

Структура полосы излучения свободных экситонов в гетероэпитаксиальных слоях ZnSe/GaAs

© Ю.П. Ракович, А.Л. Гурский, А.С. Смаль, А.А. Гладыщук, Х. Хамади, Г.П. Яблонский, М. Хойкен

Брестский политехнический институт,
224000 Брест, Белоруссия

В интервале температур $10 \div 120$ К исследованы экситонные спектры отражения (ЭСО) и фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальных слоев ZnSe/GaAs толщиной $2 \div 4 \mu\text{m}$. Показано, что одной из причин образования дублетной структуры $A_{n=1}$ -полосы ФЛ является интерференция экситонного излучения на границах приповерхностного мертвого слоя.

Тонкая структура (ТС) в спектрах ФЛ свободных экситонов ZnSe/GaAs наблюдается даже когда толщина h слоя ZnSe больше величины, критической для релаксации упругих напряжений, $d_{cr} = 1 \mu\text{m}$ [1]. В образцах с $h \ll d_{cr}$ нагружения, вызванные рассогласованием решеток слоя и подложки, приводят к расщеплению валентной зоны ZnSe и к формированию ТС как в ЭСО, так и в спектрах ФЛ [2]. Образование ТС в спектрах ФЛ толстых слоев ZnSe объяснялось влиянием напряжений, возникающих при охлаждении образцов от температуры роста из-за различия коэффициентов теплового расширения ZnSe и GaAs [3] или поляритонными эффектами [4,5]. Однако, эти точки зрения не позволяют объяснить температурное поведение спектрального положения компонент ТС, их аномально малую ширину, а также отсутствие ТС в ЭСО.

В настоящей работе исследовано температурное изменение контуров ЭСО и ФЛ ZnSe/GaAs с толщиной эпитаксиального слоя $h > 1 \mu\text{m}$ для выяснения механизма формирования ТС в спектрах ФЛ.

1. Экспериментальная техника и образцы

Образцы ZnSe с удельным сопротивлением $10^{10} \div 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ были выращены методом MOVPE на подложке GaAs (110) при температуре $330 \div 480^\circ\text{C}$ [6]. ФЛ возбуждались He-Cd лазером ($\lambda_{\text{exc}} = 325.0 \text{ nm}$, интенсивностью возбуждения $I_{\text{exc}} \sim 0.02 \div 10 \text{ W/cm}^2$). Спектральное разрешение регистрирующей установки было меньше 0.3 meV .

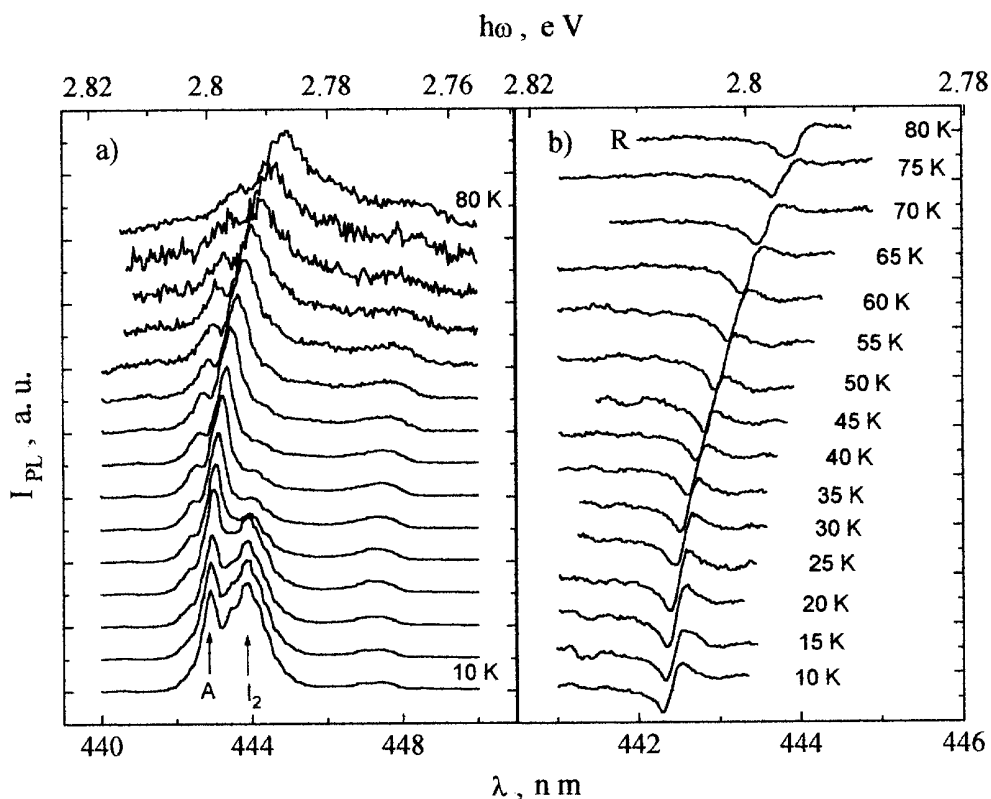


Рис. 1. Спектры ФЛ (a) и отражения (b) эпитаксиального слоя ZnSe толщиной $h = 4 \mu\text{m}$ при изменении температуры.

2. Обсуждение результатов

В спектрах ФЛ при $T = 10$ К наблюдается резко выраженная линия $2.799\text{--}2.800$ eV с полушириной ~ 3 meV (рис. 1). С ростом температуры на ее коротковолновом крыле возникает дублетная структура, спектральное расстояние между компонентами которой слабо возрастает. При этом в соответствующих спектрах отражения какая-либо ТС отсутствует. Спектральное положение провала в спектре ФЛ при всех температурах точно соответствует энергии экситонного резонанса, определенной из сравнения экспериментально измеренных ЭСО с расчетом по модели мертвого слоя [7,8]. Указанные особенности формирования ТС спектров ФЛ при сохранении формы ЭСО нельзя объяснить влиянием термоупругих напряжений или поляритонных эффектов, поскольку ТС сохраняется вплоть до 150 К. Ранее подобная структура наблюдалась в спектрах ФЛ монокристаллов $A^{II}B^{VI}$ [9–18], для расчета которых использовалась модель диффузии экситонов с учетом самопоглощения их излучения [9,19,20]. Однако согласие с экспериментом было получено только для предельно больших значений диффузионной длины L_D (несколько микрометров [9]). Наши расчеты спектров ФЛ ZnSe/GaAs по этой модели [18], дали $L_D \sim 8 \div 10$ μm , что превосходит толщину слоя ZnSe (4 μm).

Более достоверные результаты были получены при учете интерференции излучения свободных экситонов на границах приповерхностного мертвого слоя. В данной модели коэффициент отражения экситонного излучения, падающего изнутри на поверхность слоя, рассчитывался

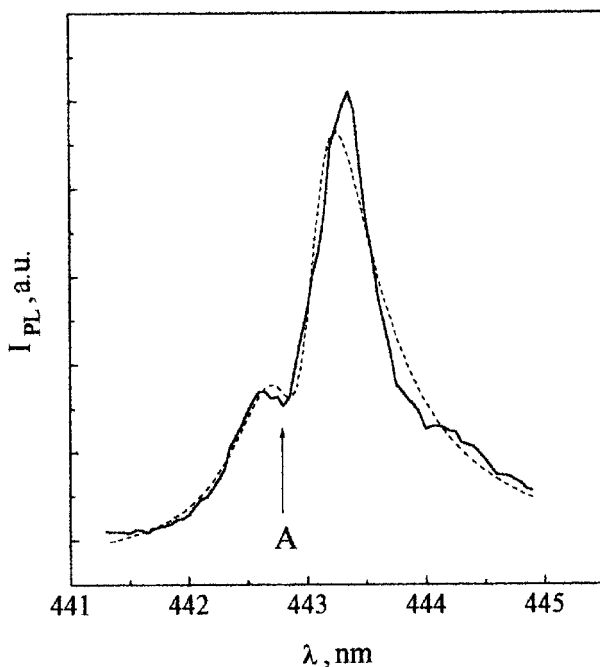


Рис. 2. Экспериментальный (сплошная кривая) и рассчитанный (штриховая кривая) спектры фотолюминесценции свободных экситонов ZnSe/GaAs при $T = 45$ К.

по методике, аналогичной [7], и затем использовался для расчета спектра ФЛ [18,21]. На рис. 2 приведены результаты расчета спектра, измеренного при $T = 45$ К, с коэффициентом диффузии $D = 0.03$ cm^2/s и временем жизни экситонов $\tau = 150 \div 200$ ps, что дает для диффузионной длины значение $L_D = 0.67 \div 0.77$ μm и хорошо согласуется с результатами других авторов для ZnSe/GaAs: $\tau = 100 \div 150$ ps. Однако толщина мертвого слоя d_{eff} существенно превышает значение, полученное из соответствующего ЭСО: $d_{\text{eff}} = 29$ и 7 nm соответственно.

