

# Влияние дефектов на кинетику фотолюминесценции структур с квантовыми точками GaN/AlN

© И.А. Александров, К.С. Журавлев\*, В.Г. Мансуров

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

\* Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: Aleksandrov@isp.nsc.ru

(Получена 12 мая 2015 г. Принята к печати 18 мая 2015 г.)

Исследовано влияние дефектов в барьере AlN на кривые затухания фотолюминесценции структур с квантовыми точками GaN в матрице AlN после импульсного возбуждения. В кривых затухания структур с квантовыми точками обнаружен начальный участок быстрого затухания фотолюминесценции. Сравнение кривых затухания фотолюминесценции структур с квантовыми точками и слоев AlN без квантовых точек показало, что этот участок связан с вкладом полосы фотолюминесценции дефектов матрицы AlN.

## 1. Введение

Низкоразмерные структуры на основе нитридов элементов III группы представляют значительный интерес благодаря их возможным практическим применениям. В частности, структуры с квантовыми точками (КТ), сформированные в матрице AlN, применимы для светоизлучающих диодов и лазерных диодов ультрафиолетового и видимого диапазона. Высокоэнергетические барьеры в КТ обеспечивают сильную локализацию носителей заряда и предотвращают безызлучательные потери носителей из КТ даже при повышенных температурах. Тем не менее глубокие уровни вблизи КТ действуют как безызлучательные центры или ловушки [1–3]. Эти уровни влияют на время жизни носителей, локализованных в КТ, что приводит к уменьшению интенсивности ФЛ и спектральной диффузии линий ФЛ отдельных КТ [3]. Нитридные структуры, выращенные на несобственных подложках, обычно имеют большую плотность структурных дефектов. Эти дефекты, так же как и фоновые примеси, такие как кислород и углерод, создают глубокие уровни. Глубокие уровни, связанные с пронизывающими краевыми дислокациями, являются основным каналом безызлучательной рекомбинации в структурах с КТ GaN/AlN.

Дефекты в AlN изучены слабо, и их теоретическое и экспериментальное исследование в настоящее время активно развивается [4–8]. Люминесценция дефектов в AlN может перекрываться с люминесценцией КТ. В данной работе мы исследовали влияние дефектов в барьере AlN на кинетику ФЛ структур с КТ GaN/AlN. Было обнаружено, что кривые затухания ФЛ таких структур могут иметь относительно быстрый начальный участок ФЛ. Для определения причины быстрого затухания ФЛ были исследованы спектры ФЛ и кривые затухания ФЛ структур с КТ, слоев AlN и сапфировых подложек.

## 2. Детали эксперимента

Структуры с КТ GaN/AlN были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием аммиака в качестве источника азота в установке CBE-32 Riber. Структуры содержат буферный слой AlN толщиной 150 нм на сапфировой подложке и 10 слоев квантовых точек GaN, закрытых слоями AlN толщиной 10 нм. Формирование квантовых точек GaN контролировалось методом дифракции быстрых электронов на отражение [9]. Номинальное количество осажденного GaN варьировалось от 3 до 15 монослоев. Также исследовались слои AlN без квантовых точек и сапфировая подложка. Условия роста слоев с КТ и слоев AlN представлены в табл. 1 и 2.

Возбуждение фотолюминесценции осуществлялось четвертой гармоникой импульсного Nd:YLF-лазера с энергией фотона 4.71 эВ, периодом повторения импульсов 1 кГц, длительностью импульса 3 нс и плотностью энергии в импульсе  $100 \text{ мкДж/см}^2$ , азотным импульсным лазером с энергией фотона 3.68 эВ, частотой повторения импульсов 1 кГц, длительностью импульсов 7 нс и плотностью энергии в импульсе на образце  $460 \text{ мкДж/см}^2$  и непрерывным HeCd-лазером с энергией фотона 3.81 эВ.

## 3. Результаты и обсуждение

Спектры ФЛ квантовых точек различной высоты при возбуждении излучением с энергией фотона 3.81 эВ показаны на рис. 1. Спектры ФЛ содержат яркую полосу, обусловленную рекомбинацией в КТ, с положением максимума, варьирующимся от 2.3 до 2.9 эВ. На рис. 2 показаны спектры ФЛ слоя AlN и сапфировой подложки при возбуждении излучением с энергиями фотонов 3.68, 4.71 эВ и спектр ФЛ КТ при возбуждении излучением с энергией фотона 4.71 эВ. Спектр ФЛ сапфировой подложки содержит слабую полосу ФЛ с максимумом

