

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ InGaN/GaN МКЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ САПФИРА И КРЕМНИЯ

В. З. Зубелевич¹, Е. В. Луценко¹, В. Н. Павловский¹, А. Л. Гурский¹,
Г. П. Яблонский¹, М. В. Danailov², Y. Dikme³, Н. Kalisch³, R. H. Jansen³,
В. Schineller⁴, М. Heuken⁴

¹Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²Laser Lab., Sincrotrone-Trieste, Italy

³Institut für Theoretische Elektrotechnik, RWTH Aachen, Germany

⁴AIXTRON AG, Aachen, Germany

Гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) на основе InGaN/GaN перспективны для создания светодиодов и инжекционных лазеров, работающих в УФ и синей областях спектра. Несмотря на высокие концентрации ($\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$) дислокаций, получены высокояркие светодиоды [1], работающие практически во всем видимом диапазоне спектра, а также фиолетово-синие инжекционные лазеры [2, 3].

Для объяснения высокой излучательной способности структур на основе InGaN был предложен механизм, согласно которому возбужденные носители эффективно захватываются в обогащенные индием области [4] благодаря меньшей ширине их запрещенной зоны. Такая локализация носителей позволяет им быть отделенными от областей с высокими концентрациями дефектов и рекомбинировать излучательно.

Получение генерации в зеленой области спектра в системе InGaN является приоритетным направлением исследований, поскольку в настоящее время нет инжекционных лазеров с приемлемыми для коммерческих приложений временами жизни, работающих в этом спектральном диапазоне. Неуклонное ухудшение качества материала квантовых ям [5], увеличивающиеся внутренние пьезоэлектрические поля (ПЭП) [6, 7], неуправляемая кластеризация индия [8] с увеличением его концентрации не позволяют получить генерацию в зеленой области спектра.

В большинстве работ, посвященных получению длинноволновой генерации на InGaN/GaN МКЯ гетероструктурах, в качестве подложки для роста использовался сапфир. Кремний, хотя и имеет большую рассогласованность по параметру решетки с нитридом галлия, чем сапфир, однако обладает рядом преимуществ: дешевизна, лучшая теплопроводность, возможность создания проводимости нужного типа, доступность подложек большой площади. Долгое время этот материал рассматривался как неперспективный для роста GaN, поскольку, остывая от ростовых температур (около 1000°C) до комнатной, GaN/Si релаксировал с образо-

ванием микротрещин, что обусловлено несогласованностью по параметрам решетки и коэффициентам термического расширения. Проблема образования микротрещин была решена введением дополнительных уменьшающих напряжение слоев до роста GaN [9]. Усовершенствование дизайна этих слоев позволило нам впервые получить генерацию сначала на эпитаксиальных слоях GaN [10], а затем и на InGaN/GaN МКЯ гетероструктурах [11], выращенных на этом материале.

В отличие от GaN/Al₂O₃, который сжат, GaN/Si находится под напряжением растяжения. Термодинамические условия осаждения тройного раствора InGaN на поверхности сжатого GaN/Al₂O₃ и растянутого GaN/Si могут существенно отличаться, что должно сказаться и на характере кластеризации индия. Из-за меньшей несогласованности решеток GaN/Si и InGaN следует ожидать меньших величин ПЭП, что должно позитивно сказаться на люминесцентных и лазерных свойствах.

В данной работе приводятся результаты исследований фотолюминесцентных и лазерных свойств InGaN/GaN МКЯ гетероструктур, выращенных на двух разных подложках. Структура №1 выращена на сапфире, имеет 5 InGaN КЯ в качестве активной области. Структура № 2 выращена на кремнии, имеет активную область из 10 InGaN КЯ. Структуры были выращены по MOVPE технологии в реакторах фирмы AIXTRON AG (Германия).

На обеих гетероструктурах была получена генерация в области 450-455 нм (Рис. 1). При этом, несмотря на большую эффективность фотолюминесценции (ФЛ) при высоких уровнях возбуждения, структура на сапфире имела в 3 раза более высокий порог генерации (90 и 30 кВт/см²).

Исследование ФЛ свойств в широком интервале уровней накачки при возбуждении выше зоны покровного слоя GaN и непосредственно в область КЯ InGaN показало, что при низких уровнях возбуждения (ниже пороговых) эффективность спонтанной рекомбинации структуры на сапфире значительно ниже, чем у структуры на кремнии. Как видно из Рис. 2, при уровнях накачки меньше 15 кВт/см² и комнатной температуре в спектре ФЛ преобладает широкая полоса желтой люминесценции (ЖЛ) из покровного и барьерных слоев GaN. При более высоких интенсивностях возбуждения проявляется полоса из МКЯ.

