

## НЕОДНОРОДНОЕ УШИРЕНИЕ ПОЛОСЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ В КРИСТАЛЛАХ ZnSe

Р. Балтрамеюнас, А. Жукаускас, В. Стяпанкявичюс

Развитие представлений о природе размытия спектра излучения электронно-дырочной плазмы (ЭДП) связано с моделями разогрева неравновесных носителей заряда (ННЗ) за счет избыточной энергии фотозвозбуждения [1], быстрой диффузии [2], усиления оптических колебаний решетки кристалла [3], нарушения правила отбора по квазимпульсу при межзонных переходах [4], межэлектронного взаимодействия [5], в том числе с участием коллективных колебаний плазмы и связанных плазмон-фононных мод [6, 7]. В [8] на примере кристалла CdSe впервые был достоверно продемонстрирован случай уширения коротковолнового и длинноволнового крыльев полосы люминесценции ЭДП соответственно за счет механизмов разогрева электронов и усиления длинноволновых оптических фононов. Целью настоящей работы был поиск новых экспериментальных данных, свидетельствующих, что подобная ситуация в кристаллах группы  $A^2B^6$  не является единственно возможной. Здесь представлены результаты исследования высокотемпературной люминесценции ZnSe возбуждаемого светом с изменяемой энергией кванта и установлено, что уширение полосы ЭДП обусловливается как разогревом неравновесных квазичастиц, так и многочастичным взаимодействием в плазме.

Эксперимент проводился по методике, описанной в [8], с той разницей, что для перекрытия спектрального диапазона  $h\nu_0 \geq E_g$  ( $2.7 \div 2.9$  эВ,  $h\nu_0$  — энергия кванта возбуждения,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны) в качестве источника накачки использовался лазер на кумариновых красителях, конвертирующий излучение 3-й гармоники лазера на АИГ:  $Nd^{3+}$  (длительность импульса 10 нс). Пучок возбуждающего света фокусировался на свежесколотую поверхность кристалла ZnSe в пятно диаметром 70 мкм, при этом максимальная плотность потока квантов накачки составляла  $I_0 = 1 \cdot 10^{25}$  см $^{-2}$  · с $^{-1}$  ( $\approx 4.5$  МВт · см $^{-2}$ ). Исследовались монокристаллы ZnSe, выращенные из расплава. В спектрах люминесценции изученных образцов при высоких уровнях накачки преобладала одна полоса с типичными признаками рекомбинационного излучения ЭДП: положение максимума находится вблизи  $E_g$ , коротковолновый край отражает больцмановский энергетический спектр ННЗ, люкс-интенсивная характеристика переходит от квадратичной к линейной с ростом уровня возбуждения. На рис. 1 показано несколько спектров люминесценции одного из исследованных образцов. При адиабатическом возбуждении электронно-дырочных пар ( $h\nu_0 = E_g + 3k_B T = 2.766$  эВ,  $T$  — температура решетки, равная 295 К) форма коротковолнового крыла спектров не чувствительна к уровню накачки (спектры 1 и 2), производная контура спектров в области  $h\nu > E_g$  с высокой точностью отражает температуру решетки (кривая 2 на рис. 2)

с указанием на сохранение правила k-отбора при межзонных переходах и на незначительное по отношению к энергии  $k_B T$  уширение одноэлектронных состояний [8]. При инжекции в кристалл быстрых электронов ( $h\nu_0 = 2.9$  эВ, спектры 3 и 4 на рис. 1) повышение уровня накачки приводит к разогреву ЭДП, что обусловлено диссипацией избыточной энергии в электронной подсистеме кристалла (кривая 1 на рис. 2). Подобная реакция формы коротковолнового крыла полосы ЭДП на варьирование энергии кванта возбуждения и скорости генерации ННЗ является характерной и для других исследованных образцов. В то же время чувствитель-

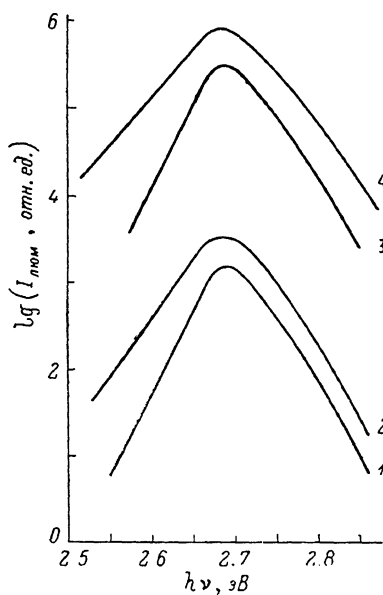


Рис. 1. Спектры люминесценции кристалла ZnSe при различных уровнях накачки и энергиях кванта возбуждения (шкала интенсивностей каждого спектра произвольно сдвинута).

I: 1, 3 — 0.0126  $I_0$ ; 2, 4 —  $I_0$ ;  $h\nu_0$ , эВ: 1, 2 — 2.766; 3, 4 — 2.9.

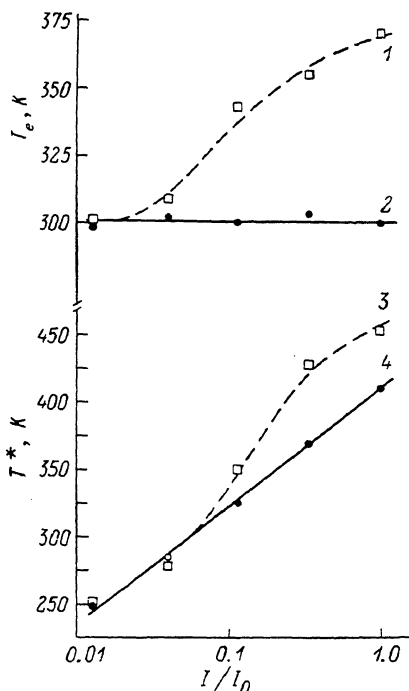


Рис. 2. Зависимость эффективной температуры ННЗ (1, 2) и произвольной логарифмированной длинноволнового крыла полосы ЭДП (3, 4) от уровня накачки.