Поскольку величина d_{eff} зависит от электрического поля на поверхности [10], наиболее вероятной причиной такого расхождения может быть возрастание поверхностного заряда под действием лазерного излучения при возбуждении ФЛ, например, за счет захвата на поверхностные центры фотогенерированных носителей заряда или адсорбции кислорода [18]. Для проверки этого предположения были выполнены измерения ЭСО при $T = 80$ К в условиях лазерной засветки поверхности образца. Оказалось, что под действием подсветки наблюдается сильная трансформация ЭСО (вплоть до полного переворота контура), обусловленная изменением мертвого слоя ($d_{\text{eff}} = 47$ nm при подсветке и $d_{\text{eff}} = 4$ nm без нее), которая исчезает после выключения лазера. Полученное значение d_{eff} позволяет приближенно оценить поверхностное поле F_s и соответствующую плотность заряженных состояний n_s [10]. При возбуждении ФЛ He–Cd лазером с $I_{\text{exc}} = 0.1$ W/cm^2 при $T = 80$ К и пороговой ионизации экситонов $F_{cr} \approx 50$ kV/cm [23,24] получим $F_s \approx F_{cr}$ и $n_s \approx 2 \cdot 10^{11}$ cm^{-2} .

Список литературы

- [1] H. Mitsuhashi, I. Mitsuishi, M. Mizuta. Jph. J. Appl. Phys. **24**, L578 (1985).
- [2] J. Gutowski, N. Presser, G. Kudlek. Phys. Stat. Sol. (a) **120**, 11 (1988).
- [3] G. Kudlek, J. Gutowski, J. Lumin. **52**, 55 (1992).
- [4] G.-J. Yi, L. Radomsky, G.F. Neumark. J. Cryst. Growth **138**, 208 (1994).
- [5] Б.В. Новиков, А.Б. Павлов, В.Г. Талалаев. ФТТ **23**, 1, 207 (1981).
- [6] A.L. Gurskii, A.N. Gavrilenko, E.V. Iutsenko. Phys. Stat. Sol. (b) **193**, 257 (1996).
- [7] J.J. Hopfield, D.G. Thomas. Phys. Rev. **132**, 563 (1963).
- [8] В.А. Киселев, Б.В. Новиков, А.Е. Чередниченко. Экситонная спектроскопия приповерхностной области полупроводников. Изд-во ЛГУ, Л. (1987). 160 с.
- [9] В.В. Травников, В.В. Криволапчук. ФТТ **24**, 4, 961 (1982).
- [10] Б.В. Новиков, Х. Роппишер, В.Г. Талалаев. ФТТ **3**, 3, 817 (1979).
- [11] К.Ф. Лидер, Б.В. Новиков. Опт. и спектр. **23**, 6, 611 (1967).
- [12] R. Garuthara, M. Tomkiewicz. Phys. Rev. **B31**, 7844 (1985).
- [13] V. Sermage, M. Voos. Phys. Rev. **B15**, 3935 (1977).
- [14] М.С. Бродин, П.С. Кособутский, М.Г. Мацко. УФЖ **25**, 1220 (1980).

- [15] П.С. Кособутский. УФЖ **22**, 980 (1977).
- [16] М.С. Бродин, М.Г. Мацко. Письма в ЖЭТФ **30**, 571 (1979).
- [17] M.S. Brodin, M.G. Matsko. Solid State Commun. **35**, 375 (1980).
- [18] Yu.P. Rakovich, G.P. Yablonskii, A.A. Gladyshchuk. Phys. Stat. Sol. (b) **189**, 2247 (1995).
- [19] W.C. Tait, R.L. Weiher. Phys. Rev. **178**, 1404 (1969).
- [20] В.В. Криволапчук, С.А. Пермогоров, В.В. Травников. ФТТ **23**, 2, 606 (1981).
- [21] М. Агранович. Теория экситонов. Наука, М. (1968). С. 319.
- [22] J. Gutovski, A. Hoffmann. Adv. Mater. Opt. Electron. **3**, 15 (1994).
- [23] A. D'Andrea, R. Del Sole. Phys. Rev. **B25**, 3714 (1982).
- [24] V.A. Sashenko, V.A. Tjagai. Phys. Stat. Sol. (b) **88**, 797 (1978).