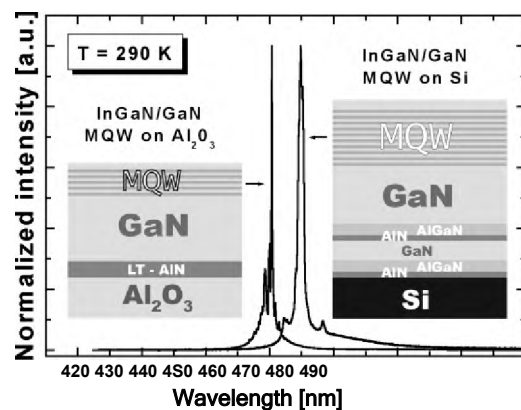


Рис. 1. Спектры генерации структур на сапфире и кремнии при комнатной температуре

Поскольку точно определить интенсивность и положение пика ФЛ из МКЯ при низких уровнях накачки трудно из-за присутствия в спектрах ЖЛ, то дополнительно были проведены измерения при возбуждении непосредственно в КЯ (т. е. с энергией квантов возбуждающего излучения меньше ширины запрещенной зоны GaN).

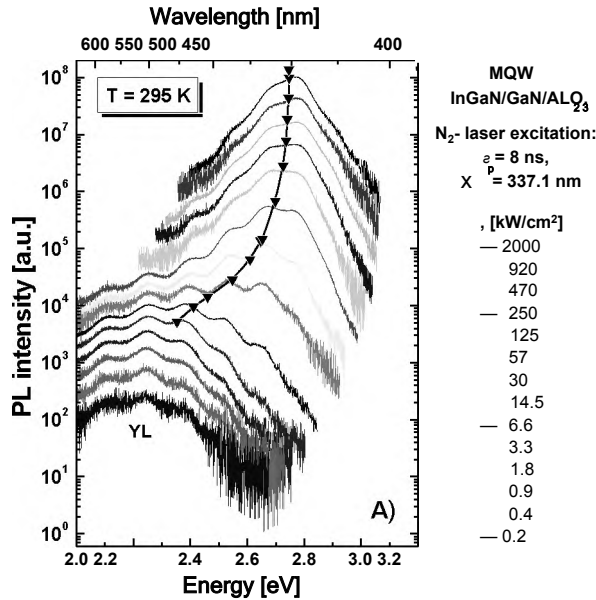


Рис. 2. Спектры ФЛ структур на сапфире при возбуждении азотным лазером и комнатной температуре.

Треугольниками обозначены положения пиков ФЛ из МКЯ, которые определялись с помощью вычета из спектров составляющей ЖЛ

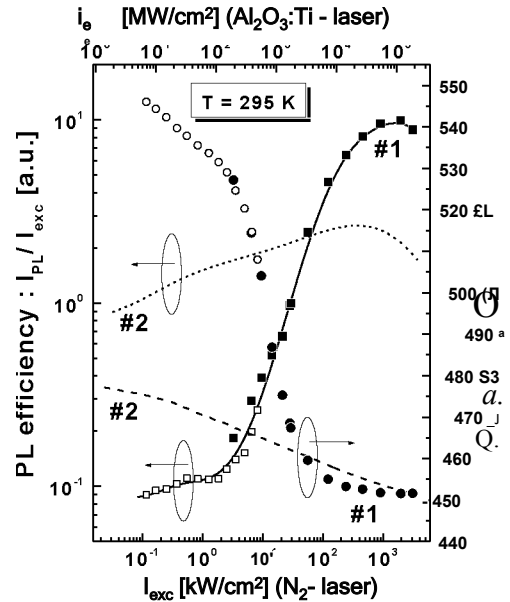


Рис. 3. Зависимости эффективности (квадраты) и положения пика (кружки) ФЛ структуры № 1 от уровня возбуждения.

Для сравнения пунктирной и штриховой линиями даны эффективность и положение пика ФЛ структуры № 2

Зависимости положения максимума и эффективности ФЛ структуры № 1 при возбуждении в GaN (заполненные символы) и в InGaN КЯ (пустые символы) представлены на Рис. 3. