

## КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЭКСИТОНОВ В GaAs

Я.Ю.Аавиксоо, И.Я.Рейманд, В.В.Россин, В.В.Травников

*Институт физики АН ЭССР*

202400, Тарту Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе АН СССР  
194021, Ленинград

Поступила в редакцию 11 марта 1991 г.

При исследовании кинетики поляритонной люминесценции GaAs обнаружена задержка импульса излучения, связанная с релаксацией электронов и экситонов по энергии. Показано, что энергетическая релаксация замедляется с уменьшением концентрации мелких примесей.

При гелиевых температурах основное экситонное состояние является конечным этапом энергетической релаксации возбужденного кристалла. В данной работе использовался наиболее прямой способ исследования этой энергетической релаксации путем изучения кинетики экситонной люминесценции при импульсном возбуждении в различные энергетические состояния.

Люминесценция возбуждалась лазером на красителе стирил-9 с накачкой криптоновым лазером с синхронизацией мод. Длительность импульса возбуждения была 5 пс период следования импульсов - 240 нс, полуширина аппаратной функции системы регистрации - 300 пс. Спектральная ширина линии возбуждения  $\sim 0,7$  эВ и спектральное разрешение  $\sim 0,1$  эВ позволяли четко фиксировать как энергию возбуждения, так и энергию люминесценции. Исследовались чистые эпитаксиальные слои GaAs с различными концентрациями остаточных примесей и типом проводимости. По оценкам концентрация мелких доноров в самом чистом образце Г13 составляла величину  $\sim 10^{12}$  см $^{-3}$ <sup>1</sup>. Стационарный спектр этого образца отличается интенсивной линией поляритонной люминесценции, сравнимой по интенсивности с линиями излучения связанных экситонов<sup>2</sup>.

На рис. 1 показаны спектры и кинетика экситонной люминесценции различных образцов при температуре  $T=1,7$  К. Импульсы люминесценции регистрировались на энергиях, обозначенных стрелками 1, 2 и соответствующих излучению из состояний нижней и верхней поляритонной ветвей. Во всех образцах наблюдается увеличение времени нарастания импульса люминесценции при уменьшении энергии излучающих поляритонов. На рис. 2а показана зависимость времени задержки максимума импульса люминесценции  $\Delta t_{max}$  от энергии излучения. Эта зависимость отражает эффект "бутылочного горла" для поляритонов, возникающий за счет замедления энергетической релаксации поляритонов вблизи экситонного резонанса<sup>3</sup>. Ранее о кинетике релаксации поляритонов сообщалось в работах 4-6, выполненных на кристаллах CdS. В отличие от указанных работ в нашем случае эффект "бутылочного горла" проявлялся в увеличении времени нарастания, а время затухания составляло величину  $\tau_d \sim 4 \div 5$  нс (образец Г13) и слабо зависело от энергии люминесценции. Заметим, что указанная величина  $\tau_d$  превышает полученное в работе 7 значение "излучательного" времени жизни экситона.

Слабая зависимость времени нарастания от энергии экситонной люминесценции GaAs наблюдалась в<sup>8</sup>, где она связывалась с диффузией поляритонов из объема к поверхности. Для выяснения роли диффузии мы

исследовали временно затухание излучения, возникающего при аннигиляции поляритонов из области резонанса с одновременным испусканием  $LO$ -фонона. Коэффициент поглощения для такого излучения очень маленький, а групповая скорость велика, поэтому пространственное распределение поляритонов не может оказывать влияния на временную кинетику излучения. Существенного отличия в кинетике люминесценции поляритонов из области резонанса и из соответствующих точек  $LO$ -фононного повторения обнаружено не было. Это позволяет сделать вывод о том, что диффузия не оказывает заметного влияния на наблюдаемую задержку импульсов резонансной поляритонной люминесценции.

