

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ V-ДЕФЕКТОВ НА ЛАЗЕРНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР InGaN/GaN С МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ, ВЫРАЩЕННЫХ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

А. В. Данильчик*, А. В. Нагорный, Н. В. Ржеуцкий,
А. Г. Войнилович, В. Н. Павловский, Е. В. Луценко

УДК 621.373.8

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2021-88-6-895-899>

Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь
e-mail: a.danilchik@ifanbel.bas-net.by

(Поступила 5 ноября 2021)

Исследованы излучательные свойства гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ), выращенных на кремниевых подложках, с различными толщинами квантовых ям при оптическом возбуждении. Установлена корреляция лазерных и фотолюминесцентных свойств с морфологией поверхности покровных слоев нитрида галлия и плотностью V-дефектов. Показано, что с ростом плотности V-дефектов происходит увеличение пороговой плотности мощности возбуждения генерации гетероструктур InGaN/GaN с МКЯ.

Ключевые слова: гетероструктура, генерация лазерного излучения, квантовые ямы, поверхностный V-дефект, InGaN, GaN, морфология поверхности.

We investigated the radiative properties of InGaN/GaN heterostructures with multiple quantum wells (MQWs) grown on silicon substrates with different thicknesses of quantum wells at optical excitation. The correlation of laser and photoluminescent properties with the surface morphology of the gallium nitride coating layers and the density of V-defects has been established. It is shown that, with a growth in the density of V-defects, the threshold power density of the excitation of the generation of InGaN/GaN heterostructures with MQWs increases.

Keywords: heterostructure, generation of laser radiation, quantum wells, surface V-defects, InGaN, GaN, surface morphology.

Введение. В настоящее время выращивание нитридных гетероструктур проводится в основном на подложках сапфира и карбида кремния. Переход на кремниевые подложки может привести к интеграции светоизлучающих структур на основе GaN с кремниевой электроникой при использовании широко распространенных и разработанных технологий [1]. Кремниевая подложка имеет ряд преимуществ по сравнению с сапфиром, таких как высокое кристаллическое качество, низкая стоимость, более высокая теплопроводность (149 по сравнению с 25 Вт/(м · К)). Первые лазеры на основе гетероструктур InGaN/GaN с квантовыми ямами (КЯ), выращенных на кремнии методом МОС-гидридной эпитаксии или металлоорганической газофазной эпитаксии, продемонстрированы в работах [2, 3]. О разработке светодиодов, выращенных на кремнии, с высокой эффективностью и выходной оптической мощностью сообщалось ранее [4], однако непрерывная генерация лазерного излучения в диодных структурах на основе InGaN/GaN на кремнии получена сравнительно недавно [5]. В [6] осуществлена оптимизация дизайна гетероструктур с целью уменьшения пороговой плотности мощности возбуждения и освоения более широкого спектрального диапазона, при этом получены значения материального оптического усиления 11000 см^{-1} [7]. Несмотря на успехи в создании мощ-

EFFECT OF THE DENSITY OF SURFACE V-DEFECTS ON LASER PROPERTIES OF InGaN/GaN HETEROSTRUCTURES WITH MULTIPLE QUANTUM WELLS GROWN ON SILICON SUBSTRATES

A. V. Danilchik*, A. V. Nagornyi, N. V. Rzhetskiy, A. G. Voinilovich, V. N. Pavlovskiy, E. V. Lutsenko
(B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: a.danilchik@ifanbel.bas-net.by)

ных и высокоэффективных лазеров, выращенных на подложках других типов, по лазерным параметрам гетероструктур InGaN/GaN, выращенных на кремниевых подложках, существуют проблемы, требующие дополнительных исследований. Коэффициенты теплового расширения нитрида галлия и кремния различаются почти в два раза, и при остывании образцов от температур роста до комнатной подложка кремния растягивает слои GaN так, что при превышении предела прочности образуются трещины. Морфология поверхности и поверхностные дефекты гетероструктуры могут оказывать существенное влияние на ее излучательные свойства и лазерные характеристики. В настоящей работе исследованы фотолюминесценция (ФЛ) и генерация лазерного излучения гетероструктур InGaN/GaN, выращенных на подложках кремния, с различными толщинами КЯ при оптическом возбуждении и установлена их корреляция с плотностью поверхностных дефектов.

