

УДК 538.958

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАНТОВЫХ ЯМ GaN/AlN

© И. А. Александров<sup>1</sup>, Т. В. Малин<sup>1</sup>, Д. Ю. Протасов<sup>1</sup>,  
В. Pecz<sup>2</sup>, К. С. Журавлев<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13<sup>2</sup>Institute for Technical Physics and Materials Science,  
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33, Hungary  
E-mail: alexsandrov@isp.nsc.ru

Исследована фотолюминесценция структур с множественными квантовыми ямами GaN/AlN, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Проведено сравнение расчётной зависимости энергии максимума полосы фотолюминесценции квантовых ям от толщины слоя GaN с экспериментом для различных отношений толщин слоёв GaN и AlN. Толщины слоёв GaN и AlN определялись методом просвечивающей электронной микроскопии. Расчёты энергии максимума полосы фотолюминесценции проводились в 6-зонном **кр**-приближении с учётом спонтанной и пьезоэлектрической поляризации. По результатам расчёта при увеличении отношения толщины слоя GaN к толщине слоя AlN наклон зависимости энергии излучения от толщины слоя GaN уменьшается в соответствии с уменьшением напряжённости электрического поля в слое GaN. В квантовых ямах достаточно большой толщины наблюдается увеличение энергии максимума полосы излучения по сравнению с расчётом для нелегированных структур из-за ненамеренного легирования квантовых ям, приводящего к экранированию встроенного электрического поля.

*Ключевые слова:* квантовые ямы, GaN, AlN, фотолюминесценция, просвечивающая электронная микроскопия.

DOI: 10.15372/AUT20210511

**Введение.** Множественные квантовые ямы (МКЯ) GaN/AlN перспективны для применения в качестве базовых материалов для светоизлучающих устройств, работающих в ультрафиолетовой спектральной области [1], высокоскоростных инфракрасных оптических модуляторов [2], оптических переключателей [3] и инфракрасных фотоприёмников на внутризонных переходах [4]. Спонтанная и пьезоэлектрическая поляризация в квантовых ямах GaN со структурой вюрцита, выращенных в направлении [0001], приводит к наличию встроенного электрического поля [5–7], которое является причиной сильной зависимости энергии максимума полосы люминесценции от толщины квантовой ямы [8–10]. Напряжённость встроенного электрического поля в слое GaN структуры с МКЯ GaN/AlN зависит от толщин слоёв GaN и AlN, упругих деформаций, а также от концентрации носителей заряда, созданных легирующими примесями [7, 11]. Определение влияния данных факторов на энергетический спектр структур с МКЯ GaN/AlN важно для управления их оптическими свойствами.

В данной работе проведено сравнение экспериментальной зависимости положения максимума фотолюминесценции (ФЛ) МКЯ GaN/AlN от толщин слоёв GaN и AlN, определённых методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), с теоретическими расчётами зависимости положения максимума ФЛ МКЯ GaN/AlN от толщины слоя GaN для различных отношений толщин слоёв GaN и AlN.

**Детали эксперимента.** Структуры с МКЯ GaN/AlN были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на (0001) сапфировых подложках. На подложке выращивался буферный слой AlN толщиной около 200 нм при температуре подложки 1000 °С, на

Таблица 1

**Параметры роста структур с множественными квантовыми ямами GaN/AlN**

Образец	Количество слоёв GaN	Температура подложки при росте слоёв GaN и AlN (°C)	Поток NH <sub>3</sub> (sccm)	Эквивалентное давление потока Ga при росте слоёв GaN (Торр)	Эквивалентное давление потока Al при росте слоёв AlN (Торр)	Время роста слоя GaN (с)	Время роста слоя AlN (с)
A	130	830	200	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$	24	34
B	173	830	200	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$	18	25
C	260	830	200	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-8}$	12	17

котором выращивалось от 130 до 260 слоёв GaN, закрытых слоями AlN. Рост квантовых ям GaN/AlN проводился при потоке аммиака 200 sccm и температуре подложки 830 °C. Параметры роста исследуемых структур показаны в табл. 1.

Толщины слоёв GaN и AlN в исследуемых структурах определялись методом просвечивающей электронной микроскопии. Спектры фотолюминесценции структур с квантовыми ямами GaN/AlN измерялись с использованием спектрометра Acton SP2500i и охлаждаемой жидким азотом ПЗС-матрицы. Фотолюминесценция возбуждалась излучением непрерывного Nd:YAG-лазера с энергией фотона 4,66 эВ. Мощность возбуждающего излучения составляла 4 мВт, диаметр лазерного пятна на образце — около 1 мм.

**Результаты и обсуждение.** Изображения исследуемых структур, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии в режиме высокого разрешения, и профили яркости вдоль оси роста для этих изображений показаны на рис. 1. Из изображений ПЭМ были определены толщины слоёв GaN и AlN (табл. 2).

