

Фотолюминесценция и стимулированное излучение сверхтонких квантовых ям GaN/AlN, выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией

Е. В. Луценко¹, А. В. Нагорный¹, Н. В. Ржеуцкий¹, Д. В. Нечаев², В. Н. Жмерик²

¹*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь;
e-mail: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by*

²*Физико-технический институт им. им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Исследованы спектры фотолюминесценции сверхрешеток GaN/AlN с сверхтонкими (1 монослой GaN) квантовыми ямами и барьерами 3, 4 и 6 монослоев AlN, а также с 2 монослоями GaN и барьерами AlN 4 монослоя. Показано, что фотолюминесценция обусловлена преимущественно локализованными состояниями сверхтонких квантовых ям GaN, образованных участками с толщинами большими номинальной. Обсуждается влияние технологии роста на спектры фотолюминесценции. Впервые, на длине волны около 320 нм (что соответствует излучению из 5 монослоев GaN) получено стимулированное излучение сверхтонких (2 монослоя GaN) квантовых ям, имеющее TE поляризацию, с порогом генерации 500 кВт/см².

Ключевые слова: сверхтонкие квантовые ямы GaN/AlN, фотолюминесценция, стимулированное излучение в ультрафиолетовой области спектра

Введение

Развитие технологий роста три-нитридов привело к массовому внедрению технологий светодиодного освещения, созданию мощных инжекционных лазеров фиолетового – зеленого диапазона спектра. Применение таких лазеров для накачки активных лазерных сред привело к созданию как новых полностью твердотельных лазеров [1], так и полностью полупроводниковых лазеров [2, 3] с диодной накачкой, в которых отсутствует необходимость в удвоении частоты излучения накачки. Дальнейшее развитие оптоэлектроники связано с AlGaN. Уже сейчас на основе AlGaN создаются ультрафиолетовые светодиоды, а на подходе ультрафиолетовые лазерные диоды. Однако растворы AlGaN обладают существенными флуктуациями состава, что приводит к уменьшению подвижности носителей заряда и существенно, на порядок, уменьшению теплопроводности. Поэтому цифровые растворы AlGaN (сверхрешетки AlN/GaN) рассматриваются как перспективная альтернатива этого тройного соединения.

Сверхрешеткам AlN/GaN в последнее время посвящено много исследований. Наиболее интересными представляются сверхрешетки с ультратонкими ямами GaN [4], поскольку для них возможна реализация псевдоморфного роста на AlN, а максимумы волновых функций электронов и дырок локализованных в яме не могут быть существенно разнесены внутренним полем (квантоворазмерный эффект Штарка) вследствие малой толщины квантовой ямы, что обеспечивает высокую эффективность рекомбинации. Теоретически показано [5], что эффективная ширина запрещенной зоны может варьироваться от ~ 225 нм до ~ 315 нм при изменении толщины сверхтонкой ямы GaN от 1 до 4 монослоев (МС).

Ранее нами было показана возможность получения лазерного эффекта в множественных квантовых ямах (МКЯ) AlN/GaN с номинальной толщиной КЯ 1,5–2 МС на диапазоне длин волн 260–290 нм на локализованных состояниях КЯ, состоящих из 2 или 3 МС GaN [10]. В данной работе проводилось дальнейшее исследование фотолюминесценции, стимулированного излучения сверхтонких МКЯ GaN/AlN с толщиной ямы 1–2 МС и тонкими барьерами 3–6.5 МС.

1. Эксперимент

Гетероструктуры были выращены на установке плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии Comcraft21T на подложках с-Al₂O₃. Зародышевые слои AlN

выращивались с помощью эпитаксии с повышенной миграцией 60–65 нм, а затем методом металл-модулированной эпитаксии проводился рост буферных слоев AlN толщиной ~1.6 мкм при температуре 780°C в металл-обогащенных условиях. В конце роста последние 250–340 нм AlN буферного слоя выращивались при непрерывной подаче ростовых потоков, а избыток металла с номинальной толщиной не выше ~50 МС, который впоследствии поглощался под потоком азота. Для роста МКЯ GaN/AlN температура снижалась до 690°C (серия 2), 700°C (серия 1). Рост МКЯ GaN/AlN осуществлялся как при непрерывном (серия 1), так и при импульсном потоке Ga (серия 2), поток Al в обоих случаях был импульсным. Толщина сверхрешетки GaN/AlN для всех гетероструктур составила 150 нм. Поскольку значение потока Al слегка превышало значение потока азота, то это обеспечивало отсутствие встраивания Ga при непрерывном потоке Al при росте барьерных слоев AlN. Гетероструктуры росли с квантовыми ямами GaN толщиной 1 и 2 МС. Толщина барьеров варьировалась от 3 до 6 МС.