Эксперимент. Образцы гетероструктур InGaN/GaN с множественными КЯ (МКЯ) выращены на подложках Si(111) в реакторе фирмы AIXTRON (Германия) методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы [8]. Источником азота служил аммиак, азот N_2 и водород H_2 использованы в качестве газов-носителей. Из-за значительной разницы в параметрах решетки между нитридом галлия и кремнием необходимо до роста КЯ вырастить набор слоев, снимающих механические напряжения. Исследована серия структур с МКЯ, различающихся толщинами КЯ и барьеров между КЯ.

Серия из восьми образцов имела следующий дизайн: GaN:Mg(150 нм)/AlGaIn(10 нм)/GaN(20 нм)/5 {InGaIn/GaN:Si⁺/GaN:Si⁺(500 нм)/GaN:Si(200 нм)/GaN(150 нм)/Al_{0.2}Ga_{0.8}N(360 нм)/Al_{0.3}Ga_{0.7}N(150 нм)/Al_{0.5}Ga_{0.5}N(150 нм)/AlN(300 нм)/Si(111)}. Толщины квантовых ям/барьеров (нм): 1.3/18.5 (образец № 1), 1.3/18.5 (№ 2), 2.5/19.2 (№ 3), 1.3/18.5 (№ 4), 1.85/18.5 (№ 5), 0.7/10 (№ 6), 2.0/10 (№ 7), 4.0/10 (№ 8). Активная область образцов № 6—8 выращена при сниженных вдвое потоках газов-носителей. Образец № 5 имел 10 КЯ, остальные образцы — 5.

Для возбуждения ФЛ и генерации использовано излучение импульсного N_2 -лазера ($\lambda = 337.1$ нм, $\tau_{\text{имп}} = 8$ нс, $I_{\text{возб}} = 1\text{—}1000$ кВт/см²). Резонаторы полупроводниковых лазеров получены путем скалывания по кристаллографическим граням кремниевой подложки. При исследовании генерационных характеристик возбуждающее излучение фокусировалось в узкую полосу на поверхности образцов перпендикулярно зеркалам резонаторов, регистрация излучения проводилась с торца резонатора вдоль направления возбуждающей полоски. Изображения поверхности исследуемых гетероструктур получены с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ).

Результаты и их обсуждение. На рис. 1, а приведено АСМ-изображение участка поверхности образца, содержащего поверхностный дефект, на рис. 1, б — профиль сечения поверхности образца вдоль направления движения зонда, проходящего над поверхностным дефектом. Как видно, данный точечный дефект на поверхности слоя GaN имеет вид отверстия в форме пирамиды с шестиугольным основанием. Такие дефекты обычно называют V-дефектами. Принято считать, что данный тип дефектов образуется на границах слоев GaN/InGaIn в местах, которых достигают проникающие дислокации [9, 10]. В результате анализа АСМ-изображений поверхности установлены размеры таких дефектов: ширина 200—300 нм, глубина 150—250 нм. Нижняя граница глубины определялась разрешением используемого зонда.

