

лентной зоне образуется положительно заряж. дырка (1). В результате взаимодействия с фононами электроны и дырки термализуются за время $t \ll \tau$, где τ — время жизни ЭДП (2). Часть ЭДП может рекомбинировать, испустив фотон (3). При низких темп-рах большая часть ЭДП связывается в экситоны (4). При рекомбинации электрона и дырки в экситоне рождается фотон (5) с энергией, меньшей на энергию связи в экситоне $\Delta\epsilon = \epsilon_g - \epsilon_{ex}$. При взаимодействии экситоны могут конденсироваться в капли Э.-д.ж. (6). При рекомбинации носителей заряда в ЭДК (7, 8) фотоны испускаются в широкой полосе энергий; 3, 5, 8 — рекомбинац. излучение свободных ЭДП, экситонов и ЭДК; F_e, F_h — энергии ферми-электронов и дырок.

Образуемая конденсированная фаза — Э.-д.ж. — представляет собой систему макроскопически большого числа частиц, связанных внутр. силами взаимодействия. Она обладает предел. равновесной плотностью (концентрацией ЭДП) n_1 и устойчивой резкой границей с газовой фазой. От обычной электронно-дырочной плазмы и газа экситонов Э.-д.ж. отличается тем, что не имеет тенденции расплываться по всему образцу, занимает лишь огранич. объём $V_l = N_1/n_1$, где N_1 — полное число частиц в жидкой фазе. Если концентрация генерируемых ЭДП недостаточна, чтобы Э.-д.ж. заполнила весь объём образца (это условие реально всегда выполняется), она существует в виде сферыч. ЭДК.

Образование Э.-д.ж. можно проиллюстрировать на схематической фазовой диаграмме (рис. 2). Обычно диаграмма газ — жидкость строится в координатах давления

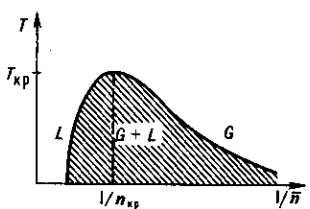


Рис. 2. Фазовая диаграмма для системы неравновесных носителей заряда в полупроводнике.

и темп-ры. Для системы неравновесных носителей в полупроводниковых кристаллах удобнее на плоскости переменных воспользоваться зависимостью ср. концентрации ЭДП $\bar{n} = N/V$ в возбуждаемом объёме V от темп-ры T . В интервале темп-р ниже критической $T_{кр}$ в правой части диаграммы (область G) носители существуют в виде слабо ионизованного экситонного газа. Слева от заштрихованной части — область L пространственно однородной Э.-д.ж. Заштрихованная область ограничивает значения параметров, при к-рых происходит расслоение на две фазы — ЭДК с равновесной плотностью $n_1(T)$, окружённые газом экситонов, биэкситонов и свободных носителей с равновесной плотностью $n_2(T)$. При $T_{кр}$ исчезает различия между газом и жидкостью, и уже ни при каких плотностях \bar{n} не происходит фазовый переход, т. е. увеличение концентрации неравновесных носителей при увеличении уровня возбуждения происходит непрерывным образом. Значение $T_{кр}$ определяется энергией связи частиц $\Delta\epsilon$ в Э.-д.ж. Величина $T_{кр}$ определённая из многочисл. экспериментов, составляет ок. 6,5 К для Ge и 28 К для Si. Т. о., в этих полупроводниках Э.-д.ж. может существовать лишь при низких темп-рах. Осн. параметры конденсированной фазы и области её существования имеют следующие порядки величин: $n_{кр} \sim n_1 \sim a_{ex}^{-3}$, а $\Delta\epsilon \sim \epsilon_{ex} \sim 10 kT_{кр}$, т. о., ср. расстояние между частицами в Э.-д.ж. $\sim a_{ex}$, а ср. энергия связи на одну ЭДП $\sim \epsilon_{ex}$.

Конкретный вид фазовой диаграммы экситонный газ — Э.-д.ж. зависит от особенностей электронного спектра полупроводника (многодолинная и однодолинная структура зон, наличие вырождения зон), отношения эфф. масс электрона и дырки m_e/m_h , отношения времени жизни носителей и времени их термализации.

