

Люминесценция может быть вызвана светом (*фотолюминесценция*) или электрич. током (*электролюминесценция*). На явления электролюминесценции основана работа большинства полупроводниковых излучателей света (см. *Светоизлучающий диод, Рекомбинация носителей заряда* в полупроводниках).

За счёт неравновесных носителей в П. может возникать и инверсия населённости, когда число электронов на более высоких уровнях энергии больше, чем на низких. В таких условиях излучение света превышает его поглощение, т. е. происходит усиление света. Усиление происходит лишь в т. н. активной области П. В остальных местах инверсия населённости отсутствует и преобладает поглощение света. Если усиление света в активной области столь велико, что оно компенсирует и потери в пассивной области и выход световой энергии вовне, то возникает генерация света. В полупроводниковых лазерах инверсия населённости обычно достигается инжекцией неравновесных носителей через контакты (см. *Инжекционный лазер, Гетеролазер*).

При безызлучат. рекомбинации выделяемая энергия в конечном счёте отдаётся решётке. Механизмы безызлучат. рекомбинации разнообразны. При небольших концентрациях носителей осн. механизмом является рекомбинация через промежуточное состояние в запрещённой зоне, образованное примесью или дефектом решётки. Примесь захватывает сначала носитель одного знака (напр., электрон), а затем второго знака (дырку). В результате электрон и дырка исчезают, а примесь или дефект возвращается в исходное зарядовое состояние. Аналогичным механизмом является поверхностная рекомбинация, к-рая происходит при участии поверхностных состояний. При больших концентрациях носителей важную роль играет т. н. оже-рекомбинация, когда энергия передаётся 3-му носителю. Оже-рекомбинация обусловлена взаимодействием электронов. При конструировании светодиодов и лазеров безызлучат. рекомбинация нежелательна и её стараются по возможности уменьшить.

**Полупроводниковые структуры.** Простейшей полупроводниковой структурой является *p-n-переход*. Его получают, легируя образец так, чтобы в одной его части преобладали донорные, в другой — акцепторные примеси. Осн. свойство *p-n-перехода* состоит в том, что абс. величина тока  $I$ , к-рый течёт через него, сильно зависит от полярности приложенного напряжения  $U$  (рис. 9). Если переход включён в прямом направлении,

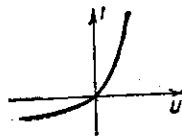


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода.

то электроны и дырки движутся по направлению к границе областей и рекомбинируют вблизи неё. Этот механизм обеспечивает относительно большой ток. Если переход включён в обратном направлении, то носители движутся от границы. В этом случае ток течёт лишь за счёт генерации электронно-дырочных пар вблизи границы и оказывается по величине значительно меньшим, чем ток в прямом направлении. Т. о., *p-n-переход* может работать как выпрямитель. На основе *p-n-переходов* делают также солнечные батареи, светодиоды, лазеры и др. приборы (см. *Диоды твердотельные*). Два *p-n-перехода*, включённые навстречу друг другу, образуют *транзистор*.

Для нужд полупроводниковой электроники изготавливают т. н. *pin-диоды*, в к-рых *p*- и *n*-области разделены областью с совств. проводимостью (*i*), а также периодич. структуры, состоящие из большого кол-ва в *p*- и *n*-областях (*p-n-p* и др.). Все перечисленные выше структуры получают путём легирования донорами

и акцепторами к.-л. одного материала (см. *Легирование полупроводников*). Гетероструктуры и гетеропереходы, представляющие собой контакт разных полупроводниковых материалов, применяются при создании полупроводниковых лазеров и др. полупроводниковых приборов.

Метод молекулярной эпитаксии позволяет создать сверхструктуры, представляющие собой периодич. чередование П. с разными  $\epsilon_g$  (рис. 10). При этом в зоне проводимости и в валентной зоне возникают периодически расположенные потенц. ямы и барьеры, размеры к-рых могут быть порядка неск. межатомных расстояний. В результате в зоне проводимости и в валентной зоне появляются т. н. мини-зоны, раз-

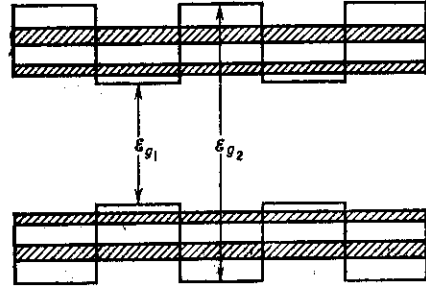


Рис. 10. Энергетическая схема сверхструктуры (мини-зоны заштрихованы).

делённые запрещёнными интервалами энергии. Благодаря этому сверхструктуры обладают свойствами, нашедшими применение в твердотельной электронике.

**Поверхность полупроводника.** Под поверхностью П. понимают неск. атомных слоёв вблизи границы П. Она обладает свойствами, отличающимися от объёмных. Наличие поверхности нарушает трансляц. симметрию кристалла и приводит к *поверхностным состояниям* для электронов, а также к особым эл.-магн. волнам (*поверхностные поляритоны*), колебат. и *спиновым волнам*. Благодаря своей хим. активности поверхность, как правило, покрыта макроскопич. слоем посторонних атомов или молекул, адсорбируемых из окружающей среды. Эти атомы и определяют физ. свойства поверхности, маскируя состояния, присущие чистой поверхности. Развитие техники сверхвысокого вакуума позволило получать и сохранять в течение неск. часов атомарно чистую поверхность. Исследования чистой поверхности методом дифракции медленных электронов показали, что кристаллографич. плоскости могут смещаться как целое в направлении, перпендикулярном к поверхности. В зависимости от ориентации поверхности по отношению к кристаллографич. осям это смещение может быть направлено внутрь П. или наружу. Кроме того, атомы приповерхностного слоя изменяют положение равновесия в плоскости, перпендикулярной поверхности, по сравнению с их положениями в такой же плоскости, находящейся далеко от поверхности (*реконструкция поверхности*). При этом возникают упорядоченные двумерные структуры с симметрией ниже объёмной или не полностью упорядоченные структуры. Первые являются термодинамически равновесными, в их симметрии зависит от ориентации поверхности. При изменении темп-ры могут происходить фазовые переходы, при к-рых симметрия структур изменяется (см. *Поверхность*).

Лит.: Ансельм А. И., Введение в теорию полупроводников, 2 изд., М., 1978; Смит Р., Полупроводники, пер. с англ., 2 изд., М., 1982; Бонч-Бруевич В. Л., Каляшников С. Г., Физика полупроводников, М., 1977.

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ** — вещества с чётко выраженными свойствами *полупроводников* в широком интервале темп-ры, включая комнатную ( $T \sim 300$  К). Характеризуются значениями уд. электропроводности ( $\sigma \sim 10^4 - 10^{10}$  Ом·см<sup>-1</sup> при