

рочных пар. Возникающие при этом в полупроводниках горячие носители способны к дальнейшему размножению за счёт ионизации. Общее число пар носителей, генерированных потоком первичных электронов, определяется отношением энергии, переданной ими твёрдому телу (остальная, сравнительно небольшая часть энергии первичных электронов уходит гл. обр. на неупругое отражение электронов и рентг. излучение), к ср. энергии рождения электронно-дырочной пары, к-рая в большинстве случаев примерно в 3 раза превышает ширину запрещённой зоны.

Перенос носителей заряда, возбуждённых электронной бомбардировкой, определяется в значит. мере теми же свойствами полупроводников и диэлектриков, а также контактов, что и в случае фотопроводимости. Эффективность процесса переноса ограничивается, в частности, захватом носителей на локальные центры и рекомбинацией.

Разновидностью Э.-в. п. является умножение электронного потока в полупроводниковых структурах (*p-n-переходах*, *pin-структурах* и др.). Эфф. разделение электронно-дырочных пар в области сильного поля *p-n-перехода*, включённого в зазорном направлении, ослабляет процесс рекомбинации и тем самым способствует переносу неравновесных носителей.

Особой разновидностью Э.-в. п. является вторично-электронная проводимость в пористых диэлектрич. слоях, в основе к-рой лежит явление *вторичной электронной эмиссии*. Перенос заряда в этом случае осуществляется вторичными электронами, выбиваемыми из зёрен пористого слоя и перемещающимися под действием электр. поля по вакуумным порам.

Э.-в. п. находит применение в разл. *электровакуумных приборах*, в частности в запоминающих электронно-лучевых трубках, *фотоэлектронных умножителях*, передающих телевиз. трубках, приборах для управления и усиления электр. мощности.

Лит.: Kronig R. L., Change of conductance of selenium due to electronic bombardment, «Phys. Rev.», 1924, v. 24, p. 377; Вавилов В. С., Действие излучений на полупроводники, М., 1963; Goetze G. W., Boerio A. H., Secondary electron conduction (SEC) for signal amplification and storage in cameratubes, «Proc. IEEE», 1964, v. 52, p. 1007; Шульман А. Р., Фридрихов С. А., Вторично-эмиссионные методы исследования твёрдого тела, М., 1977.

Г. Б. Стучинский.

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ — конденсированное состояние неравновесной электронно-дырочной плазмы в полупроводниках (см. *Плазма твёрдых тел*). Существование Э.-д. ж. было теоретически предсказано Л. В. Келдышем в 1968.

Неравновесная электронно-дырочная плазма в полупроводниковых кристаллах образуется при инжекции через контакты носителей заряда (электронов проводимости и дырок), освещении и т. п. Одноврем. существование электронов и дырок в однородном полупроводнике возможно лишь при его возбуждении. После снятия возбуждения в течение т. н. времени жизни носителей τ они рекомбинируют (аннигилируют), испустив фотон или отдав энергию кристаллич. решётке. Если τ достаточно велико (в чистом Ge при низких темп-рах $\tau \sim 10-15$ мкс), то даже при небольшом уровне возбуждения концентрация неравновесных электронов и дырок достаточна для того, чтобы кулоновское взаимодействие привело к образованию *экситона*.

Экситон охватывает большое число элементарных ячеек кристалла, а его энергия связи мала по сравнению с энергиями связи атомов в кристалле. Это позволяет приближённо рассматривать экситоны и свободные носители как своеобразный «атомный газ», для к-рого весь остальной кристалл является нейтральной средой. Газ экситонов или свободных носителей заряда имеет ряд существенных отличий от обычных газов или пара. Прежде всего, в нём отсутствуют тяжёлые частицы (ядра); кроме того, он является неравновесной системой с конечным временем жизни. Однако во мн. полупроводниковых кристаллах время термализации носителей, определяемое частотой их столкновения с кристаллич. решёткой, значительно меньше их времени жизни, обусловленного рекомбинацией. Поэтому для описания процессов, происходящих при увеличении плотности экситонного газа, можно использовать понятия

равновесной термодинамики (фазовая диаграмма, сосуществование фаз и др.).