На рис. 2, *a* показаны спектры ФЛ исследуемых структур с МКЯ GaN/AlN, измеренные при комнатной температуре. Положение максимума полосы фотолюминесценции МКЯ увеличивается от 3,37 до 3,71 эВ при уменьшении толщины слоя GaN от 3,8 до 1,8 нм. Расчёт зависимости энергии максимума полосы ФЛ МКЯ от толщины слоя GaN проводился в 6-зонном **кp**-приближении с учётом деформации и встроенного электрического поля, вызванного спонтанной и пьезоэлектрической поляризациями. В расчёте использованы параметры материалов из работы [12]. На рис. 2, *b* линиями показаны расчётные зависимости энергии максимума полосы ФЛ GaN/AlN МКЯ от толщины слоя GaN для различных отношений толщин слоёв AlN и GaN. Точками показаны экспериментальные данные для исследуемых структур.

Расчёт показывает, что при увеличении отношения толщины слоя GaN к толщине слоя AlN наклон зависимости энергии максимума полосы ФЛ МКЯ от толщины слоя GaN уменьшается, что вызвано уменьшением величины встроенного электрического поля. Это связано с перераспределением полей, вызванных спонтанной поляризацией, между слоями GaN и AlN. При уменьшении отношения толщины слоя AlN к толщине слоя GaN происхо-

Таблица 2

**Толщины слоёв в структурах с множественными квантовыми ямами GaN/AlN по данным просвечивающей электронной микроскопии**