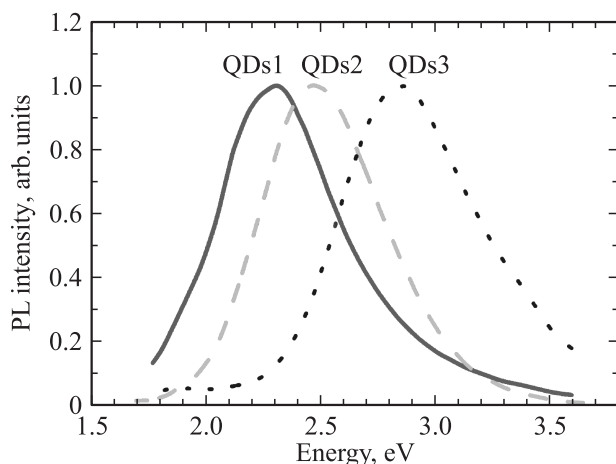
**Таблица 1.** Условия роста структур с квантовыми точками GaN/AlN

Образец	Температура, подложки, °С	Эквивалентное давление потока NH <sub>3</sub> , 10 <sup>-6</sup> Торр	Номинальная толщина GaN, монослоев	Эквивалентное давление потока Al при росте AlN, 10 <sup>-8</sup> Торр	Эквивалентное давление потока Ga при росте GaN, 10 <sup>-6</sup> Торр
QDs1	900	6.5	15	6.6	1.3
QDs2	900	6.5	7.5	6.6	1.3
QDs3	900	6.5	3	6.6	1.3

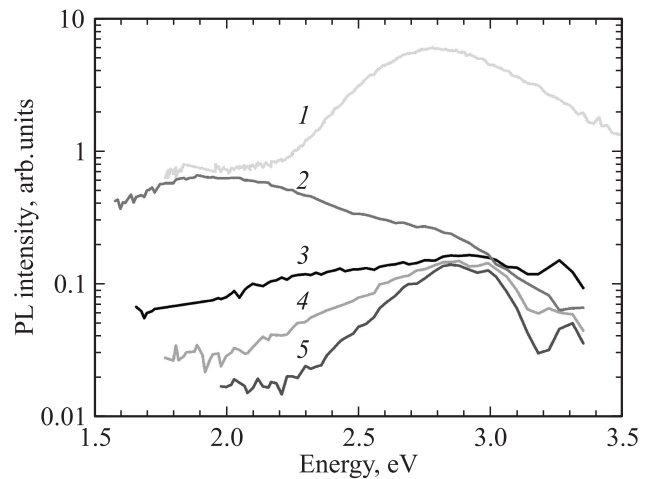
**Таблица 2.** Условия роста слоев AlN

Образец	Толщина AlN, нм	Температура подложки, °С	Эквивалентное давление потока Al, 10 <sup>-8</sup> Торр	Эквивалентное давление потока NH <sub>3</sub> , 10 <sup>-5</sup> Торр
AlN_1	260	1100	14	1.5
AlN_2	243	1100	8.9	1.5
AlN_3	201	1100	3.8	1.5
AlN_4	196	1100	1.9	1.5
AlN_5	412	1100	3.8	1.5

при 2.8 эВ, которая предположительно связана с люминесценцией *F*-центров в сапфире [10]. В спектрах фотолюминесценции слоев AlN, выращенных на сапфировой подложке, наблюдаются две полосы с энергиями максимумов при 2.0 и 2.8 эВ (рис. 2). Полоса ФЛ в AlN при 2.0 эВ была исследована нами ранее в работе [12]. Интенсивность полосы при 2.0 эВ выше при возбуждении излучением с энергией кванта 4.71, чем 3.68 эВ, что согласуется с данными спектроскопии возбуждения [12]. Также из рисунка видно, что интенсивность ФЛ КТ много больше, чем интенсивность ФЛ слоя AlN и сапфировой подложки.

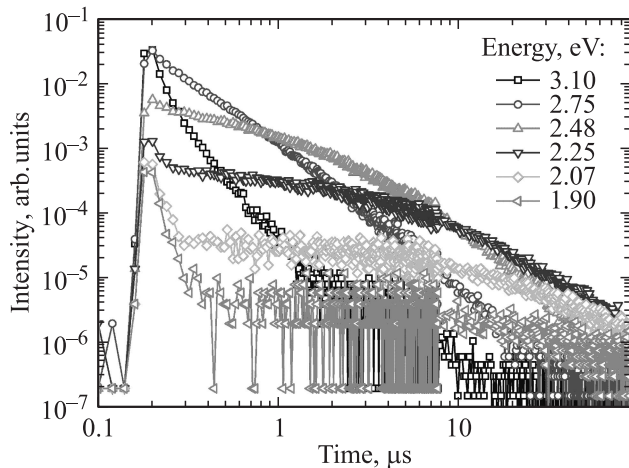


**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции (PL) структур с квантовыми точками GaN/AlN с различным номинальным количеством осажденного GaN: QDs1 — 15 монослоев, QDs2 — 7.5 монослоев, QDs3 — 3 монослоя. Возбуждение непрерывным HeCd-лазером с энергией фотона 3.81 эВ, плотность мощности возбуждения 1 Вт/см<sup>2</sup>. Температура измерений 297 К.

