

КВАНТОВЫЙ ХАРАКТЕР ОТРАЖЕНИЯ ЭКСИТОНА ОТ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ КАПЛИ

Н.А. Гиппиус, В.А. Заварицкая, Л.В. Келдыш, В.А. Милев, С.Г. Тиходеев

Показано, что малые значения коэффициента неупругости удара экситона о поверхность ЭДК связаны с квантовым надбарьерным отражением экситона от поверхности капли.

При низких температурах и достаточно высоких уровнях возбуждения полупроводника система неравновесных носителей в Ge и Si расслаивается на электронно-дырочные капли (ЭДК) и газообразную фазу, состоящую из свободных экситонов (СЭ) и свободных носителей¹. Существенным параметром, описывающим взаимодействие между газом СЭ и ЭДК, является коэффициент неупругости удара экситона о поверхность капли ξ . В^{2,3} для Si была получена оценка $\xi \sim 0,05$, а в^{4,5} указывалось, что $\xi \sim 0,1 \div 0,2$ и в Ge. Мы покажем, что столь малая величина не может быть объяснена действием фоновых ветвей, как это делалось в^{2,3}, и является, по-видимому, следствием квантового надбарьерного отражения экситона от поверхности ЭДК.

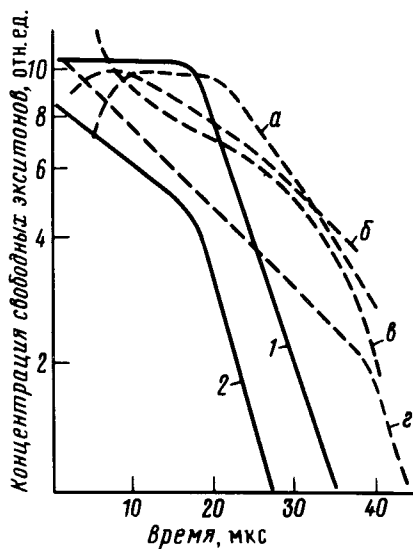
Для теоретического объяснения закономерностей образования ЭДК в Si в работах^{2,3} пришлось предположить, что коэффициент неупругости ξ в Si очень мал: $\xi \sim 0,05$. Закономерности образования ЭДК в Ge удовлетворительно объяснялись в предположении, что $\xi \sim 1$ ^{1,6}. Отметим, однако, что кинетика образования жидкой фазы в Ge мало чувствительна к изменению ξ в широких пределах ($0,01 < \xi < 1$). Это связано (см.⁷) с существенно большим по сравнению со случаем Si временем жизни носителей внутри ЭДК в Ge. С другой стороны, от величины ξ сильно зависят временные характеристики распада системы ЭДК – СЭ в Ge.

На рис. 1 приведены кривые спада концентрации СЭ при температуре ~ 4 К после импульсного лазерного возбуждения. Кривые (а, б, в) – уменьшение во времени сигнала люминесценции СЭ, линия $0,714 \text{ эВ}^{-1}$ ⁸. Кривая (г) получена из обработки спектров циклотронного резонанса, записанных с различной задержкой относительно лазерного импульса¹¹.

Временные зависимости концентрации газа СЭ – $n(t)$ и средней концентрации носителей в жидкой фазе $N(t)$ при распаде описываются уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn}{dt} = -\frac{n}{\tau_{ex}} - \Gamma(n - n_T) \\ \frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau_0} + \Gamma(n - n_T) \end{array} \right. \quad (1)$$

где τ_{ex} , τ_0 – времена жизни СЭ и носителей в ЭДК соответственно, n_T – термодинамически равновесная концентрация СЭ, $\Gamma = \xi 4\pi R^2 N_d V_T$ – скорость захвата экситонов поверхностью капель, R – радиус ЭДК, N_d – их число в 1 см^3 образца, V_T – средняя тепловая скорость СЭ. Оказывается, что при $\xi = 1$ и изменении в разумных для Ge пределах других параметров в (1) численные решения (1) для $n(t)$ практически не зависят от времени на начальном этапе распада системы (кривая 1 на рис. 1). Только при $\xi = 0,1$ удается получить медленно спадающие зависимости (кривая 2) характерные для всех приведенных экспериментальных результатов.



Кинетика концентрации свободных экситонов в германии при $T \sim 4 \text{ К}$. Экспериментальные кривые: $a - 8$, $б - 9$, $в - 10$, $г - 11$. Расчетные кривые $n(t)$ из уравнения (1): 1 – при $\xi = 1$, 2 – при $\xi = 0,1$

Используя аналогию между электростатическими силами и силами возникающими при поглощении экситоном неравновесных фононов^{1,2}, легко показать, что фононный ветер может существенно влиять на поток экситонов к ЭДК лишь при самых низких температурах (T меньше 0,1 К для Si и 0,01 К для Ge) и не может объяснить малости ξ в Si и Ge.

Оценка $\xi = 1$, предполагавшаяся в предыдущих работах без учета фононного ветра, основывалась на классической картине падения экситона в потенциальную яму – ЭДК. Однако классическое рассмотрение применимо лишь если длина волны де Бройля

$$\lambda = \hbar/p \ll a, \quad (2)$$

где p – импульс частицы, a – наименьший масштаб неоднородностей потенциала, который в нашем случае определяется протяженностью перехода от ЭДК к "экситонной атмосфере" и (см. в¹) примерно равен $a_{ex} = \epsilon \hbar^2 / 2 \mu e^2$ – экситонному радиусу, m_e и m_h – эффективные массы электрона и дырки, $\mu = m_e m_h / (m_e + m_h)$ – приведенная масса. Во всей области температур, при которых существуют ЭДК ($kT \ll E_{ex} = \hbar^2 / 2 \mu a_{ex}^2$) условие (2) не выполняется:

$$\frac{\lambda}{a_{ex}} \sim \sqrt{\frac{\mu}{m_e + m_h}} \sqrt{\frac{E_{ex}}{kT}} \gg 1. \quad (3)$$

Отметим, что оценка (3) и, следовательно, квантовый характер отражения экситонов от поверхности ЭДК, является прямым следствием соотношения $m_e \sim m_h$.

Общее решение квантовой задачи рассеяния СЭ, т.е. связанного состояния двух частиц во внешнем потенциальном поле нам не известно, однако можно показать, что при стремлении кинетической энергии движения комплекса как целого E_k к нулю одновременно $\xi \rightarrow 0$. Подобный факт хорошо известен для задач, сводящихся к одномерным, когда $\xi \sim \sqrt{E_k}$. Полагая, что энергетическая зависимость имеет аналогичный характер в случае отражения СЭ, по-

лучаем грубую оценку

$$\xi \sim \sqrt{kT/E_{ex}}$$

где E_{ex} — единственный энергетический масштаб в системе ЭДК — свободные носители. Для $E_{ex} \sim 100$ К и $T \sim 4$ К получим $\xi \sim 0,2$.

Таким образом, экспериментально наблюдаемую в Ge и Si величину $\xi \sim 0,1$ можно объяснить квантовым отражением экситонов от ЭДК. Наряду с хорошо известными квантовыми осцилляциями люминесценции ЭДК в сильных магнитных полях ¹, характер кинетики рекомбинации свободных экситонов в присутствии капель является ярким экспериментальным проявлением влияния квантово-механических эффектов на поведение макроскопической системы.

Литература

1. Electron-Hole Droplets in Semiconductors (Ed. by L.V.Keldysh and C.D.Jeffries, North. Holl. Publishers, Amsterdam, N.Y., 1983.
2. Hammond R.B., Silver R.N. Phys. Rev. Lett., 1979, 42, 523.
3. Voisin P., Etienne B., Voos M. Phys. Rev. Lett., 1979, 42, 526.
4. Миляев В.А., Санина В.А. Препринт ФИАН № 153, Москва, 1980 г.
5. Санина В.А. Кандидатская диссертация, Москва, 1982.
6. Westervelt R.M. Phys. Stat. Sol. (b), 1976, 74, 727.
7. Тиходеев С.Г. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 215.
8. Астемиров Т.А., Багаев В.С., Падуcich Л.И., Поляков А.Г. Краткие сообщения по физике ФИАН, 1976, 11, 3.
9. Westervelt R.M., Lo T.K., Staehli J.L., Jeffries C.D. Phys. Rev. Lett., 1974, 32, 1051.
10. Ашкинадзе Б.М., Фишман И.М. ФТП, 1977, 11, 408.
11. Маненков А.А., Миляев В.А., Санина В.А. ДАН СССР, 1980, 250, 1371.
12. Келдыш Л.В. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 100.