

Влияние шероховатости поверхности на лазерные свойства InGaN/GaN гетероструктур, выращенных на кремнии

А. В. Данильчик, А. В. Нагорный, В. Н. Павловский, Е. В. Луценко

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск;

e-mail: a.danilchuk@ifanbel.bas-net.by

В данной работе исследованы излучательные свойства гетероструктур InGaN/GaN, выращенных на кремниевых подложках с различным дизайном и толщинами квантовых ям, при оптическом возбуждении. Установлена корреляция лазерных и фотолюминесцентных свойств с морфологией поверхности покровных слоев нитрида галлия. Показана зависимость шероховатости поверхности и плотности дефектов от условий роста и толщины слоя квантовых ям InGaN

Ключевые слова: гетероструктура InGaN/GaN, кремниевая подложка, шероховатость поверхности, фотолюминесценция, оптическая накачка, лазерное излучение, поверхностные дефекты, V-дефекты, трещины

Введение

Наиболее распространенными подложками для роста нитридных гетероструктур в настоящее время все еще остаются карбид кремния и сапфир. Переход на кремниевые подложки приведет к интеграции светоизлучающих структур на основе GaN с кремниевой электроникой и использованию хорошо разработанных и широко распространенных технологий [1]. Кремниевая подложка имеет ряд преимуществ по сравнению с сапфиром, таких как превосходное качество кристаллической структуры, низкая стоимость, более высокое значение теплопроводности 300 Вт/(м·К). Однако, хотя о разработке светодиодов, выращенных на кремнии с высокой эффективностью и выходной оптической мощностью сообщалось ранее [2], непрерывная генерация в лазерных структурах получена сравнительно недавно [3]. Первые лазеры на основе гетероструктур InGaN/GaN с квантовыми ямами, выращенных на кремнии методом МОС-гидридной эпитаксии, были продемонстрированы в работах [4, 5]. Далее последовали работы по оптимизации дизайна выращиваемых гетероструктур с целью уменьшения пороговых характеристик и расширения спектрального диапазона лазеров [6, 7], при этом были получены значения материального оптического усиления 11000 см^{-1} [8]. Несмотря на значительные успехи в создании мощных и высокоэффективных лазеров, выращенных на подложках других типов, лазерные параметры гетероструктур InGaN/GaN, выращенных на кремниевых подложках, недостаточно изучены. Состояние поверхности гетероструктуры также может оказывать существенное влияние на её оптические свойства и лазерные характеристики.

Эксперимент

В данной работе исследованы качество поверхности и излучательные свойства гетероструктур InGaN/GaN/Si с различным дизайном и толщинами квантовых ям при оптическом возбуждении и установлена их корреляция. Исследуемые образцы были выращены на кремниевых подложках Si(111) в реакторе фирмы AIXTRON методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы. В качестве источника азота использовался аммиак. Азот N_2 и водород H_2 использовались в качестве газоносителей. Из-за значительной разницы в параметрах решетки между нитридом галлия и кремнием необходимо до роста квантовых ям вырастить набор слоев, снимающих механические напряжения. Для исследования были выбраны 2 серии структур.

Первая серия образцов имела 5 КЯ толщиной 1.8 или 2.1 нм, один набор слоев AlN/AlGaN для снятия напряжений, буферный слой GaN толщиной 650 нм и

низкотемпературные слои AlN и GaN общей толщиной 1 мкм (рис. 1, *a*). Вторая серия образцов имела 5 или 10 КЯ толщиной от 1.3 до 4 нм, один набор слоев AlN/AlGaN для снятия напряжений, набор слоев GaN:Si⁺/GaN:Si/GaN под квантовыми ямами (рис. 1, *б*). Покровными слоями для серий образцов были: GaN толщиной 50 нм (1 серия); GaN:Mg толщиной 170 нм (2 серия). Для возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) использовалось излучение HeCd и N₂ лазеров. Резонаторы полупроводниковых лазеров получались методом скалывания по кристаллографическим граням кремниевой подложки. Для получения генерации в исследуемых структурах использовалось излучение азотного лазера ($\lambda = 337.1$ нм, $\tau_{\text{имп}}=8$ нс, $I_{\text{возб}} = 1 - 1000$ кВт/см²). Возбуждающее излучение фокусировалось в узкую полоску на поверхности образцов перпендикулярно зеркалам резонаторов, а регистрация излучения производилась с торца резонатора вдоль направления возбуждающей полоски. Изображения поверхности гетероструктур InGaN/GaN были получены при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ).



Рис. 1. – Дизайн InGaN/GaN/Si гетероструктур: с МКЯ и одним набором слоёв AlN/AlGaN для снятия напряжений, а также с буферным слоем GaN и низкотемпературными слоями AlN и GaN (*a*); с одним набором слоёв AlN/AlGaN для снятия напряжений (*б*).

Результаты и обсуждение

Образцы серии № 1 показали достаточно гладкую поверхность, со среднеквадратичным значением шероховатости $\sigma = 1.4 - 2.3$ нм на площади 5×5 мкм² кроме одного образца шероховатость которого составила $\sigma = 4.4$ нм. Верхний слой нитрида галлия этого образца с максимальной шероховатостью поверхности был выращен при температуре роста квантовых ям InGaN 740°C, в отличие от температуры роста 1080°C слоев нитрида галлия всех остальных образцов серии № 1. На рис. 2 представлены изображения поверхности образцов с наименьшим и наибольшим значениями шероховатости. По-видимому, низкая температура роста, соответствующая температуре роста квантовых ям, приводит к некоторому ухудшению качества слоя нитрида галлия и его поверхности.

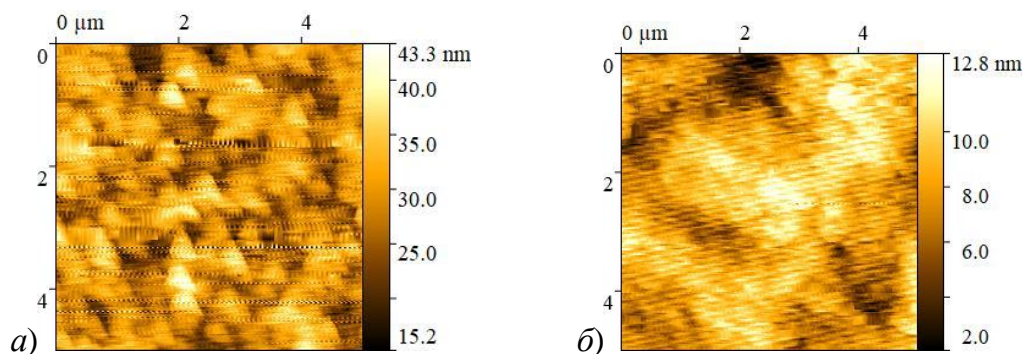


Рис. 2 – АСМ-изображения поверхности образцов с покровными слоями GaN, выращенными при температуре 740°C (*a*) и 1080°C (*б*).

В серии гетероструктур №1 изменялась концентрация In в квантовых ямах при одинаковой толщине самих ям. Рост концентрации In приводит к значительному падению интенсивности ФЛ и длинноволновому сдвигу положения полосы ФЛ от 445 нм до 505 нм при низком уровне возбуждения 0.1 Вт/см^2 за счет уменьшения ширины запрещенной зоны InGaN с увеличением концентрации индия. Такое падение можно объяснить ростом количества дефектов и величины пьезополя в квантовых ямах с увеличением концентрации индия. Во всех структурах серии №1 была получена генерация при возбуждении излучением азотного лазера. Это обусловлено как низким значением шероховатости поверхности так и эффективным транспортом неравновесных носителей заряда из верхнего тонкого (50 нм) нелегированного слоя GaN к квантовым ямам. Зависимость порога генерации от длины волны была почти линейной. Наименьшее значение пороговой плотности мощности накачки $I_{\text{пор}} = 130 \text{ кВт/см}^2$ было получено на длине волны генерации 440 нм, а наибольшее $I_{\text{пор}} = 320 \text{ кВт/см}^2$ – на длине волны 465 нм. Увеличение пороговых значений связано по-видимому с падением эффективности излучательной рекомбинации с ростом концентрации индия. Следует отдельно отметить, что только у образца с наибольшей шероховатостью поверхности генерация не была получена при комнатной температуре, а лишь при температуре 20 К.

Кроме атомно-силового микроскопа, состояние поверхности образцов серии №2 было проанализировано при помощи оптического микроскопа в режиме темного поля. На рис. 3 представлены цвето-инвертированные изображения поверхностей трех образцов в квадрате размерами $100 \times 100 \text{ мкм}^2$. Как видно из рисунка, на поверхности образцов имеются отдельные V-дефекты и трещины. Средняя по всей площади образца плотность V-дефектов сильно варьируется от $\sim 3 \cdot 10^3 \text{ мм}^{-2}$ у лучшего образца, до $\sim 10^6 \text{ мм}^{-2}$. Нитрид галлия и кремний имеют отличающиеся почти в 2 раза коэффициенты теплового расширения, и при остывании образцов от температур роста до комнатной подложка кремния растягивает слои GaN так, что при превышении предела прочности происходит образование трещин. Образцы с большим количеством V-дефектов содержат большее количество трещин что говорит об том, что не только локальные механические напряжения в слое InGaN квантовых ям влияют на образование V-дефектов.

