

струкцию, повышающую эффективность ввода излучения в волокно, если они предназначены для использования в спец. целях, напр. в волоконно-оптич. линиях связи (ВОЛС) (см. *Волоконная оптика*).

С. характеризуются высокой яркостью (тыс. кд/м²), силой света (до десятков кд), силой излучения (сотни мВт/ср), внеш. квантовым выходом излучения (до 50%), широким спектральным диапазоном ($\lambda_{\text{макс}} \approx 7-0,35$ мкм), высоким быстродействием (до единиц нс), совместимостью по входным характеристикам с транзисторными микросхемами, а по спектру излучения С. ИК-диапазона — с фотоприёмниками на основе кремния, возможностью монолитной интеграции, возможностью ВЧ-модуляции излучения путём модуляции тока накачки (до сотен МГц), низковольтностью электропитания (1,5—4 В), надёжностью и большим сроком службы (до сотен тыс. ч).

Основные механизмы возбуждения светодиода — инжекция носителей заряда и ударная ионизация. Инжекция наиб. эффективна в гетероструктурах (ГС). Вследствие разрывов в валентной зоне и зоне проводимости гетероперехода при смещении перехода в прямом направлении наблюдаются односторонняя инжекция носителей заряда из широкозонного материала в узкозонный практически независимо от уровня легирования *n*- и *p*-областей. В двойных гетероструктурах (ДГ) вследствие эффекта электронного ограничения (см. *Гетероструктура*) повышается концентрация носителей в активной области структуры. Если толщина активной области $d < L$, где L — диффузионная длина инжектиров. носителей, то концентрация носителей в L/d раз превышает концентрацию в гомоструктуре при том же уровне возбуждения. Применение ДГ позволяет повысить внеш. квантовый выход излучения ($\eta_{\text{вн}}$) при малых токах накачки. Ударная ионизация имеет место при обратном смещении *p* — *n*-перехода до напряжения электр. пробоя. Этот механизм введения неравновесных носителей менее эффективен, чем инжекционный.

Излучат. рекомбинация в С. осуществляется в прямозонных полупроводниках (напр., GaAs, InAs, *твёрдых растворах* GaAs_{1-x}P_x при $x < 0,4$, Ga_{1-x}Al_xAs при $x < 0,35$ и др.), в к-рых абс. минимум зоны проводимости находится при том же значении *к* квазимпульса, что и максимум валентной зоны. Переход электрона с сохранением квазимпульса характеризуется высокой вероятностью и является излучательным. Длина волны излучения в максимуме спектральной полосы определяется шириной запрещённой зоны ϵ_g по примерному соотношению $\lambda_{\text{макс}} \approx 1,239/\epsilon_g$. Полное число излучат. переходов R в единице объёма пропорц. концентрациям электронов (*n*) и дырок (*p*) в активной области: $R = B_r np$, где B_r — коэф. рекомбинации, равный для прямозонных полупроводников $\sim 10^{-10}$ см³/с.

С. на основе гомопереходов в прямозонных полупроводниках, легированных т. н. мелкими примесями (см. *Примесные уровни*), имеют существ. недостаток — сильное поглощение излучения внутри кристалла (коэф. поглощения $\alpha \sim 10^4$ см⁻¹). Снижение потерь на межзонное поглощение достигается уменьшением энергии излучения за счёт компенсации примесей в активной области (напр., в эпитаксиальной *p* — *n*-структуре GaAs, легированной Si). При сильном легировании и компенсации хаотически расположенный в пространстве заряд примесей создаёт искривление границ зон, при к-ром локальная ширина запрещённой зоны остаётся постоянной (см. *Сильнолегированный полупроводник*). Это приводит к тому, что в распределении плотности состояний появляются участки при энергиях ниже зоны проводимости и выше валентной зоны — т. н. хвосты плотности состояний, пространственно разделённые в обеих зонах. В С. с такой структурой в излучат. рекомбинации принимают участие глубокие и удалённые группы состояний. При этом излучаемые фотоны характери-

зуются энергией, меньшей ϵ_g на глубину потенциальных ям $\Delta\epsilon$: $h\nu_{\text{макс}} \approx \epsilon_g - 2\Delta\epsilon$, и поэтому слабо поглощаются в кристалле ($\alpha \ll 100$ см⁻¹). Одновременно эти переходы имеют высокую инерционность (быстродействие С. примерно 0,5—1,5 мкс), т. к. плотность состояний на две потенциальных ям мала. В связи с низким коэф. поглощения внеш. квантовый вход излучения для приборов с полусферич. кристаллом достигает $\eta_{\text{вн}} \approx 28\%$.

В непрямозонных полупроводниках (GaP, GaAs_{1-x}P_x при $x > 0,4$ и др.) эфф. излучательная рекомбинация может осуществляться только при наличии определённого примесного центра, изоэлектронно замещающего один из атомов соединения. Роль этого центра заключается в том, что на нём образуется связанный экситон. Например, для GaP таким центром являются N, обуславливающий зелёное свечение, и комплекс Zn — O, обуславливающий красное свечение. Азот в GaP изоэлектронно замещает P. Ввиду того что N имеет меньший ат. номер, чем P, меньший ионный радиус и отличается по электроотрицательности, то образовавшийся нейтральный центр притягивает электрон короткодействующими силами. После захвата электрона дырка притягивается к заряду центра кулоновскими силами и реализуется излучат. переход. Этот экситонный излучат. переход обуславливает бесфоновую линию А и её фоновые повторения в спектре излучения.

В непрямозонных полупроводниках наблюдается также эфф. донорно-акцепторная рекомбинация, при к-рой носители захватываются на свои примесные центры, а затем электрон переходит с донора на акцептор в акте излучат. рекомбинации. Примером может служить рекомбинация на донорно-акцепторной паре Al — N в 6H — SiC и 4H — SiC, приводящая к получению синего ($\lambda_{\text{макс}} \approx 480$ нм) и фиолетового ($\lambda_{\text{макс}} \approx 423$ нм) свечения.

Для осуществления прямых переходов при большей ширине запрещённой зоны, чем дают бинарные соединения GaAs, InP и др., применяют трёхкомпонентные твёрдые растворы прямозонных бинарных соединений с малой ϵ_g и непрямозонных бинарных соединений с большой ϵ_g . Примером такого соединения является GaAs_{1-x}P_x, для к-рого Г-минимум прямых переходов расположен ниже X-минимума непрямых переходов (см. *Зонная теория*) в значительной области составов. Твёрдые растворы GaAs_{1-x}P_x и Ga_{1-x}Al_xAs сохраняют пренм. прямые переходы до энергий, соответствующих красному цвету свечения, а твёрдые растворы Ga_xIn_{1-x}P и Al_xIn_{1-x}P — до энергий, соответствующих жёлтому и зелёному цветам свечения (рис. 1).

В целях расширения спектрального диапазона излучения применяют также четверные соединения с изовалентным замещением одновременно элементов III и V групп периодической системы элементов. Примером является соединение Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}, позволяющее получить излучение в важном для ВОЛС диапазоне длин волн: $\lambda_{\text{макс}}$ равна 1,3 и 1,5 мкм.

Для снижения потерь света на поглощение внутри кристалла С. используют «широкозонное окно», к-рое позволяет вывести свет из активной области гетерострук-

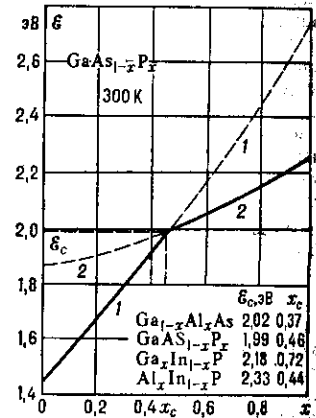


Рис. 1. Минимумы зоны проводимости GaAs_{1-x}P_x для прямого (Г, кривая 1) и непрямого (X, кривая 2) переходов в зависимости от состава твёрдого раствора.