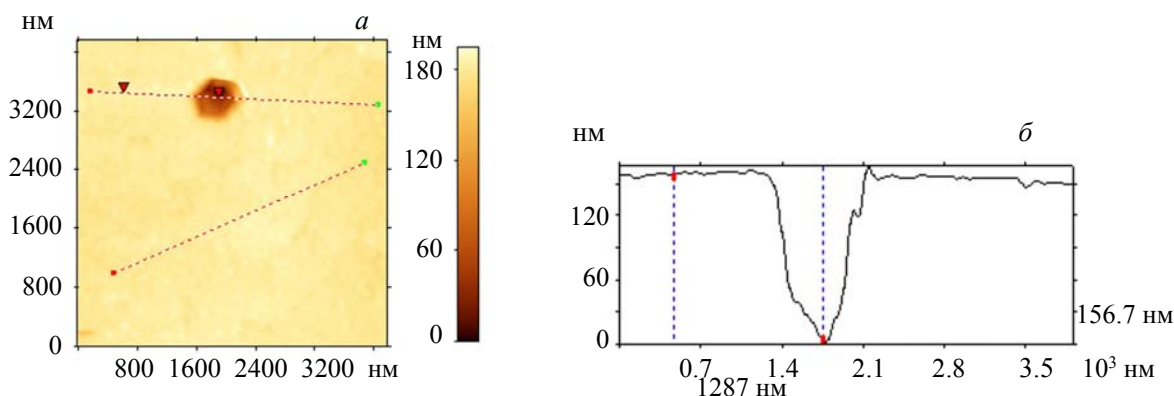


Рис. 1. АСМ-изображение участка поверхности образца, содержащего V-дефект (а), и профиль сечения поверхности образца по направлению, проходящему через V-дефект (б)

Состояние поверхности образцов серии № 1 проанализировано с помощью оптического микроскопа в режиме темного поля. На рис. 2 представлены цвето-инвертированные изображения участка поверхностей трех образцов размером 100×100 мкм. На поверхности образцов имеются отдельные точечные отверстия и трещины. Средняя по всей площади образцов плотность точечных отверстий от $\sim 3 \cdot 10^5$ до $\sim 10^7$ см $^{-2}$. Увеличение толщины КЯ от 1.3 до 2.5 нм приводит к росту плотности поверхностных V-дефектов. Такое поведение обусловлено тем, что причиной образования дефектов является релаксация упругих напряжений в области МКЯ, которая возрастает с увеличением толщины слоев InGaN. Дальнейшее увеличение толщины InGaN КЯ до 4 нм (рис. 2, в) приводит к еще большему росту плотности V-дефектов и количества трещин на поверхности образцов по сравнению с гетероструктурами с более тонкими ямами (рис. 2, а). Зависимости плотности поверхностных дефектов и среднеквадратической шероховатости σ от толщины КЯ представлены на рис. 2, з и д. Среднеквадратические значения шероховатости образцов измерены на площади образцов 5×5 мкм. Наименьшая шероховатость поверхности достигнута у образца с толщиной КЯ InGaN 2 нм. Однако плотность V-дефектов у данного образца выше, чем у образцов с близкими значениями среднеквадратической шероховатости поверхности. Треугольниками отмечены образцы, во время роста которых поток газов-носителей уменьшен в два раза.

На рис. 3 представлены спектры ФЛ исследуемых образцов при плотности мощности возбуждающего излучения 80 кВт/см 2 . Как видно, полосы ФЛ образцов № 1—5 смещены в более длинноволновую область (430—450 нм) и имеют приблизительно одинаковую интенсивность. Полосы ФЛ образцов № 6—8, выращенных в меньшем (в 2 раза) потоке газов-носителей, расположены в более коротковолновой области относительно образцов № 1—5 и их интенсивность в 1.5—2 раза выше. Уменьшение потока газов-носителей в два раза приводит к меньшему внедрению индия в КЯ. У структур с высокой плотностью V-дефектов несколько большая интенсивность ФЛ. В [11] на примере электролюминесценции (ЭЛ) гетероструктур InGaN/GaN МКЯ с верхним слоем GaN толщиной 150 нм показано, что образование V-дефектов большого размера, которое начинается в нижних КЯ, не приводит к снижению эффективности ЭЛ. Когда V-дефект начинается выше слоя КЯ, проникающая дислокация выступает в роли центров безызлучательной рекомбинации, что снижает эффективность излучательной рекомбинации.

