряда имеет конечное значение и в n-, и в p-области (аналогично для дырок). Туннелирование существенно проявляется лишь при очень малых ( $\leq 0,01$  мкм) ширинах барьера и требует, чтобы на одном и том же энергетическом уровне с одной стороны имелись заполненные состояния с большой концентрацией, а с другой – незаполненные состояния с большой концентрацией. Оба этих условия выполняются в сильнолегированных p-n переходах при малых прямых смещениях.

Более подробно о механизме инжекционной электролюминесценции Вы можете посмотреть в книге А.Берг, П.Дин «Светодиоды» Москва, Мир, 1973 г., которая имеется в нашей библиотеке (621.38 Б 48)

Длина волны рекомбинационного излучения связана с шириной запрещенной зоны:

$$\lambda = ch/E_3 = 1238/E_3;$$

где,  $\lambda$  в нм,  $E_3$  в эВ.

Так как длинноволновый порог чувствительности глаза соответствует  $\lambda = 770$  нм, то минимальная ширина запрещенной зоны должна быть равна 1,6 эВ, если взять 700 нм, то 1,7 эВ, чтобы иметь хоть какую-то световую отдачу. Поэтому такие материалы как германий и кремний с шириной запрещенных зон (германий-0,7 эВ, кремний - 1,1 эВ), не могут быть применены для создания светодиодов, т.к. их излучение будет лежать в инфракрасной области спектра.

Для создания светодиодов применяется раствор тройного соединения 111-V групп периодической системы. Например,  $GaAs_{1-x}P_x$ . Изменяя значение  $x$  можно регулировать ширину запрещенной зоны  $E_3$ , и получать материалы с разным цветом свечения. При  $x=0$ ,  $E_3=1,8$  эВ, получают полупроводник с красным цветом свечения  $\lambda=687$  нм. При  $x=1$   $GaAs_{1-x}P_x$  превращается в фосфит

галлия. При легировании азотом в нем возникает зеленая люминесценция, при легировании Zn, O - красная.

К арсениду фосфиду галлия близок по свойствам арсенид алюминия галлия.  $Al_xGa_{1-x}As$ .

Меняя соотношения между алюминием и галлием можно получать источники с максимумом в диапазоне 1,4-2,4 эВ, 884-516 нм. Из этого материала изготавливают инжекционные лазеры, работающие при комнатной температуре. Наибольшее распространение получили карбид кремния ( $E_g=2,3-4,1$  эВ), фосфид и арсенид галлия. Но есть и другие материалы.

Таблица 12.1-Материалы для изготовления полупроводников.

Светодиоды	Параметры главных максимумов излучения			Средний коэффициент видности $V_{cp}, I_m/W$	Характеристики цветов	
	Длина волны в максимуме спектра, нм	Ширина на уровне половинной интенсивности, нм	Средняя энергия фотонов, эВ		Доминирующая длина волны (цветовая тональность), нм	Насыщенность (чистота цвета), %
GaP, легированный Zn, O (красный)	698	93	1,76	20,7	632	100,0
GaP, легированный Zn, O (только красная полоса)	698	93	1,76	19,8	637	100,0
GaP, легированный N (зеленый)	565	30		392,0	574	99,3
GaP, легированный N (только зеленая полоса)	565	30	2,18	618,0	570	99,6
GaP, диффузия Zn (зеленый)	553	23		284,0	563	98,0
GaP, диффузия Zn (только зеленая полоса)	553	23	2,24	647,0	556	98,4
$GaAs_{1-x}P_x$ (красный)	640	28	1,91	97,9	534	100,0
$Ga_{1-x}Al_xAs$ (красный)	688	28	1,78	7,1	679	100,0
SiC (желтый)	590	155	1,97	293,0	582	98,3

Процесс изготовления инжекционных источников света состоит из следующих основных этапов:

1. Изготовление пластин из полупроводника.
2. Создание p-n переходов.
3. Создание низкоомных контактов
4. Резка пластин на кристаллы, из которых изготавливают источники света.
5. Присоединение вводов.
6. Помещение собранного прибора в корпус.

После контроля качества, из отобранного полупроводникового материала, изготавливают пластины толщиной около 0,3 мм. В том случае, если материал получен в форме слитков, например, арсенид галлия, его разрезают алмазными дисками, а затем подшлифовывают для удаления поврежденного слоя. Если кристаллы имеют небольшие размеры, то их сразу шлифуют с обеих сторон. Толщину пластин выгодно делать меньшей, для экономии материала и уменьшения потерь света. Однако пластины тоньше 0,2 мм слишком легко раскалываются. После шлифовки пластины травят для удаления всяческих загрязнений и промывают в демонизированной воде. (Вообще самая чистая вещь мире, это как раз полупроводниковые кристаллы для создания приборов. На самом деле процесс очистки состоит из 100-300 операций).

Затем создают р-п переходы. Методы создания р-п переходов весьма разнообразны. Наиболее распространенные методы сплавления, диффузии, жидкостной и газовой эпитаксии, элионный метод и др.

