

РЕЛАКСАЦИЯ ИМПУЛЬСА СВОБОДНЫХ ЭКСИТОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

*Н.Н.Зиновьев, Л.П.Иванов, И.Г.Ланг, С.Т.Павлов,
А.В.Проказников, И.Д.Ярошецкий*

Впервые измерено время релаксации импульса свободных экситонов в полупроводниках (CdS) в широкой температурной области $10 \div 300$ К. При $T < 60$ К релаксация определяется рассеянием экситона на пьезоакустических фононах, при $T > 100$ К доминирует рассеяние на оптических фононах.

Величина коэффициента диффузии или подвижности неравновесных носителей заряда или экситонов является важной кинетической характеристикой, определяющей процессы переноса в полупроводниках. Задача определения этих величин относительно просто решается лишь для заряженных частиц. Что касается экситонов, то нам известна лишь одна работа, в которой предпринята попытка измерения подвижности экситонов в поле неоднородной деформации в кристалле Si в узком диапазоне температур $1,5 \div 20$ К¹.

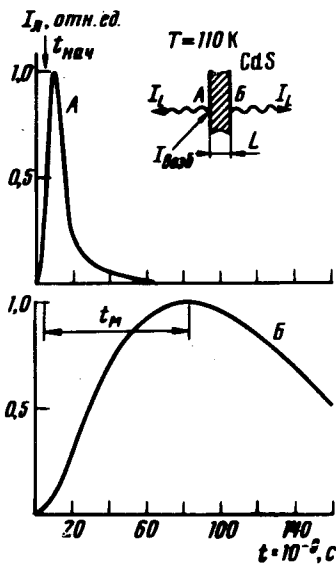


Рис. 1

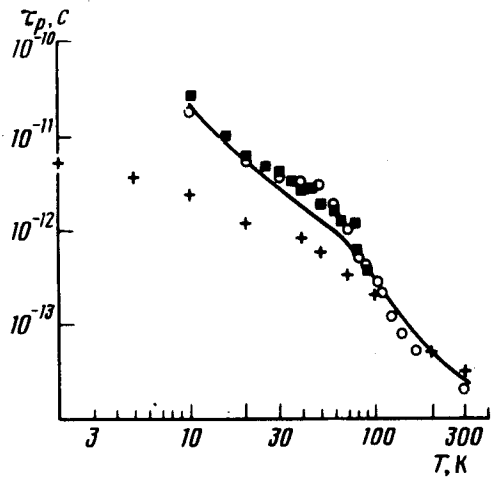


Рис. 2

Рис. 1. Временные кинетики экситонного излучения в области генерации (А) и области, удаленной от нее на расстояние L (Б) для $T = 110$ К

Рис. 2. Экспериментальные значения $\tau_p = f(T)$: ■ – обр. №1, ○ – обр. №2, + – данные из⁴ для электронов в n -CdS, сплошная кривая – результирующая теоретическая зависимость $\tau_p = f(T)$

В настоящей работе впервые непосредственным образом определена величина коэффициента диффузии термализованных экситонов D и значение времени релаксации импульса τ_p в широкой области температур $T = 10 \div 300$ К в полупроводниках (в частности, в кристаллах CdS). Для определения D и τ_p использовалось исследование нестационарной диффузии экситонов, генерируемых в образце при поверхностном возбуждении полупроводника коротким световым импульсом (вставка и рис. 1). Регистрировалась временная кинетика экситонного излучения в области генерации (точка А) и в области, удаленной от "пятна" возбуждения на расстояние $x = L$ (точка Б). В силу того обстоятельства, что коэффициент поглощения экситонного излучения из резонансного состояния $\alpha_x \cong 10^5 \text{ см}^{-1}$, регистрация экситонного излучения в точке Б могла быть возможной только в случае их диффузионного проникновения в данную область. Исследуемые образцы CdS, выращенные из газовой фазы, имели форму пластинки толщиной $L \cong 10 \div 40$ мкм; концентрация остаточных доноров в них не превышала 10^{15} см^{-3} .

Люминесценция возбуждалась импульсами N_2 -лазера с длительностью импульса $(5 \div 10) \cdot 10^9$ с, интенсивностью $I < 10^{23} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Образцы помещались в камеру терморегулируемого криостата с точностью поддержания температуры не хуже 0,1 К. Люминесценция на линии излучения экситона из резонансного состояния анализировалась с помощью двойного монохроматора ДФС-24 со спектральной шириной щели не более 0,9 мэВ и стробоскопической системы регистрации с временным разрешением не хуже 10^9 с. В случае, когда время жизни экситонов τ велико по сравнению с τ_p , то они приходят в термодинамическое равновесие с решеткой. В то же время, когда длина свободного пробега фотона, испущенного при рекомбинации экситона, мала по сравнению с диффузионной длиной экситонов – L_D (вклад переноса за счет переизлучения мал), движение экситонов в кристалле в отсутствие внешних полей может быть описано посредством обычного уравнения диффузии. Из анализа решения этого уравнения следует соотношение для определения D :