Фотолюминесценции (ФЛ) и стимулированное излучение (СИ) сверхтонких квантовых ям GaN/AlN исследовались при возбуждении излучением 5-й Nd:YAG лазера (длина волны и уровень возбуждения: $\lambda_{\text{возб}} = 213$ нм и $I_{\text{возб}} \sim 0,1$ МВт/см² (ФЛ), и $I_{\text{возб}} \sim 0,1–10$ МВт/см² (СИ)). При измерениях СИ излучение возбуждающего лазера фокусировалось на поверхности структуры в полосу размерами 100 мкм × 2 мм, ориентированную перпендикулярно торцу. Измерения стимулированного излучения специально проводились без создания резонатора Фабри-Перо чтобы исключить случайное влияние качества зеркал резонатора, образованного сколами, на порог СИ. Регистрация спектров ФЛ и СИ осуществлялась с помощью спектрометра MayaPro (Ocean Optics) с поверхности и торца гетероструктуры соответственно.

2. Результаты и их обсуждение

Исследование фотолюминесценции показало высокую неоднородность по пластине сверхрешеток с ультратонкими ямами GaN серии 1. Особенно ярко это проявилось для гетероструктуры со сравнительно большой толщиной квантового барьера – 6 МС и квантовой ямой – 1 МС (рис. 1, а). Как видно из рис. 1, а, спектр фотолюминесценции состоит из набора полос, искаженных интерференцией, с максимумами на длинах волн ~ 245, 265, 305, 325 нм. Состав спектра меняется от положения на пластине - от коротковолновых полос в центре пластины ($R = 0$ мм) до длинноволновых полос на краю пластины ($R = 24$ мм). При этом полосы 245 и 265 нм, как было нами показано ранее [6] соответствуют излучению из 1 и 2 МС квантовой ямы GaN сверхрешетки, а более длинноволновые – большим количеством монослоев. Таким образом, не смотря на то что квантовые ямы GaN номинально содержат только один монослой GaN, излучение регистрируется преимущественно из 1 и 2 МС в области центра пластины и из большего количества монослоев ближе к краю пластины, что свидетельствует о сильной неоднородности распределения Ga и перенос неравновесных носителей заряда в локализованные состояния, образованные областями с избытком Ga.

Поскольку Ga присутствует в смачивающем металлическом слое во время роста барьеров AlN у гетероструктур серии 1, у Ga есть это время для диффузии в наиболее энергетически выгодные положения для роста слоев GaN, что и приводит к существенным неоднородностям в распределении Ga. На латеральное распределение Ga влияют механические напряжения неоднородно распределенных по радиусу пластины возникающих за счет разницы в постоянной кристаллической решетки подложки Al₂O₃ и AlN, а также AlN и GaN. Свою роль также может вносить неоднородность распределения температуры по радиусу подложки во время роста, а также то, что гетероструктуры этой серии отжигались несколько раз в процессе роста сверхрешетки.

Уменьшение толщины барьера AlN до 3, 4 МС приводит к меньшей неоднородности спектров по радиусу пластины (рис. 1, б, в). Как видно из рисунка, фотолюминесценция сверхрешетки GaN_{1МС}/AlN_{3МС} состоит из одной полосы с максимумом 305 нм в