Метод сплавления наиболее прост, однако таким способом трудно получить хороший источник света, так как процесс создания р-п перехода при этом практически невозможно контролировать.

Для создания выплавного р-п перехода обычно используют сплав, содержащий акцепторную примесь, поскольку исходный материал имеет, как правило, электронную проводимость. Например, для изготовления выплавного р-п перехода в карбиде кремния, легированном азотом, применяют сплав кремния с алюминием. Таблетку сплава помещают на пластину полупроводника и нагревают её на короткое время. Чтобы соединение было прочным, сплав должен иметь коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту линейного расширения исходного полупроводника.

Для создания диффузионного р-п перехода пластины полупроводника и таблетку металла, создающего акцепторные уровни в полупроводнике (обычно цинк), помещают в кварцевую ампулу, которую затем откачивают до давления  $10^{-5}$  мм рт. ст, отпаивают и прогревают её в электрической печи сопротивления в течение нескольких часов при температуре около  $1000^{\circ}\text{C}$ . Этот метод позволяет получить переходы с равномерным свечением по большой площади. Диффузионные р-п переходы обычно имеют более высокий к.п.д., чем выплавные.

Эпитаксией называется процесс выращивания одного монокристалла на грани другого.

Эпитаксиальные методы создания р-п переходов во многом сходны с методами получения самих исходных монокристаллов. При жидкостной эпитаксии пластины помещают в расплав полупроводника, содержащий акцепторные примеси. Перед наращиванием слоя с дырочной проводимостью несколько увеличивают температуру расплава, с тем, чтобы растворить поврежденный поверхностный слой пластины. После этого температуру медленно понижают, в результате чего на пластинах нарастает слой р-типа толщиной в несколько десятков микрон. Полученные таким методом р-п переходы имеют наиболее высокий квантовый выход электролюминесценции.

При газовой эпитаксии над нагретой пластиной полупроводника пропускают пары этого полупроводника и пары акцепторов, в результате на пластине нарастает слой р-типа. Этот метод намного сложнее в аппаратурном отношении, чем метод жидкостной эпитаксии, так как для его осуществления необходима многозонная печь с точной регулировкой температуры в каждой зоне. Процесс газовой эпитаксии более сложен, но при газовой эпитаксии удается получить весьма совершенные кристаллы твердых растворов с переменным составом, медленно изменяя температуру в соответствующих зонах печи.

Ионное легирование сводится к бомбардировке в вакууме нагретой полупроводниковой пластины ионами примеси, ускоренными до определенной скорости. Ионы внедрившись в полупроводниковую пластину, играют роль донорных или акцепторных примесей. Это позволяет, не прибегая к процессу диффузии, получать р-п переходы. Такую технологию называют элионной.

Для создания омических контактов на поверхность полупроводниковой пластины наносят пленку металла с большой работой выхода-золота, никеля или серебра. Толщина пленки порядка одного микрона. К основному металлу добавляют присадку, создающую в полупроводнике донорные уровни, если хотят получить низкоомный контакт к материалу n-типа присадку, создающую акцепторные уровни, если нужен контакт к материалу р-типа. В некоторых случаях для улучшения механических свойств контактов их изготавливают из трех различных металлов, которые наносят на поверхность полупроводника напылением в вакууме или же химическим осаждением. После этого образец прогревают. Сопротивление низкоомных контактов, приведенное к единице площади, не превышает  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  Ом см<sup>-2</sup>. Иногда один из контактов делают прозрачным, чтобы избежать излишнего поглощения света. Для этого, например, на поверхность полупроводника осаждают пленку двуокиси олова. В других случаях контакт к базе делают не по всей поверхности, а в виде точки.

После нанесения контактов пластины режут на кристаллы размером 0,5×0,5 мм -2×2 мм. Каждый из этих кристаллов идет на изготовление одного источника света. После этого боковые поверхности либо подшлифовывают либо травят.

При помещении кристалла в корпус его обычно припаивают к кристаллодержателю одним из контактных слоев. К другому контактному слою припаивают вывод в виде тонкой проволоочки, после чего корпус герметизируют. Широкое распространение получила бескорпусная герметизация р-п переходов. В этом случае к обоим контактам припаивают металлические проволоочки, после чего кристалл заливают жидкой прозрачной пластмассой, которая затвердевает в виде шарика, обволакивающего кристалл

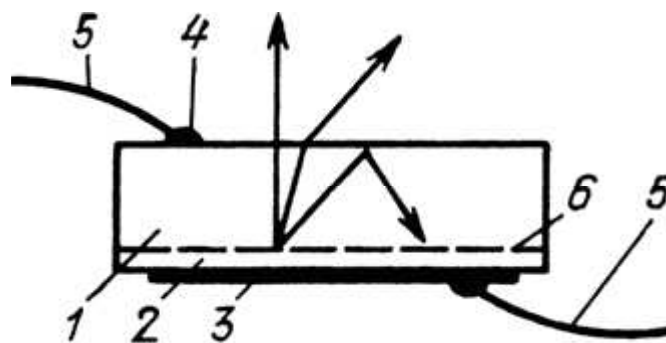


Рис.12.2 – Схематический вид инжекционного источника света прямоугольной конфигурации:

1 - полупроводник n-типа; 2 - слой p-типа; 3 - контакт к слою p-типа; 4 - контакт к базе светодиода; 5 - подводящие провода; 6 - p-n переход.  
(Стрелками показан ход лучей света)

Выход света из инжекционного источника света затруднен. Это происходит из-за большой разности коэффициентов преломления полупроводника и воздуха. Если угол падения на границу раздела двух сред больше критического, то лучи света испытывают полное внутреннее отражение. Критический угол  $\varphi_{кр}$  можно вычислить по формуле:

$$\varphi_{кр} = \arcsin (n_{пр 2} / n_{пр 1}),$$

если учесть, что  $n_{пр}$  воздуха  $\approx 1$ , а  $n_{пр}$  полупроводника (GaP)  $= 3,28 \approx 3$ , то критический угол  $\varphi = 17,7^\circ$ , соответствующий телесному углу 0,187 ср. При коэффициенте пропускания 0,7, доля света проходящего через наружную поверхность составит 0,046 т.е. 4,6%. В результате к.п.д. таких источников не превышает 2-5%, даже если внутренний квантовый выход близок к единице. Отношение внешнего квантового выхода к внутреннему можно несколько увеличить, если p-n переход расположить на столбчатом выступе диаметром 0,1-0,2мм, так называемой мезе. Такие светодиоды получили название мезодиодов. В мезодиодах часть света отражается от боковых граней мезы (рис.12.3 б) и дополнительно посылается на плоскую поверхность базы по направлению, близкому к нормали. Это увеличивает выход света в 2-3 раза.

Внешний квантовый выход можно увеличить почти на порядок по сравнению с выходом плоского диода, если базу прибора выполнить в форме полушария, в центральной части которого расположен p-n переход (рис.12.3 а).

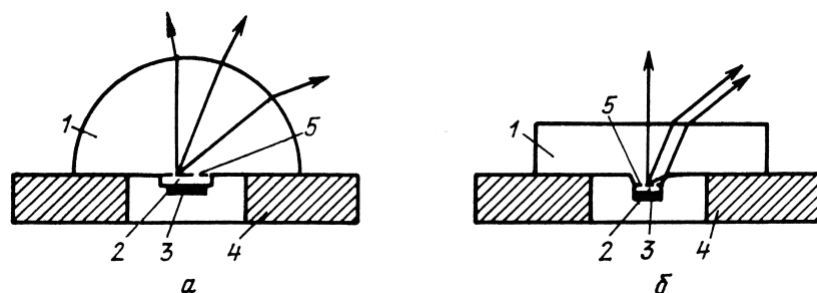


Рис.12.3 – Схематический вид инжекционного источника света в форме полусферы (а) и с р-областью, выполненной в виде мезы (б):

1 - полупроводник n-типа; 2 - слой р-типа; 3 - контакт к слою р-типа; 4 - кольцевой электрод, осуществляющий контакт к базе светодиода; 5 - р-п переход. (Стрелками показан ход лучей света)

Выход света можно также увеличить, если на поверхность полусферы нанести просветляющее покрытие из вещества с показателем преломления

$$n = \sqrt{n_1},$$

где  $n_1 = n_{\text{воздух}} \times n_{\text{полупроводник}}$

#### Применение светодиодов.

1. Малогабаритные осветители. От световых индикаторов малой мощности требуется световой поток 5-50 мЛм. Световая отдача ламп накаливания падает с уменьшением размеров, а у светодиодов остается неизменной. Большие размеры элементов и большое выделение тепла в лампах накаливания приводят к изготовлению источников больших размеров, чем это требуется для создания необходимого светового потока. Поэтому источник располагают вдали от освещаемой поверхности и используют только часть света выходящего из источника. У светодиодов малая рассеиваемая мощность позволяет их располагать непосредственно у освещаемой поверхности и использовать весь световой поток. В этой области светодиоды конкурентно способны с лампами накаливания.

2. Цветная индикация. Когда речь идет о цветных индикаторах, светодиоды имеют явное преимущество перед другими источниками света, с широким спектром излучения, Для лампы накаливания с идеальным красным светофильтром, яркость уменьшается в 5 раз, тогда как яркость красного светодиода из GaP почти не изменяется.

3. Надежность и срок службы на 2-3 порядка выше, чем у ламп накаливания. Это различие увеличивается при работе с вибрационными нагрузками.

4. Светодиоды идеально совмещаются с интегральными микросхемами. По рабочему напряжению 1-3 В, по напряжению пробоя 3,0-30 В, по диапазону рабочих токов 5-100 мА и по времени включения  $1,5-5 \cdot 10^{-8}$  с. Они также согласуются по механическим свойствам и по технологии производства.

Светодиоды в основном применяются в трёх основных группах приборов – отдельных лампах, индикаторах и оптических изоляторах (оптронах).

Питание постоянным током, или от источника ~ тока с выпрямителем.