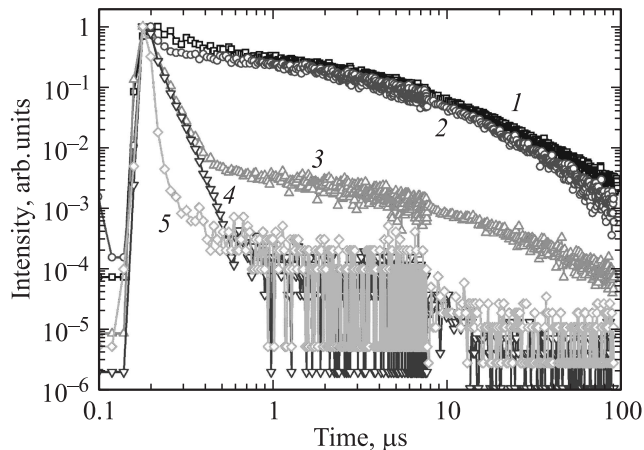


**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции (PL) структуры с квантовыми точками, образец QDs3 (1), слоя AlN, образец AlN\_5 (2, 3), сапфировой подложки (4, 5). Возбуждение светом с энергией фотона 4.71 (1, 2, 4) и 3.68 эВ (3, 5). Температура измерений 297 К.

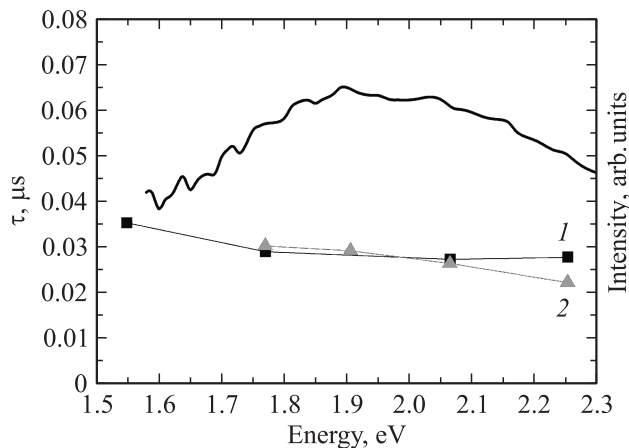
Типичные кривые затухания ФЛ КТ, измеренные в различных точках спектра, показаны на рис. 3. Затухание неэкспоненциально и становится медленнее при увеличении длины волны. Увеличение времени жизни с длиной волны вызвано встроенным электрическим полем, пространственно разделяющим электрон и дырку в КТ. Это поле возникает из спонтанной и пьезоэлектрической поляризации и приводит к сильной зависимости излучательного времени жизни от размера КТ. Нами недавно было показано, что неэкспоненциальный закон затухания обусловлен флуктуациями формы КТ, приводящими к разбросу времени жизни в КТ, излучающих на одной длине волны [11].



**Рис. 3.** Кривые затухания фотолюминесценции образца QDs2 в различных точках спектра (энергии указаны). Энергия фотона возбуждения 4.71 эВ. Температура измерений 297 К.



**Рис. 4.** Кривые затухания фотолюминесценции трех образцов с квантовыми точками QDs1 (1), QDs2 (2), QDs3 (3), слоя AlN (4) и сапфировой подложки (5). Энергия фотона возбуждения 4.71 эВ, энергия регистрации 2.25 эВ. Кривые нормированы на максимум. Температура измерения 297 К.



**Рис. 5.** Начальные времена затухания ФЛ  $\tau$ , полученные аппроксимацией экспонентой начального участка затухания ФЛ для образцов QDs3 (1) и AlN\_5 (2). Показан также спектр фотолюминесценции слоя AlN (сплошная кривая).

В некоторых образцах с КТ кривые затухания имеют быстрый начальный участок затухания ФЛ. Этот участок наблюдался в диапазоне 1.7–2.5 эВ, скорость быстрого спада интенсивности ФЛ слабо менялась вдоль спектра, в отличие от медленного участка кривой затухания. На рис. 4 показаны кривые затухания трех образцов с квантовыми точками, слоя AlN и сапфировой подложки при энергии регистрации 2.25 эВ. Время затухания ФЛ сапфировой подложки в начальном участке меньше экспериментального разрешения установки (0.02 мкс). Начальные участки кривых затухания ФЛ AlN и образцов с КТ следуют практически одинаковому закону затухания. Более того, быстрый участок затухания наблюдался в одном и том же энергетическом диапазоне для AlN и КТ. Поэтому мы считаем, что этот участок связан с вкладом матрицы AlN. После 1 мкс кривая затухания ФЛ образца с AlN совпадает с кривой затухания сапфировой подложки.