Как видно из рис. 3, а, уменьшение потока газа-носителя приводит к увеличению плотности точечных ямок и формированию большего количества трещин. Увеличение общей толщины InGaN (рис. 3, б) приводит к увеличению плотности точечных ямок на поверхности образцов в сравнении с гетероструктурами с более тонкими ямами (рис. 3, в).

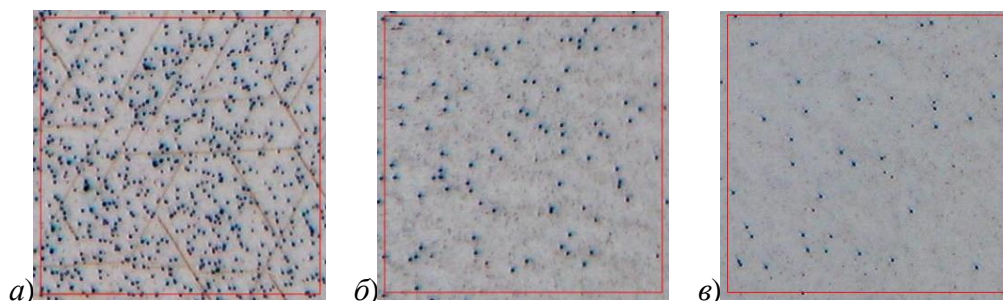


Рис. 3 – Изображение поверхности исходных образцов в квадрате $100 \times 100 \text{ мкм}$ с толщиной ям 2 нм и уменьшенным потоком газ-носителей (а); с толщиной ям InGaN 2.5 нм (б); с толщиной ям 1.3 нм (в).

Среднеквадратичная шероховатость поверхности, полученная из анализа АСМ изображений поверхности InGaN/GaN гетероструктур серии № 2, варьировалась от $\sigma = 2.6$ до $\sigma = 16.7$ нм для площади 5×5 мкм². Наименьшее значение шероховатости показал образец с толщиной InGaN квантовых ям 4 нм. Однако, количество поверхностных дефектов и трещин одно из самых высоких в серии.

Отличительной особенностью дизайна структур серии № 2 было использование одного составного набора слоев AlN/AlGaN (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)/AlN (300 нм)) для снятия напряжений, что позволило вырастить слои GaN:Si и InGaN/GaN квантовые ямы высокого качества. Интенсивность ФЛ образцов из данной серии была выше чем у серии № 1, несмотря на наличие достаточно толстого верхнего слоя нитрида галлия, легированного магнием (170 нм). На рис. 4 представлены зависимости положения спектров ФЛ от толщины квантовых ям образцов серии № 2. Из рисунка видно, что положения максимума фотолюминесценции линейно зависят от толщины ям при низком уровне возбуждения. Спектры ФЛ при высоких уровнях возбуждения (80 кВт/см²) смещены в коротковолновую сторону относительно спектров фотолюминесценции при низких уровнях возбуждения. При этом смещение больше у структур с толстыми квантовыми ямами и большим содержанием индия. Длинноволновое смещение положения максимума фотолюминесценции с увеличением толщины КЯ происходит благодаря нескольким факторам: 1) увеличению длины волны излучения, вызванному квантоворазмерным эффектом Штарка; 2) уменьшению энергии размерного квантования; 3) уменьшению ширины запрещенной зоны и уширению хвостов плотности состояний с ростом концентрации In, которая происходит при увеличении времени роста квантовых ям.

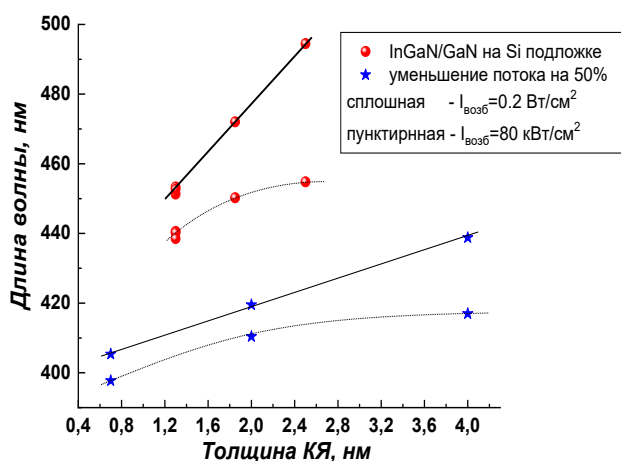


Рис. 4. – Положение ФЛ в зависимости от толщины КЯ при двух уровнях возбуждения для серии образцов № 2.