Система свободных носителей в полупроводниках при высоких темп-рах представляет собой слабо неидеальную, полностью ионизованную плазму. При низких темп-рах и высоких концентрациях носителей n , когда $n \cdot a_{ex}^3 \gg 1$ ($a_{ex} \sim 10^{-6} - 10^{-7}$ см — боровский радиус экситона), она приобретает свойства вырожденного ферми-газа. Если же концентрации сравнительно невысоки ($n \cdot a_{ex}^3 \ll 1$) и темп-ры низкие ($kT \ll \epsilon_{ex}$, $\epsilon_{ex} \sim 10^{-1} - 10^{-3}$ эВ — энергия связи экситона), электронно-дырочные пары (ЭДП) связываются в экситоны и образуют «атомарный» газ. При ещё более низких темп-рах возможно возникновение экситонных «молекул», или *биэкситонов*, с очень малой энергией связи. Необычные коллективные явления возникают в этой системе при низких темп-рах и относительно высоких концентрациях. С увеличением концентрации экситонов и ростом давления в экситонном газе при достижении некого критич. значения $n_{кр}$ происходит сжатие этого газа, т. е. фазовый переход газ — жидкость.

Конденсированная фаза образуется в результате коллективного взаимодействия экситонов или неравновесных ЭДП при увеличении их плотности. При этом полная энергия состоит из 3 частей: кинетической, обменной и корреляционной энергий. Кинетич. энергия системы представляет сумму кинетич. энергий электронов и дырок, каждая из к-рых пропорциональна соответствующим плотностям в степени 2/3. Обменная энергия является следствием принципа Паули, согласно к-рому расстояние между одинаковыми частицами должно увеличиваться. Это приводит к уменьшению кулоновского отталкивания и, следовательно, к отрицат. вкладу в энергию. Обменная энергия электронов и дырок пропорциональна соответствующим плотностям в степени 1/3. Корреляц. энергия, по определению, учитывает всё, что не входит в первые 2 части: определяется корреляцией в движении и пространств. распределении частиц относительно друг друга, приводящей к уменьшению кулоновского отталкивания частиц с одинаковым зарядом. Корреляц. энергия отрицательна и зависит от концентрации частиц. При $T=0$ К зависимость полной энергии от концентрации имеет минимум, к-рый определяет энергию осн. состояния и равновесную плотность частиц в конденсированной фазе. Э.-д. ж. стабильна по отношению к экситонам, если энергия осн. состояния ниже энергии связи этих квазичастиц.

На рис. 1 приведена схема неравновесных энергетич. состояний, к к-рым относятся электроны, дырки, экситоны и электронно-дырочные капли (ЭДК) в полупроводнике.

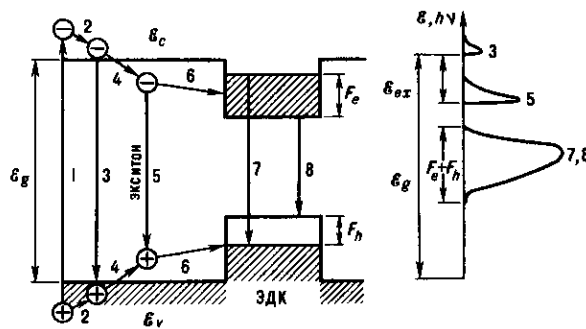


Рис. 1. Схема неравновесных энергетических состояний в полупроводнике и физический механизм образования электронно-дырочной жидкости.

Справа приведена схема спектрального распределения интенсивности излучения фотонов, рождающихся при рекомбинации неравновесных носителей. Фотолуминесценция является осн. методом исследований Э.-д. ж. в полупроводниках.

При поглощении полупроводником фотона с энергией, большей ширины запрещённой зоны ϵ_g , электрон переходит в возбуждённое состояние в зону проводимости, а в ва-