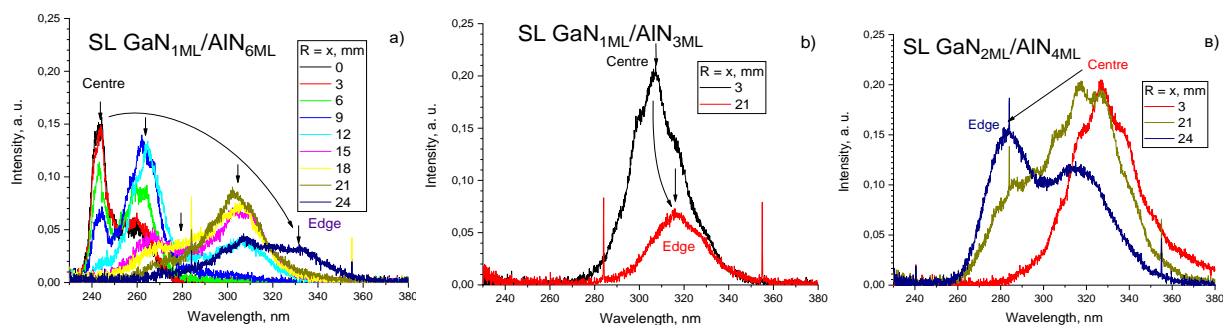


Рис. 1. – Спектры фотолюминесценции гетероструктур серии 1 со сверхрешетками: GaN_{1MC}/AlN_{6MC} (а), GaN_{1MC}/AlN_{3MC} (б), GaN_{2MC}/AlN_{4MC} (в).

центре пластины и 315 нм на краю пластины (соответствует излучению из 4 МС GaN). Фотолюминесценция сверхрешетки GaN_{2MC}/AlN_{4MC} состоит из одной полосы 325 нм в центре пластины и двух полос с максимумом 280 и 315 нм на краю пластины. Такое поведение фотолюминесценции можно объяснить эффективным переносом (в том числе через барьерные слои) неравновесных носителей заряда из слоев с меньшим количеством монослоев GaN в слои с 3-4-5-6 монослоями GaN.

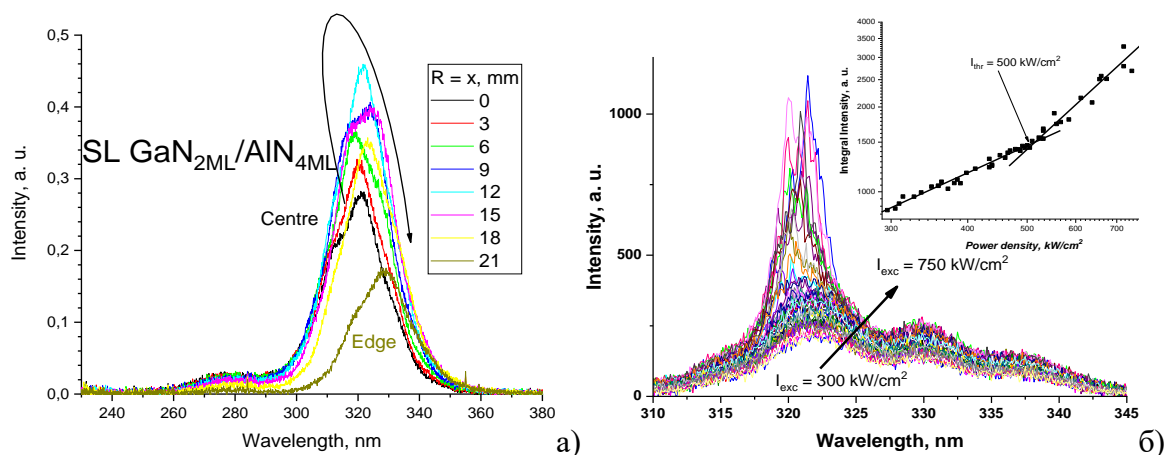


Рис. 2. – Спектры фотолюминесценции а) и стимулированного излучения при различном уровне накачки в) сверхрешетки GaN_{2MC}/AlN_{4MC} серии 2. Вставка: зависимость интегральной интенсивности от плотности мощности накачки.

Для гетероструктуры серии 2 со сверхрешеткой GaN_{2MC}/AlN_{4MC} (рис. 2, а) полоса 280 нм (соответствует излучению из 2-3 монослоев GaN) присутствует во всех спектрах фотолюминесценции, при этом ее интенсивность незначительна. Доминирующей является полоса положение максимума которой изменяется от 320 до 330 нм при переходе от центра к краю пластины, что соответствует излучению из 5-6 монослоев GaN. Интенсивность полосы в 2 раза выше, чем у сверхрешеткой GaN_{2MC}/AlN_{4MC} серии 1. Спектры фотолюминесценции в различных частях пластины похожи друг на друга и отличаются интенсивностью и немного положением полосы. Это возможно обусловлено тем, что отжиг сверхрешетки осуществлялся только после ее полного роста, потоки Ga и Al не перекрывались, что привело к условиям формирования более однородных по положению на пластине квантовых ям.