Образец	Толщина слоя GaN, нм	Толщина слоя AlN, нм
A	3,8	1,8
B	3,6	1,7
C	1,8	1,3

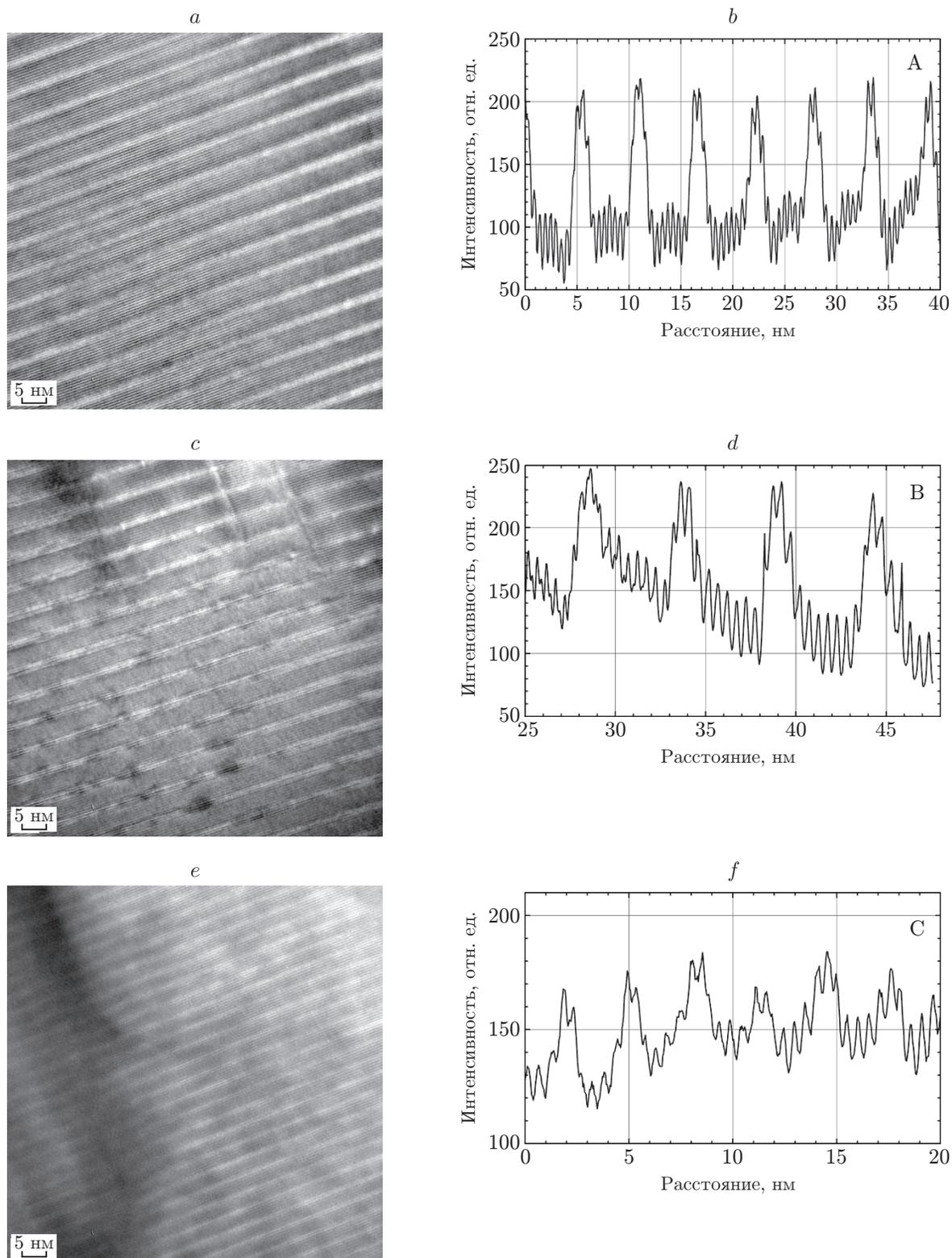


Рис. 1. Просвечивающая электронная микроскопия МКЯ GaN/AlN: изображения ПЭМ в режиме высокого разрешения (*a*, *c*, *e*) и профили яркости этих изображений вдоль оси роста (*b*, *d*, *f*) для образцов А, В и С соответственно

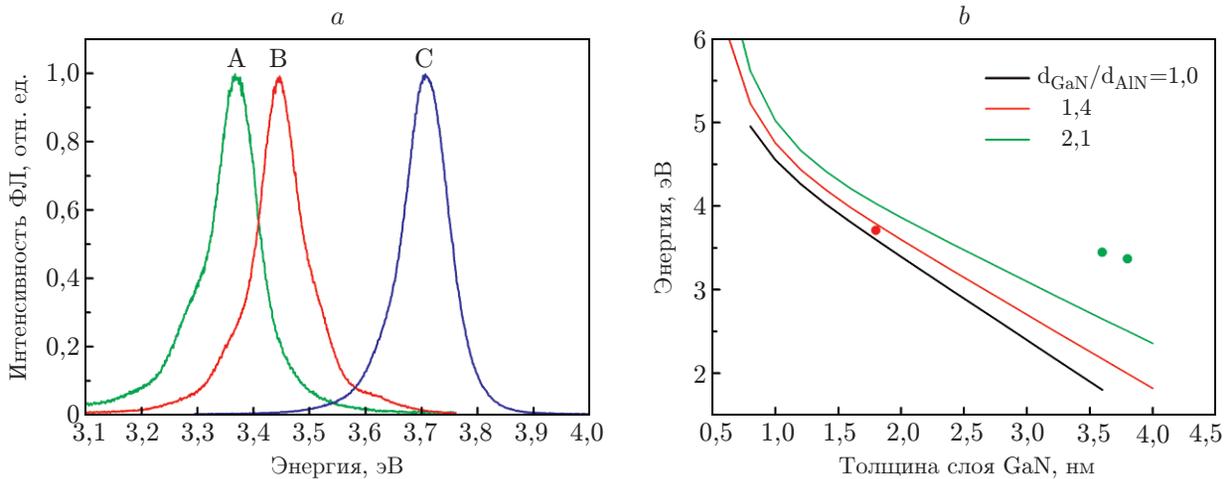


Рис. 2. Фотолюминесценция структур с множественными квантовыми ямами GaN/AlN: спектры ФЛ структур GaN/AlN (образцы А, В и С с толщинами слоёв GaN/AlN 3,8/1,8, 3,6/1,7 и 1,8/1,3 нм соответственно), нормированные на максимум интенсивности (а); зависимость энергии максимума полосы ФЛ от толщины слоя GaN (точки — экспериментальные данные для образцов А, В и С, сплошные кривые — расчёт для различных отношений толщин слоёв GaN и AlN) (b)

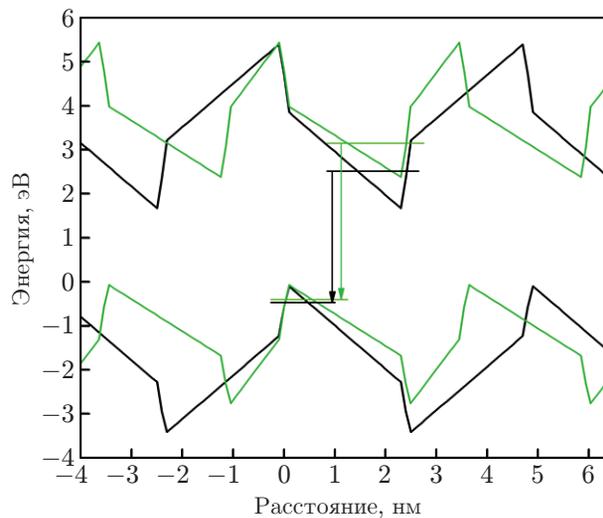


Рис. 3. Расчётные энергетические диаграммы для МКЯ GaN/AlN с толщинами слоёв GaN/AlN 2,4/2,4 и 2,4/1,1 нм. Стрелками показаны оптические переходы между основными состояниями электрона и дырки в квантовых ямах