Результаты многочисл. детальных теоретич. и эксперим. исследований условий образования Э.-д.ж., фазовых диаграмм, кинетики конденсации экситонов и необычных свойств конденсированной фазы приведены в ряде обзоров

и монографий [6—8]. Наиб. детально физ. свойства Э.-д.ж. исследованы в кристаллах Ge и Si. Благодаря особенностям электронного спектра этих полупроводников прямая рекомбинация электронов и дырок запрещена, что приводит к относительно большим (для чистых Ge и Si) значениям времени жизни неравновесных носителей. Это позволяет достаточно легко в широких пределах изменять концентрацию ЭДП и экситонов. Кроме того, т. н. многодолинная зонная структура этих полупроводников оказывается решающим фактором, существенно облегчающим образование Э.-д.ж.

Многодолинная зонная структура означает, что благодаря симметрии кристалла в нём существует несколько эквивалентных групп электронов или дырок. Кроме Ge и Si такой зонной структурой обладают кристаллы GaP, C, соединения группы A^IVB^6 и др. Оказывается, что в этом случае значения n_1 , $\Delta\epsilon$ и $T_{кр}$ существенно больше, чем они были бы в полупроводнике с теми же значениями эфф. масс и диэлектрич. проницаемости, но с простым однодолинным энергетич. спектром для электронов и для дырок. Это обусловлено тем, что полная энергия частиц в Э.-д.ж. складывается из двух энергий: кинетической (фермиевской) и потенциальной (кулоновского взаимодействия). Равновесная плотность определяется из условия минимума полной энергии, т. е. баланса этих двух вкладов.

При заданной неизменной концентрации частиц переход от однодолинной зонной структуры к многодолинной нарушает этот баланс, поскольку энергия Ферми определяется числом частиц в каждой долине и при увеличении числа долин должна существенно уменьшаться. Потенц. энергия зависит от осн. только от ср. расстояния между частицами, т. е. от их полной концентрации, и должна остаться практически неизменной. При этом произойдёт самопроизвольное сжатие системы, к-рое будет продолжаться до тех пор, пока при новом более высоком значении плотности жидкой фазы рост энергии Ферми снова не скомпенсирует дальнейшее увеличение взаимодействия. В этом новом положении равновесия концентрация и энергия связи частиц в Э.-д.ж. могут быть существенно больше, чем в начальном.

Т. о., многодолинная зонная структура значительно увеличивает стабильность Э.-д.ж. и область её существования на плоскости (n, T) . Справедливость этого утверждения была подтверждена эксперим. наблюдением за поведением Э.-д.ж. в условиях одноосной деформации Ge и Si, когда при разл. направлениях деформации удаётся получить разл. число эквивалентных долин и т. о. в широких пределах изменять параметры Э.-д.ж.

Существование Э.-д.ж. экспериментально доказано для мн. полупроводников, в т. ч. с однодолинным и относительно изотропным энергетич. спектром (напр., GaAs, CdS, CdTe). Однако условия образования Э.-д.ж. в этом случае оказываются гораздо более жёсткими.

Установлено, что из-за отсутствия тяжёлой частицы в экситоне (и соответственно больших амплитуд нулевых колебаний) связь экситонов в биэкситоне оказывается весьма слабой. По теоретич. оценкам, подтверждённым экспериментом, при различии масс электрона и дырки в пределах одного порядка энергия диссоциации биэкситона $\epsilon_d \ll \epsilon_{ex}$. Этим обстоятельством объясняется то, что Э.-д.ж. в полупроводниках, в отличие от жидкого водорода, не является молекулярной жидкостью, а, подобно жидким щелочным металлам, имеет вид «атомарной» металлич. жидкости, в к-рой не существует ни экситонных молекул, ни экситонов, а электроны и дырки полностью делокализованы и свободны, подобно электронам в металлах. Они могут перемещаться независимо друг от друга внутри объёма, занимаемого Э.-д.ж., и покидают этот объём, если им сообщается дополнитель. энергия, превышающая т. н. работу выхода. Кроме того, и электроны, и дырки оказываются вырожденными во всей области существования конденсированной фазы. Т. о., Э.-д.ж. является вырожденной двухкомпонентной ферми-жидкостью. Другим важным следствием отсутствия в Э.-д.ж. тяжёлых частиц является то, что такая жидкость не кристаллизуется, т. е. не