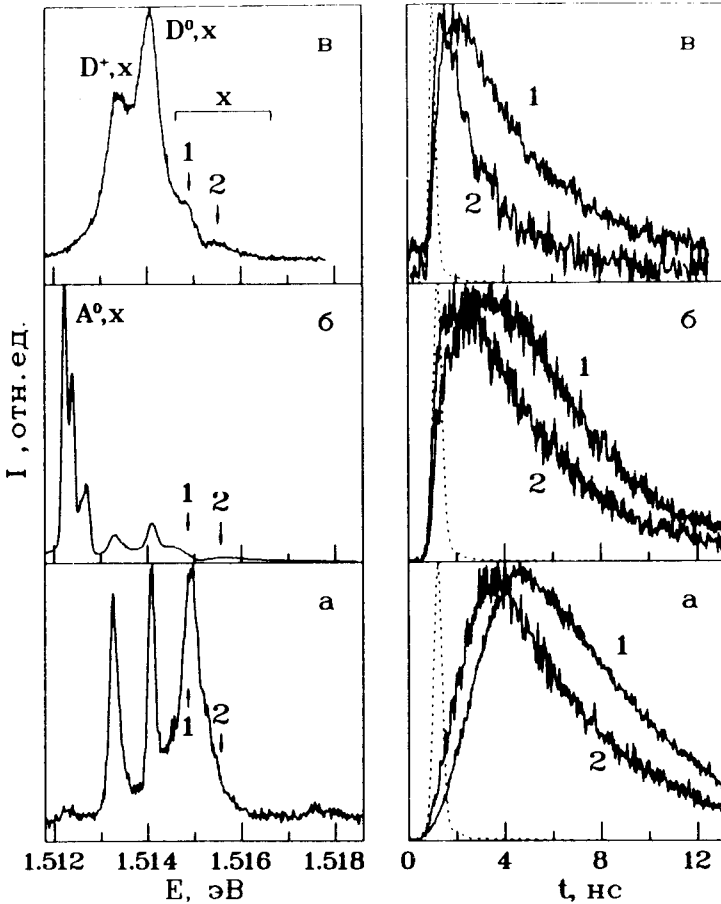


Рис. 1. Спектры (слева) и кинетика (справа) люминесценции различных образцов GaAs: *a* - Г13 ( $N_D \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ); *б* - Y1 (*p*-GaAs,  $N_A \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ); *в* - K88 (*n*-GaAs,  $N_D \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ); энергия возбуждения - 1,554 эВ; пунктир - импульс лазера; кривые 1 и 2 соответствуют импульсам излучения из энергетических состояний нижней и верхней поляритонных ветвей отмеченных на спектрах стрелками 1 и 2

Задержка импульса экситонной люминесценции при межзонном возбуждении наблюдалась в GaAs ранее <sup>9</sup>, однако ее величина была на порядок меньше, чем в настоящей работе. В GaAs основным каналом образования экситонов при возбуждении полупроводника светом с энергией больше ширины запрещенной зоны является связывание холодных носителей заряда в экситоны <sup>10</sup>. Поэтому

задержка может быть вызвана как энергетической релаксацией возбужденных носителей заряда (такая возможность отмечалась в <sup>9</sup>), так и их связыванием в экситоны.

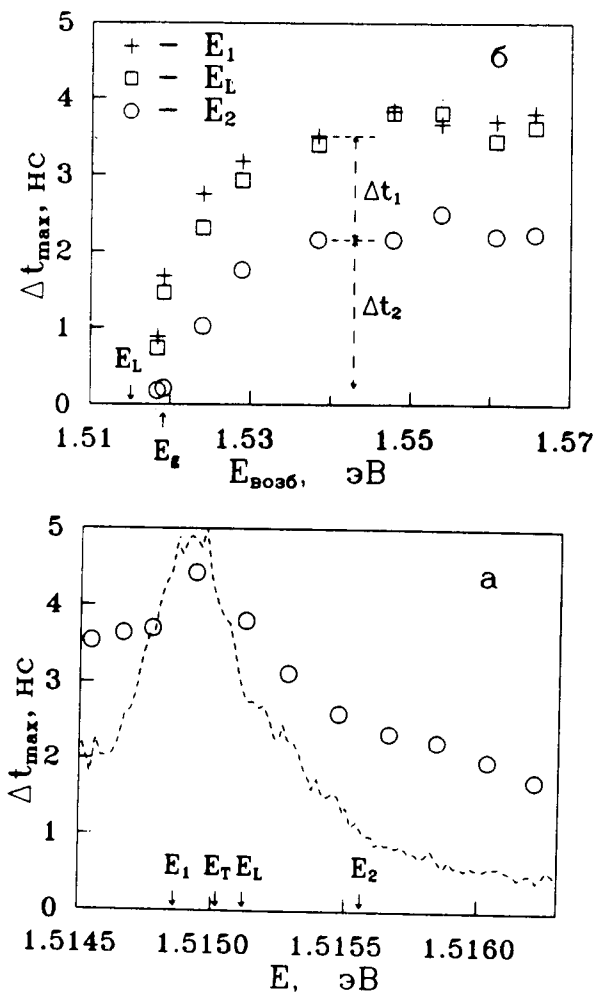


Рис. 2. Зависимость задержки максимума импульса излучения от энергии исследуемой точки в спектре люминесценции (а, энергия возбуждения - 1,554 эВ, пунктир - спектр поляритонной люминесценции) и от энергии возбуждения (б, для трех точек спектра люминесценции, отмеченных на рис. а);  $E_T$  и  $E_L$  - энергии дна зон поперечного и продольного экситонов, соответственно. Образец Г13

Время нарастания импульса поляритонной люминесценции существенным образом зависит от энергии возбуждения (рис. 3). Из рис. 2б видно, что существуют две составляющие задержки максимума люминесценции. Первая почти не зависит от энергии возбуждения и связана с релаксацией экситонов по энергии (характерная величина  $\Delta t_1 \sim 1,5$  нс). Вторая составляющая  $\Delta t_2$  возрастает (примерно на 2 нс) для всех энергий люминесценции при увеличении энергии возбуждения выше ширины запрещенной зоны  $E_g$  и отражает релаксацию электронов по энергии. В то же время значения  $\Delta t_{max}$  для импульса люминесценции поляритонов верхней ветви при возбуждении в край зоны и в возбужденное состояние экситона  $n = 2$  (экспериментальные точки, соответствующие двум минимальным значениям энергии возбуждения

на рис. 2б) почти не отличаются, что свидетельствует о незначительности вклада процесса непосредственного образования экситона в задержку импульса поляритонной люминесценции.

