

образует «твёрдой» фазы при $T=0$. Если бы кристаллизация произошла, амплитуда нулевых колебаний частиц около положения равновесия в «твёрдой» фазе должна была бы быть порядка a_{ex} , т. е. порядка расстояния между частицами. Это по любым существующим критериям плавления должно привести к плавлению уже при нулевой темп-ре.

Следует заметить, что теоретически существует возможность образования т. н. экситонной жидкости. Это могло бы иметь место, если бы в экситоне отношение m_h/m_e было много больше 10. В этом случае формирующиеся биэкситоны могли бы образовать диэлектрич. молекулярную жидкость, подобную жидкому водороду [7]. Однако многочисл. попытки эксперим. обнаружения конденсации биэкситонов в полупроводниковых кристаллах до сих пор не увенчались успехом.

Из всех известных жидкостей Э.-д. ж. имеет наименьшую плотность массы $(m_e + m_h)n_1 \sim 10^{-7} - 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, т. о., ЭДП обладает не истинной, а *эффективной массой*, к-рая определяет инерционные свойства Э.-д. ж., но не кол-во вещества. Благодаря малой плотности и малой энергии связи Э.-д. ж. чувствительна к внеш. воздействиям, напр. деформации кристалла, электрич. и магн. полям и др. Э.-д. ж. способна легко ускоряться и течь внутри кристалла, однако в силу её электронеутральности это движение не только не сопровождается электрич. током, но и к. л. переносом вещества. Если экситон рассматривать как квант энергии возбуждения, то Э.-д. ж. есть пространственно сконцентрированная энергия возбуждения с плотностью $n_1 \epsilon_0 \sim 10^4 - 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$, к-рая может переноситься по кристаллу.

Способность легко перемещаться внутри кристалла без к. л. его нарушений является одной из интересных особенностей ЭДК, отличающей их от любых др. макроскопич. образований и демонстрирующей их квантовую природу. С этой особенностью связаны мн. свойства Э.-д. ж. Высокая подвижность ЭДК наиб. наглядно была продемонстрирована в экспериментах с неоднородно деформированными кристаллами Ge. Ширина запрещённой зоны ϵ_g (и, следовательно, энергия покоящейся ЭДП) зависит от деформации, поэтому в неоднородно деформированных кристаллах энергия каждой ЭДП различна в разных точках. Это эквивалентно наличию нек-рой потенц. энергии, пропорциональной локальной деформации, или сил, пропорциональных градиенту деформации. При сравнительно невысоких одноосных неоднородных деформациях удаётся наблюдать перемещение ЭДК на расстояние до 10^{-2} м со скоростями, приближающимися к скорости звука в кристалле. В то же время при тех же условиях дрейф отдельных ЭДП и экситонов практически отсутствует. Высокая подвижность объясняется ещё одной удивительной особенностью капель Э.-д. ж. При своём движении макроскопич. ЭДК обладают очень малым «трением» о кристаллич. решётку. Взаимодействие с колебаниями решётки сопряжено с изменением энергии электрона, а поскольку электроны и дырки в ЭДК вырождены, то в процессе рассеяния на фононах из общего числа носителей может участвовать лишь небольшая часть электронов и дырок, энергия к-рых близка к энергии Ферми.

Благодаря способности ЭДК легко перемещаться по кристаллу Э.-д. ж. всегда существует в кристаллах в виде облака отд. капель. Осн. причиной этого является неравновесность системы Э.-д. ж.—экситоны. Для своего существования она требует внеш. возбуждения (чаще всего это свет), большая часть энергии к-рого диссипирует в тепло, т. е. в фононы. Фононы испускаются в области, где происходит генерация носителей с последующей их термализацией и рекомбинацией. Интенсивными источниками фононов (фононного ветра) являются и ЭДК, в к-рых концентрируется энергия возбуждения.