$h\nu$ , эВ: 1, 3 — 2.9; 2, 4 — 2.766.

ность формы длинноволнового крыла полосы ЭДП к изменению концентрации ННЗ и их эффективной температуры  $T_e$  неодинакова для различных образцов. Так, в спектрах люминесценции, показанных на рис. 1, обратная производная в области  $h\nu < E_g$ , представленная как  $T^* = [k_B \partial \ln I_{lum} / \partial (h\nu)]^{-1}$ , нарастает с увеличением уровня накачки и при резонансном возбуждении (кривая 4 на рис. 2). Повышение энергии кванта возбуждения здесь сопровождается дополнительным уширением длинноволнового крыла полосы (кривая 3 на рис. 2). Вместе с тем в ряде образцов низкоэнергетическое уширение обнаруживалось лишь при разогреве ЭДП и, очевидно, было связано исключительно с усилением оптических фононов, максимальная модовая температура которых была несколько ниже  $T_e$  (как и в [8]).

Таким образом, повышение концентрации холодных ННЗ может уширять спектр излучения ЭДП асимметрично, приводя к возгоранию длинноволнового крыла полосы. Асимметричное уширение и экспоненциальная (урбаховская) форма спектра в области  $h\nu < E_g$  хорошо согласуются с моделью межзонной рекомбинации ННЗ с участием плазмона либо в общем

случае плазмон-фононного колебания [6, 7]. Дополнительное уширение низкоэнергетического крыла полосы ЭДП при  $T_e > T$ , очевидно, происходит в результате усиления плазмон-фононных колебаний в процессе релаксации энергии горячих ННЗ [9]. Плазмонный вклад в уширение полосы ЭДП, по-видимому, стремится к исчезновению в образцах с малым временем релаксации импульса ННЗ. В предельном случае сверхзатухания неравновесного плазмона [10] длинноволновый край полосы не зависит от концентрации ННЗ и обусловлен исключительно фононами [8].

#### Л и т е р а т у р а

- [1] *Shah J.* Sol. St. Electron., 1978, vol. 21, N 1, p. 43—50.
- [2] *Forchel A., Schweizer H., Mahler G.* Phys. Rev. Lett., 1983, vol. 51, N 6, p. 501—504.
- [3] *Meneses E. A., Jannuzzi N., Ramos J. G. P., Luzzi R., Leite R. C. C.* Phys. Rev. B, 1975, vol. 11, N 6, p. 2213—2221.
- [4] *Göbel G.* Appl. Phys. Lett., 1974, vol. 24, N 10, p. 492—494.
- [5] *Haug H., Tran Thoai D. B.* Phys. St. Sol. (b), 1980, vol. 98, N 2, p. 581—589.
- [6] *Brinkmann W. F., Lee P. A.* Phys. Rev. Lett., 1973, vol. 31, N 4, p. 237—240.
- [7] *Müller J. F., Haug H. J.* Lum., 1987, vol. 37, N 2, p. 97—104.
- [8] *Балтрамеюнас Р., Жукаускас А., Тамулайтис Г.* ЖЭТФ, 1986, т. 91, № 5, с. 1909—1916.
- [9] *Collet J., Cornet A., Pagnet M., Amand T.* Sol. St. Commun., 1982, vol. 42, N 12, p. 883—887.
- [10] *Балтрамеюнас Р., Жукаускас А., Тамулайтис Г.* ФТТ, 1986, т. 28, № 5, с. 1576—1577.

Вильнюсский государственный  
университет им. В. Капсукаса  
Вильнюс

Поступило в Редакцию  
7 декабря 1987 г.

УДК 621.315.592

Физика твердого тела, том 30, в. 6, 1988  
Solid State Physics, vol. 30, № 6, 1988

## О СООТНОШЕНИЯХ ОНСАГЕРА ПРИ ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОМ УВЛЕЧЕНИИ

Ю. Г. Гуревич, О. Л. Машкевич

Как известно, для кинетических коэффициентов, связывающих в состояниях, близких к термодинамически равновесным, потоки, стремящиеся возратить систему в равновесие, и силы, их вызывающие [1], выполняются соотношения симметрии. Последние были получены Онсагером [2, 3] из соображений, связанных с обратимостью во времени микроскопических уравнений движения. Линейные уравнения, связывающие потоки с термодинамическими силами, часто записывают и в состояниях, далеких от термодинамического равновесия, например при изучении процессов переноса под действием сильных электрических полей в полупроводниках, когда существенными становятся разогрев (энергетическая неравновесность) и взаимное увлечение (импульсная неравновесность) электронов и фононов с температурами  $T_e$  и  $T_p$  (вообще говоря, не равными друг другу и температуре термостата  $T$ ). Выполнение соотношений Онсагера в этой ситуации не является тривиальным следствием обычного их вывода, поскольку системы сильно неравновесно, т. е. рассматриваемые термодинамические силы стремятся привести ее не к термодинамическому равновесию, а к некоторому динамически устойчивому состоянию. При этом параметры  $T_e$  и  $T_p$ , которые мы называем температурами электронов и фононов, в действительности не являются термодинамическими температурами [4] и определяются из соответствующих