Исследование сверхрешеток на стимулированное излучение при поперечной накачке показало, что только в гетероструктуре со сверхрешеткой GaN_{2MC}/AlN_{4MC} серии 2 наблюдалось стимулированное излучение (рис. 2, б). Стимулированное излучение имело модовую структуру, TE поляризацию и порог генерации 500 кВт/см² (вставка, рис. 2, б). С увеличением накачки максимум полосы смещался с ~ 320 нм до 321.5 нм. Таким образом,

стимулированное излучение квантовых ям с номинальной толщиной 2 МС осуществляется на локализованных состояниях, обусловленных толщиной слоя GaN 5 монослоев.

Заключение

Показано, что спектры фотолюминесценции сверхрешеток GaN/AlN со сверхтонкими ямами (1, 2 монослоя GaN) и барьерами (3-6 монослоев AlN) зависят от технологии молекулярно-пучковой эпитаксии и состоят из полос, обусловленных локализованными состояниями, сформированными участками сверхтонких квантовых ям с толщинами GaN большими номинальной. Впервые получено стимулированное излучение на локализованных состояниях 2 монослойных квантовых ям GaN с барьерами 4 монослоя AlN, обусловленных пятью монослоями GaN. Стимулированное излучение развивалось на длине волны ~320 нм, имело выраженный порог генерации 500 кВт/см², ТЕ поляризацию и модовую структуру.

Литература

1. Kränkel C., Marzahl D.-T., Moglia F., Huber G., Metz P. W., Out of the blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers. *Laser & Photonic Review*. 2016. Vol. 10, No. 4. P. 548–568.
2. Lutsenko E.V., Voinilovich A.G., Rzhetskii N.V., Pavlovskii V N., Yablonskii G.P., Sorokin S.V., Gronin S.V., Sedova I.V., Kop'ev P.S., Ivanov S.V., Alanzi M., Hamidalddin A., Alyamani A. Optically pumped quantum-dot Cd(Zn)Se/ZnSe laser and microchip converter for yellow – green spectral region. *Quantum Electron*. 2013. Vol. 43, No. 5. P. 418–422.
3. Vainilovich A. G., Lutsenko E. V, Pavlovskii V. N., Yablonskii G. P., Alyamani A. Microchip laser converter based on InGaN laser diode and (Zn)CdSe quantum dot heterostructure. *Phys. Stat. Sol. B*. 2016. Vol. 253, No. 8. P. 1498-1502.
4. Sun W., Tan C.-K., Tansu N. AlN/GaN Digital Alloy for Mid- and Deep-Ultraviolet Optoelectronics. *Scientific Reports*. 2017. Vol.7. 11826.
5. Islam S. M., Lee K., Verma J., Protasenko V., Rouvimov S., Bharadwaj S., Xing H., Jena D. MBE-grown 232–270 nm deep-UV LEDs using monolayer thin binary GaN/AlN quantum heterostructures. *Appl. Phys. Lett*. 2017. Vol. 110, No. 4. P. 110, 041108 (2017).
6. Lutsenko E. V., Rzhetski M. V., Nagorny A. V., Danilchuk A. V., Nechaev D. V., Jmerik V. N., Ivanov S. V. Stimulated emission, photoluminescence, and localisation of nonequilibrium charge carriers in ultrathin (monolayer) GaN/AlN quantum wells. *Quantum Electron*. 2019. Vol. 49, No. 6. P. 535–539.

Photoluminescence and stimulated emission of GaN/AlN ultrathin quantum wells grown by molecular beam epitaxy

E.V. Lutsenko¹, A.V. Nahorny¹, M.V. Rzhetski¹, D.V. Nechaev², V.N. Jmerik²

¹*B.I. Stepanov Institute of Physics, NAS of Belarus, Minsk, Belarus;*
e-mail: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by

²*Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia*

We studied the photoluminescence spectra of GaN/AlN superlattices with ultrathin (1 GaN monolayer) quantum wells and barriers of 3, 4, and 6 AlN monolayers, as well as with 2 GaN monolayers and AlN barriers of 4 monolayers. It is shown that photoluminescence is mainly due to localized states of ultrathin GaN quantum wells formed by regions with thicknesses greater than the nominal one. The influence of the growth technology on the photoluminescence spectra is discussed. For the first time, at a wavelength of about 320 nm (which corresponds to radiation from 5 GaN monolayers), stimulated emission of ultrathin (2 GaN monolayers) quantum wells with TE polarization with a lasing threshold of 500 kW/cm² was obtained.

Keywords: ultrathin GaN/AlN quantum wells, photoluminescence, stimulated emission in the ultraviolet region of the spectrum.