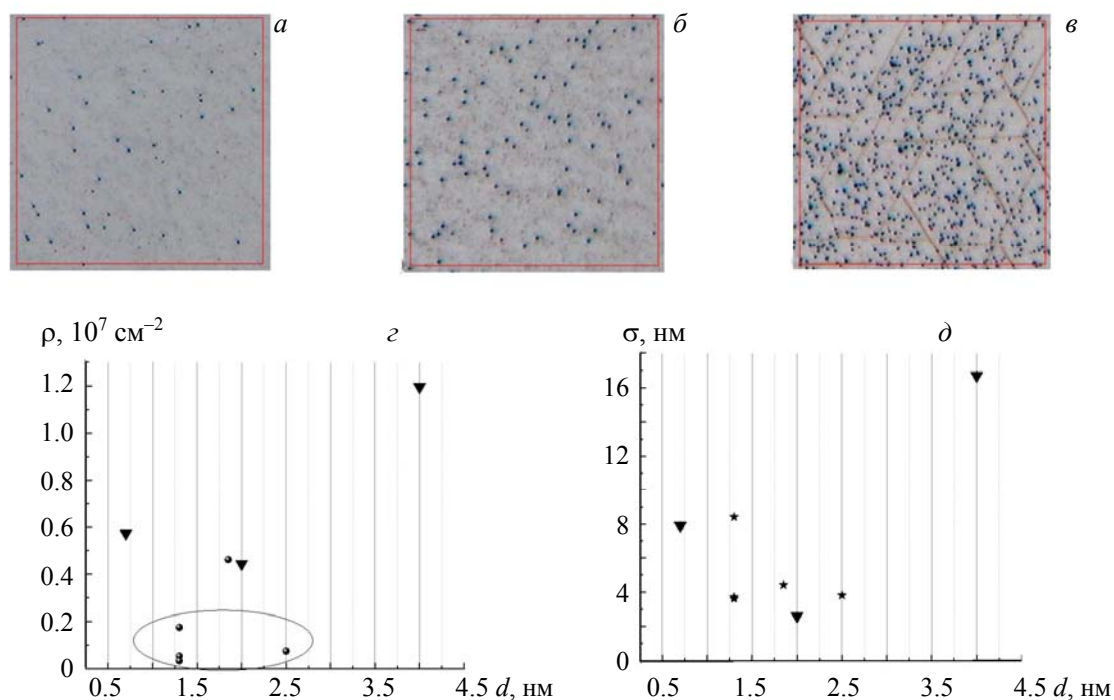


Рис. 2. Изображение поверхности образцов в квадрате 100×100 мкм с толщиной КЯ 1.3 (а), 2.5 (б) и 4 нм (в); зависимости плотности V-дефектов ρ (з) и среднеквадратической шероховатости поверхности σ (д) гетероструктур от толщины КЯ d