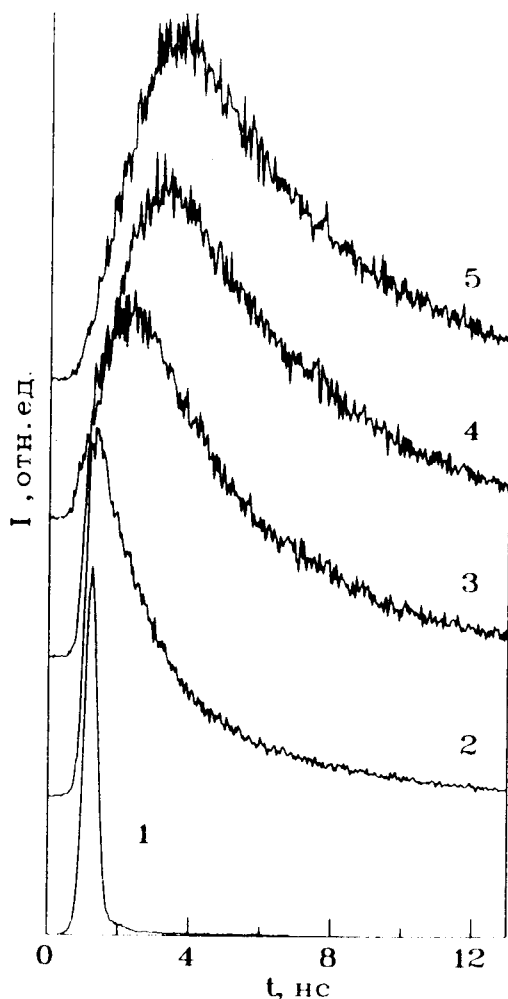


Рис. 3. Кинетика люминесценции из состояний верхней поляритонной ветви (энергия люминесценции 1,5156 эВ) при различных энергиях возбуждения: 2 - 1,520 эВ; 3 - 1,524 эВ; 4 - 1,538 эВ; 5 - 1,554 эВ; 1 - импульс лазера. Образец Г13

Как видно из рис. 1 время нарастания импульса поляритонной люминесценции меняется от образца к образцу. В сверхчистом материале основным механизмом энергетической релаксации электронов с энергией меньше энергии оптического фонона является релаксация на акустических фононах, которая ввиду малой эффективной массы электронов в GaAs весьма медленна (по оценкам <sup>11</sup> для температуры электронов  $T_e = 10\text{K}$  скорость их энергетической релаксации на акустических фононах в GaAs составляет величину  $S = 0,1$  мэВ/нс). С увеличением концентрации мелких примесей наблюдается существенное уменьшение времени задержки максимума импульса поляритонной люминесценции. Это свидетельствует об ускорении энергетической релаксации электронов, например, вследствие неупругого рассеяния на примесях. Отметим, что в образце *n*-типа (рис. 1а) время нарастания люминесценции существенно меньше, чем в образце *p*-типа со сравнимой кон-

центрацией мелких примесей (рис. 1б). Это естественно, так как наибольший вклад в энергетическую релаксацию электронов следует ожидать от процессов неупругого рассеяния на мелких донорах.

### Литература

1. Голубев В.Г., Жияев Ю.В., Иванов-Омский В.И. и др. ФТП, 1987, 21, 1771.
  2. Жияев Ю.В., Маркарян Г.Р., Россин В.В. и др. ФТТ, 1986, 28, 2688.
  3. Toyozawa J. Suppl. Progr. Theor. Phys., 1959, 12, 111.
  4. Wiesner P., Heim U. Phys. Rev. B, 1975, 11, 3071.
  5. Askary F., Yu P.Y. Phys. Rev. B, 1983, 28, 6165.
  6. Аавиксоо Я.Ю., Липпмаа Я.Э., Фрейберг А.М., Савихин С.Ф. ФТТ, 1989, 31, 203.
  7. 't Hooft G.W., van der Poel W.A.J.A., Molenkamp L.W., Foxon C.T. Phys. Rev. B, 1987, 35, 8281.
  8. Steiner T., Thewalt M.L.W., Koteles E.S., Salerno J.P. Phys. Rev. B., 1986, 34, 1006.
  9. Weisbuch C. Solid St. Electr., 1978, 21, 179.
  10. Hoger R., Gobel E.O., Kuhl J. et al. J. Phys. C, 1984, 17, L905.
  11. Ulbrich R. Phys. Rev. B, 1973, 8, 5719.
-