дит увеличение напряжённости поля в слое AlN из-за сближения заряженных гетерограниц и соответственно уменьшение напряжённости поля в слое GaN (рис. 3). Для достаточно узких квантовых ям расчёт хорошо описывает эксперимент, а для квантовых ям толщиной более 3 нм наблюдается более высокая энергия максимума полосы ФЛ по сравнению с расчётной. Полагаем, что это связано с ненамеренным легированием квантовых ям, приводящим к экранированию встроенного электрического поля в квантовых ямах достаточно большой толщины. Данное предположение подтверждается результатами измерений концентрации носителей заряда с помощью эффекта Холла. По результатам измерений для МКЯ с толщиной слоя GaN 3,8 нм двумерная концентрация электронов при комнатной температуре составляет  $10^{11}$  см<sup>-2</sup> в каждом слое GaN.

**Заключение.** Таким образом, в представленной работе исследована зависимость положения максимума фотолюминесценции структур с множественными квантовыми ямами GaN/AlN от толщины слоя GaN и отношения толщины слоя GaN к толщине слоя AlN. Расчёт в 6-зонном **кр**-приближении показывает, что при увеличении отношения толщины слоя GaN к толщине слоя AlN наклон зависимости энергии максимума полосы ФЛ от толщины слоя GaN уменьшается из-за перераспределения полей, вызванных спонтанной поляризацией, между слоями GaN и AlN. Для достаточно узких квантовых ям расчёт хорошо описывает эксперимент, а для квантовых ям толщиной более 3 нм наблюдается более высокая энергия максимума полосы излучения по сравнению с расчётом. Полагаем, что это связано с ненамеренным легированием квантовых ям, приводящим к экранированию встроенного электрического поля носителями заряда в квантовых ямах достаточно большой толщины.

**Финансирование.** Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФП СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kneissl M., Seong T.-Y., Han J., Amano H.** The emergence and prospects of deep-ultraviolet light-emitting diode technologies // *Nat. Photon.* 2019. **13**, Iss. 4. P. 233-244.
2. **Beeler M., Trichas E., Monroy E.** III-nitride semiconductors for intersubband optoelectronics: A review // *Semicond. Sci. Technol.* 2013. **28**, N 7. P. 074022.
3. **Dawlaty J. M., Rana F., Schaff W. J.** Ultrafast all-optical switches based on intersubband transitions in GaN/AlN multiple quantum wells for Tb/s operation // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 2005. **831**. P. E7.3.1.
4. **Hofstetter D., Baumann E., Giorgetta F. R. et al.** Photodetectors based on intersubband transitions using III-nitride superlattice structures // *Journ. Phys.: Condens. Matter.* 2009. **21**, N 17. P. 174208.
5. **Bernardini F., Fiorentini V., Vanderbilt D.** Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides // *Phys. Rev. B.* 1997. **56**, Iss. 16. R10024(R).
6. **Leroux M., Grandjean N., Laugt M. et al.** Quantum confined Stark effect due to built-in internal polarization fields in (Al,Ga)N/GaN quantum wells // *Phys. Rev. B.* 1998. **58**, Iss. 20. R13371.
7. **Florentini V., Bernardini F., Della Sala F. et al.** Effects of macroscopic polarization in III-V nitride multiple quantum wells // *Phys. Rev. B.* 1999. **60**, Iss. 20. P. 8849.
8. **Adelmann C., Sarigiannidou E., Jalabert D. et al.** Growth and optical properties of GaN/AlN quantum wells // *Appl. Phys. Lett.* 2003. **82**, Iss. 23. P. 4154.
9. **Furis M., Cartwright A. N., Wu H., Schaff W. J.** Room-temperature ultraviolet emission from GaN/AlN multiple-quantum-well heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* 2003. **83**, Iss. 17. P. 3486.

10. **Tchernycheva M., Nevou L., Doyennette L. et al.** Systematic experimental and theoretical investigation of intersubband absorption in GaN/AlN quantum wells // Phys. Rev. B. 2006. **73**, Iss. 12. P. 125347.
11. **Leroux M., Grandjean N., Massies J. et al.** Barrier-width dependence of group-III nitrides quantum-well transition energies // Phys. Rev. B. 1999. **60**, Iss. 3. P. 1496.
12. **Aleksandrov I. A., Zhuravlev K. S.** Energy structure and radiative lifetimes of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$  quantum dots // Superlattices and Microstructures. 2018. **113**. P. 373–378.

*Поступила в редакцию 01.09.2021*

*После доработки 08.09.2021*

*Принята к публикации 13.09.2021*

---