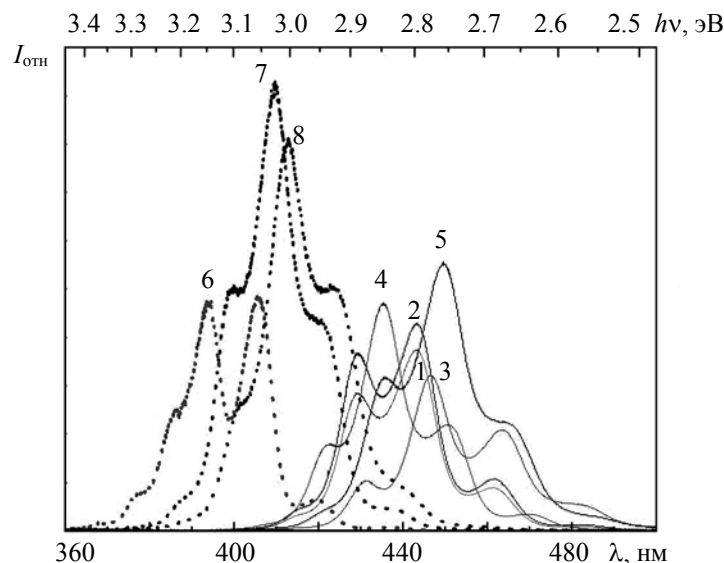


Рис. 3. Спектры ФЛ образцов № 1—8 при плотности мощности возбуждения 80 кВт/см^2

На рис. 4, *а* представлены спектры лазерного излучения, полученные для четырех гетероструктур с КЯ толщинами 1.3 и 2.5 нм при оптическом возбуждении. Из рис. 4, *б* видно, что пороговые значения генерации образцов № 1—4 увеличиваются от 75 до 1000 кВт/см^2 с ростом плотности V-дефектов от $3.4 \cdot 10^5$ до $1.7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. На рис. 4, *б* (вставка) представлена фотография поверхности гетероструктуры, полученная при оптическом возбуждении с уровнем накачки, превышающем пороговое значение. На поверхности наблюдаются яркие точки, рассеивающие излучение. Отмечается, что V-дефекты излучают на больших длинах волн, чем собственно КЯ InGaN [12], из-за формирования в основании дефекта областей, обогащенных индием, которые могут давать вклад в оптические потери за счет поглощения излучения.

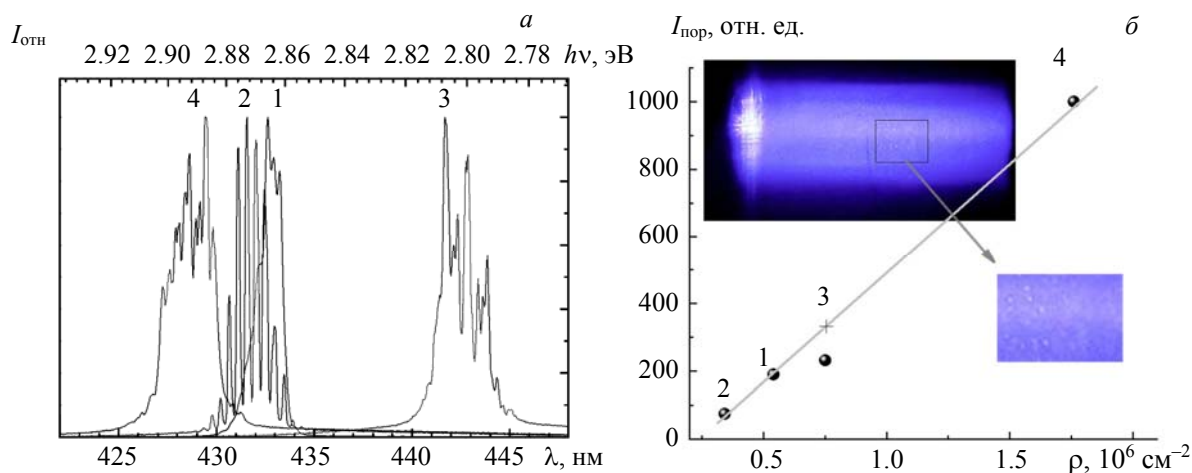


Рис. 4. Спектры лазерного излучения с торца резонатора образцов с КЯ толщинами 1.3 (образцы 1, 2, 4) и 2.5 нм (образец 3) (*а*); зависимость минимального порога стимулированного излучения от плотности V-дефектов ρ (*б*); на вставке — фотография поверхности образца при оптическом возбуждении генерации

Когда гетероструктуры InGaN покрыты толстым (>150 нм) слоем GaN, V-дефекты выступают как центры рассеяния излучения, а увеличение плотности и размеров дефектов приводит к дополнительным потерям в волноводном слое GaN и активной области InGaN. С учетом того что интенсивности ФЛ образцов № 1—4 при высоком уровне возбуждения (рис. 3, а) различаются незначительно, в InGaN/GaN основным фактором, влияющим на увеличение порога генерации, являются V-дефекты, рост концентрации которых слабо влияет на интенсивность ФЛ, но приводит к увеличению оптических потерь за счет рассеяния излучения в области верхнего слоя GaN и КЯ. Как видно из рис. 4, б, наименьшая пороговая плотность мощности ~ 75 кВт/см² получена для образца № 2 с КЯ толщиной 1.3 нм и наименьшей концентрацией V-дефектов на поверхности. Пороговая плотность мощности ~ 230 кВт/см² образца № 3 с КЯ толщиной 2.5 нм находится ниже ожидаемого значения ~ 340 кВт/см², которое следует из линейной интерполяции. Это обусловлено увеличением фактора оптического ограничения для более толстых InGaN КЯ.