На рис. 5 показаны начальные времена затухания ФЛ структуры с КТ и слоя AlN, показан также спектр полосы ФЛ AlN, связанной с дефектами для образца AlN\_5, измеренный при возбуждении излучением с энергией кванта 4.71 эВ при комнатной температуре. Видно, что спектральное положение быстрого спада коррелирует с полосой AlN. Таким образом, вклад полосы ФЛ AlN приводит к наличию начального быстрого участка затухания в кривой затухания ФЛ структур с КТ GaN/AlN. Этот аддитивный эффект затрудняет анализ кинетики ФЛ структур с КТ. Измерение только начального участка кривой затухания ФЛ может быть недостаточно для получения информации о времени затухания в квантовых точках.

## 4. Заключение

Кривые затухания фотолюминесценции структур с квантовыми точками GaN/AlN могут иметь быстрый участок затухания ФЛ в энергетическом диапазоне 1.7–2.5 эВ. Этот начальный участок наблюдался в том же энергетическом диапазоне, что и полоса ФЛ, связанная с дефектами в AlN, и имеет тот же закон затухания, что и дефектная полоса AlN. Таким образом, начальный участок быстрого затухания ФЛ в кривой затухания ФЛ структур с КТ связан с вкладом дефектной полосы ФЛ в AlN.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 14-02-92007 и 14-02-00033).

## Список литературы

- [1] J. Simon, N. T. Pelekanos, C. Adelman, E. Martinez-Guerrero, R. Andre, B. Daudin, Le Si Dang, H. Mariette. *Phys. Rev. B*, **68**, 035 312 (2003).
- [2] И.А. Александров, К.С. Журавлев, В.Г. Мансуров. *ФТП*, **43**(6), 797 (2009).

- [3] R. Bardoux, T. Guillet, P. Lefebvre, T. Taliercio, T. Bretnon, S. Rousset, B. Gil, F. Semond. *Phys. Rev. B*, **74**, 195 319 (2006).
- [4] R. Collazo, J. Xie, B.E. Gaddy, Z. Bryan, R. Kirste, M. Hoffmann, R. Dalmau, B. Moody, Y. Kumagai, T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, A. Koukitu, D.L. Irving, Z. Sitar. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 191 914 (2012).
- [5] B.E. Gaddy, Z. Bryan, I. Bryan, R. Kirste, J. Xie, R. Dalmau, B. Moody, Y. Kumagai, T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, A. Koukitu, Z. Sitar, R. Collazo, D.L. Irving. *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 161 901 (2013).
- [6] J.-M. Maki, I. Makkonen, F. Tuomisto, A. Karjalainen, S. Suihkonen, J. Raisanen, T.Yu. Chemekova, Yu.N. Makarov. *Phys. Rev. B*, **84**, 081 204 (2011).
- [7] J.L. Lyons, A. Janotti, C.G. Van de Walle. *Phys. Rev. B*, **89**, 035 204 (2014).
- [8] L. Gordon, J.L. Lyons, A. Janotti, C.G. Van de Walle. *Phys. Rev. B*, **89**, 085 204 (2014).
- [9] V.G. Mansurov, Yu.G. Galitsyn, A.Yu. Nikitin, K.S. Zhuravlev, Ph. Venegues. *Phys. Status Solidi C*, **3**, 1548 (2006).
- [10] И.А. Александров, К.С. Журавлев, В.Г. Мансуров. *ФТП*, **43** (6), 797 (2009).
- [11] I.A. Aleksandrov, A.K. Gutakovskii, K.S. Zhuravlev. *Phys. Status Solidi A*, **209**, 653 (2012).
- [12] I.A. Aleksandrov, V.G. Mansurov, V.F. Plyusnin, K.S. Zhuravlev. *Phys. Status Solidi C*, **12** (4–5), 353 (2015).

*Редактор Л.В. Шаронова*

### **Effect of defects in an AlN barrier on photoluminescence kinetics of GaN/AlN quantum dots**

*I.A. Aleksandrov, K.S. Zhuravlev\*, V.G. Mansurov*

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

\* Novosibirsk State University,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** Influence of defects in an AlN barrier on photoluminescence decay of structures with GaN quantum dots has been investigated. Fast photoluminescence decay has been found in photoluminescence decay curves of quantum dot structures. We show by comparison of the photoluminescence decay curves of quantum dot structures and AlN layers without quantum dots that this fast decay is caused by contribution of defect photoluminescence band in the AlN matrix.