$$D = \frac{L^2 \tau}{4 \left(t_M^2 + \frac{3}{2} t_M \tau \right)}, \quad (1)$$

где t_M — временная задержка в достижении максимума импульса люминесценции экситонов, достигающих точки B . Для определения D по (1) необходимо знать время жизни экситонов τ . Оно было определено тремя независимыми способами: 1) из анализа затухания импульса люминесценции на линии фононного повторения свободного экситона, характеризующего релаксацию интегральной концентрации экситонов в образце (коэффициент поглощения света на этой линии $a_{X-LO}L < 1$ в отличие от соответствующей величины для излучения экситона из резонансного состояния, где $a_X L \gg 1$); 2) из анализа затухания сигнала экситонного излучения в точке B при $t \rightarrow \infty$ (в этом случае $n(x, t) \sim \exp(-t/\tau)$); 3) из анализа затухания люминесценции при однородном, объемном возбуждении полупроводника (двухфотонное возбуждение). Получившиеся при указанных способах определения τ численные значения различались по величине не более, чем на 10%. Из эксперимента определялась величина t_M (рис.1), затем по (1) с учетом найденного значения τ вычислялась величина коэффициента диффузии экситонов¹⁾. В свою очередь, коэффициент диффузии частиц связан с временем релаксации импульса соотношением

$$D = \frac{1}{3} \tau_p \bar{v}^2, \quad (2)$$

где $\bar{v} = (3kTm_x)^{1/2}$ — тепловая скорость экситона, m_x — эффективная масса экситона. На рис. 2 изображена зависимость τ_p от температуры, полученная на основании обработки данных эксперимента рис.1 по (1) и (2). На рис.3 представлены результаты теоретического рассмотрения процессов рассеяния экситонов на акустических и оптических фононах. На экспериментальной зависимости $\tau_p = f(T)$ можно выделить два участка с различающимся температурным ходом τ_p (рис.2). Так, при $T > 100$ К экспериментальная зависимость близка к экспоненциальной, характерной для процесса рассеяния на оптических фононах. При этом, как показывают результаты рассмотрения процесса рассеяния экситона на оптических фононах³ и сопоставление с данными настоящего эксперимента, чрезвычайно существенным является не только рассеяние экситона как целого, но и взаимодействие с LO -фононами, приводящее к его распаду. Результаты теории, представленные на рис.3, показывают, что при $T > 100$ К вклад в рассеяние от обоих механизмов примерно одинаков. Что касается области

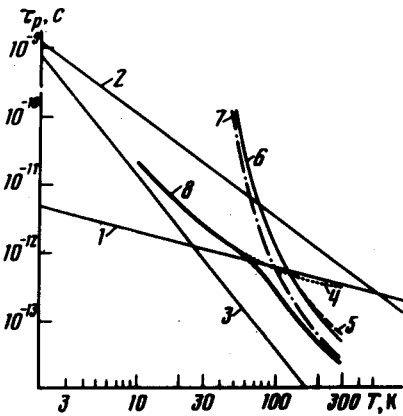


Рис.3. Результаты теоретического рассмотрения рассеяния импульса экситона: 1 — рассеяние электронов на акустических фононах (пьезоэлектрическое взаимодействие), 2 — рассеяние экситонов на акустических фононах (деформационное взаимодействие), 3 — асимптотическая зависимость $\tau_p = f(T)$ — акустические фононы (пьезоэлектрическое взаимодействие), 4 — точная зависимость $\tau_p = f(T)$ для рассеяния на акустических фононах (пьезоэлектрическое взаимодействие), 5 — зависимость $\tau_p = f(T)$ для рассеяния экситонов на оптических фононах, 6 — $\tau_p = f(T)$ для рассеяния на оптических фононах, обусловленного распадом, 7 — суммарная зависимость $\tau_p = f(T)$ для рассеяния на оптических фононах, 8 — результирующая зависимость $\tau_p = f(T)$ для рассеяния экситона

температур $T < 60$ К, то, как показывают результаты теоретического рассмотрения, оказалось, что наиболее эффективным механизмом релаксации является рассеяние на акустических фононах, обусловленное пьезоэлектрическим взаимодействием экситонов и фононов. При температуре $60 \text{ К} < T < 100 \text{ К}$ наблюдается характерная область, в которой реализуется сме-

1) Следует отметить, что для правильного определения D необходимо, чтобы максимальная интенсивность возбуждения не превышала накачки, при которой начинает проявляться увлечение экситонов фононами²⁾.

шанный механизм рассеяния на пьезоакустических и оптических фононах. Вычисление вклада деформационного взаимодействия в вероятность рассеяния экситонов на акустических фононах показало, что этот вклад, по сравнению с пьезоэлектрическим взаимодействием в интервале температур от 10 до 300 К, мал.

Таким образом, в настоящей работе удалось провести прямые измерения величины времени релаксации импульса свободных экситонов; понять механизмы рассеяния импульса экситонов и, используя величины, непосредственно определяемые на опыте, достичь хорошего согласия теории и эксперимента без каких-либо подгоночных параметров.

Литература

1. *Tamor M.A., Wolf J.P.* Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 1703.
2. *Зиновьев Н.Н., Парманбеков У., Ярошецкий И.Д.* Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 601.
3. *Траллеро Гинер К., Сотолонго Коста О., Ланг И.Г., Павлов С.Т.* ФТТ, 1982, 24, 7.
4. *Fujita H., Kobayashi K., Kawai T.* J. Phys. Soc. Jap., 1965, 20, 109.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 июня 1982 г.