Закключение. Исследованы поверхностные дефекты серии гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами, выращенных на подложках Si(111). Установлено их влияние на пороговые значения плотности мощности возбуждения генерации. Анализ состояния поверхности образцов с помощью оптического микроскопа в режиме темного поля показывает среднюю плотность точечных дефектов от $\sim 3.4 \cdot 10^5$ до $\sim 10^7$ см⁻². С помощью атомно-силового микроскопа установлено, что данный тип точечных дефектов по размерам и форме соответствует V-дефектам, известным для структур с квантовыми ямами InGaN. Исследованы фотолюминесценция и генерация лазерного излучения серии образцов. Для гетероструктур InGaN/GaN основным фактором, влияющим на пороговые характеристики генерации, является плотность V-дефектов, изменение которой от $3.4 \cdot 10^5$ до $1.7 \cdot 10^6$ см⁻² приводит к росту пороговых значений от 75 до 1000 кВт/см² при оптическом возбуждении за счет увеличения рассеяния излучения в области квантовых ям и верхнем слое нитрида галлия.

- [1] O. Moutanabbir, U. Gösele. *Ann. Rev. Mater. Res.*, **40** (2010) 469—500
- [2] E. V. Lutsenko, V. N. Pavlovskii, V. Z. Zubialevich, A. I. Stognij, A. L. Gurskii, V. A. Hryshanau, A. S. Shulenkov, G. P. Yablonskii, O. Schön, H. Protzmann, M. Lünenbürger, B. Schineller, Y. Dikme, R. H. Jansen, M. Heuken. *Phys. Status Solidi (c)*, N 1 (2002) 272—275
- [3] A. L. Gurskii, E. V. Lutsenko, V. N. Pavlovskii, V. Z. Zubialevich, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, G. P. Yablonskii, Y. Dikme, A. Szymakovski, H. Kalisch, R. H. Jansen, B. Schineller, M. Heuken. *Int. Symp. Compd. Semicond. Post-Conf. Proc.*, 25–27 August, San Diego, USA IEEE (2003) 197—203
- [4] S. Guha, N. A. Bojarczuk. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, N 11 (1998) 1487—1489
- [5] Dabing Li. *Sci. Bull.*, **61**, N 22 (2016) 1723—1725
- [6] E. V. Lutsenko, A. V. Danilchuk, N. P. Tarasuk, A. V. Andryieuski, V. N. Pavlovskii, A. L. Gurskii, G. P. Yablonskii, H. Kalisch, R. H. Jansen, Y. Dikme, B. Schineller, M. Heuken. *Phys. Status Solidi*, **5**, N 6 (2008) 2263—2266
- [7] V. N. Pavlovskii, E. V. Lutsenko, A. V. Danilchuk, V. Z. Zubialevich, A. V. Muravitskaya, G. P. Yablonskii, H. Kalisch, R. H. Jansen, B. Schineller, M. Heuken. *Int. Conf. Adv. Optoelectron. Lasers*, 10–14 September, Sevastopol, Ukraine IEEE (2010) 265—267
- [8] V. Voronenkov, N. Bochkareva, R. Gorbunov, P. Latyshev, Y. Lelikov, Y. Rebane, A. Tsyuk, A. Zubrilov, Y. Shreter. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52**, N 8(2) (2013) 10—14
- [9] H. Wang, Q. Tan, X. He. *JETP Lett.*, **112**, N 3 (2020) 157—160
- [10] S. W. Chen, C. J. Chang, T. C. Lu. *Crystals*, **10**, N 4 (2020) 311—321
- [11] X. Wang, F. Liang, D. Zhao, Z. Liu, J. Zhu, J. Yang. *Nanoscale Res. Lett.*, **15**, N 1 (2020) 191—201
- [12] Hung Ling Tsai, Ting Yu Wang, Jer Ren Yang, Chang Cheng Chuo, Jung Tsung Hsu, Zhe Chuan Feng, Makoto Shiojiri. *Mater. Transact.*, **48**, N 5 (2007) 894—898