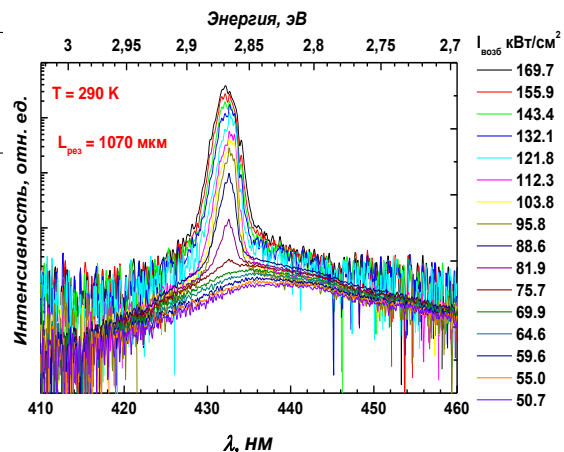


Рис. 5. – Спектры излучения с торца резонатора в зависимости от интенсивности возбуждения для образца с толщиной КЯ 1.3 нм из серии № 2.

На рис. 5 представлены спектры генерации гетероструктуры с КЯ толщиной 1.3 нм при различных уровнях накачки. Как видно из рисунка, значение порога генерации составило 75 кВт/см². Порог генерации гетероструктур с толщиной ям 2.5 нм составил 230 кВт/см². Поскольку оба эти образца имеют минимальные значения шероховатости среди образцов серии № 2, это свидетельствует о лучшем кристаллическом качестве более коротковолновых КЯ InGaN.

Заклучение

Установлена корреляция лазерных параметров гетероструктур InGaN/GaN с шероховатостью поверхности, а также плотностью V-дефектов и трещин на поверхности, которые, в свою очередь определяются условиями роста. Показано, что большое влияние на порог генерации оказывает шероховатость поверхности гетероструктур.

Литература

1. Moutanabbir O., Gösele U. Heterogeneous integration of compound semiconductors. Annual Review of Materials Research. 2010.
2. Guha S., Bojarczuk N.A. Ultraviolet and violet GaN light emitting diodes on silicon. Appl. Phys. Lett. 1998.
3. Li D. GaN-on-Si laser diode: open up a new era of Si-based optical interconnections. Sci. Bull. Science China Press, 2016. Vol. 61, № 22. P. 1723–1725.
4. Yablonskii G.P. et al. Luminescence and Stimulated Emission from GaN on Silicon Substrates Heterostructures. Phys. status solidi. WILEY-VCH Verlag Berlin GmbH, 2002. Vol. 192, № 1. P. 54–59.
5. Lutsenko E. V. et al. Growth, stimulated emission, photo- and electroluminescence of InGaN/GaN EL-test heterostructures. Phys. Status Solidi C Conf. WILEY-VCH Verlag, 2002. Vol. 0, № 1. P. 272–275.
6. Gurskii A.L. et al. High temperature operation of optically pumped InGaN/GaN MQW heterostructure lasers grown on Si substrates. 2003 Int. Symp. Compd. Semicond. Post-Conference Proc. 2004.
7. Lutsenko E. V. et al. Laser threshold and optical gain of blue optically pumped InGaN/GaN multiple quantum wells (MQW) grown on Si. Phys. status solidi. WILEY-VCH Verlag, 2008. Vol. 5, № 6. P. 2263–2266.
8. Lutsenko E. V. et al. High optical gain InGaN/GaN MQW electroluminescent heterostructures grown on silicon by MOCVD. Proceedings of CAOL 2008: 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. 2008.

Influence of surface roughness on the laser properties of InGaN/GaN heterostructures grown on silicon

A. V. Danilchuk, A. V. Nahorny, V. N. Pavlovskii, E. V. Lutsenko

*Institute of Physics of NAS of Belarus, Minsk;
e-mail: a.danilchuk@ifanbel.bas-net.by*

In this work, we investigated the radiative properties of InGaN/GaN heterostructures grown on silicon substrates with different designs and quantum wells thicknesses under optical excitation. The correlation of the laser and photoluminescent properties with the surface morphology of the gallium nitride cap layers, their surface roughness, pinhole and cracks surface density has been established. In turn, the surface roughness and defect density was shown to depend on the growth conditions and the thickness of the InGaN layer.

Key words: InGaN/GaN heterostructure, silicon substrate, surface roughness, photoluminescence, optical pumping, laser emission, surface defects, pinholes, cracks