Фононные потоки частично перепоглощаются носителями, передавая им энергию и импульс. Ср. импульс, передаваемый каждому носителю за единицу времени, эквивалентен нек-рой эфф. силе, пропорциональной плотности потока фононов и совпадающей с направлением его распространения. Результатом действия фононного ветра оказывается неустойчивость больших объёмов Э.-д. ж. Ин-

тенсивность фононного ветра возрастает пропорционально линейному размеру ЭДК. Если размер капли достигает критич. радиуса R_c , то сила, создаваемая фононным ветром, превышает поверхностное натяжение и капля делится на две с меньшими размерами. Поэтому измеренные макс. размеры ЭДК в Ge не превышают 10 мкм, а в Si, где плотность Э.-д. ж. существенно выше,— 2 мкм. Неизбежное существование фононного ветра и большая подвижность ЭДК в обычных условиях приводят к их разлёту из области возбуждения. Однако за счёт той же подвижности, используя неоднородную статическую деформацию спец. вида, имеющую максимум внутри кристалла, оказалось возможным создавать удерживаемые напряжениями гигантские капли диаметром до 1 мм. Фотографич. изображения таких капель удаётся получить, используя их собственное рекомбинац. излучение.

Благодаря тому что область деформации находится не на поверхности кристалла, где скорость рекомбинации носителей всегда высока, а плотность гигантских капель благодаря деформации примерно в неск. раз ниже, чем плотность Э.-д. ж. в недеформированном Ge или Si, время жизни τ ЭДП в таких каплях достигает рекордных величин—ок. 1 мс в Ge и 1 мкс в Si. Большие объёмы Э.-д. ж. и высокие значения τ в таких ЭДК позволили с достаточной точностью измерить важнейшие параметры металлич. Э.-д. ж., в т. ч. электропроводность и подвижность носителей, к-рые не удавалось непосредственно измерить в обычных условиях существования ЭДК. При исследовании гигантских капель были обнаружены такие новые явления, как магнитолазменные бегущие волны, аналогичные альфеновским волнам в полуметаллах, и рекомбинац. намагничивание ЭДК в пост. магн. поле, приводящее к возрастанию магн. поля внутри капли и переходу её в парамагн. состояние. В результате намагничивания происходит сильное сплюсчивание, к-рое оказывается энергетически выгодным при возрастании магн. момента в больших ЭДК.

Лит.: 1) Труды IX Международной конференции по физике полупроводников, т. 2, Л., 1969, с. 1384—92; 2) Келдыш Л. В., Электронно-дырочные капли в полупроводниках, («УФН»), 1970, т. 100, с. 514; 3) Pоkrovskii Ya., Condensation of non-equilibrium charge carriers in semiconductors, «Phys. Stat. Sol. A», 1972, v. 11, p. 385; 4) Bаgаev V. S., Properties of electronic-hole drops in germanium crystals, «Springer Tracts. Mod. Phys.», 1975, v. 73, p. 72; 5) Jeffries C. D., Electron-hole condensation in semiconductors, «Science», 1975, v. 189, p. 955; 6) The Electron-hole liquid in semiconductors, in: Solid state physics, v. 32. Advances in research and applications. Ed. H. Ehrenreich; F. Seitz, D. Turnbull, N. Y., 1977; Электронно-дырочная жидкость в полупроводниках, пер. с англ., М., 1980; 7) Electron-hole droplets in semiconductors. Ed. C. D. Jeffries, L. V. Keldysh, Amst.—[a. o.], 1983; Электронно-дырочные капли в полупроводниках, под ред. К. Д. Джеффриса, Л. В. Келдыша, М., 1988; 8) Мурзин В. Н., Субмиллиметровая спектроскопия коллективных и связанных состояний носителей тока в полупроводниках, М., 1985, с. 109.

В. С. Багаев.

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД—то же, что *p—n-переход*.

ЭЛЕКТРОННОЕ ЗЕРКАЛО—электрич. или магн. система, отражающая пучки электронов и предназначенная либо для получения с помощью таких пучков электронно-оптич. изображений, либо для изменения направления движения электронов. В своей значит. части Э. з.—системы, симметричные относительно нек-рой оси (см. *Электронная и ионная оптика*). Электростатические осесимметричные Э. з. (рис. 1) используют для создания правильных электронно-оптич. изображений объектов. Если последний электрод такого Э. з. сплошной и электроны меняют направление движения непосредственно вблизи его поверхности, то можно получить увеличенное изображение микрорельефа этой поверхности. В зеркальном *электронном микроскопе* используется именно это свойство Э. з. Цилиндрические Э. з. с «двухмерным» (не зависящим от координаты x) электрич. (рис. 2) или магн. полем применяются для изменения направления электронных пучков, причём для электронов, движущихся в ср. плоскости зеркала, угол падения равен углу отражения, аналогично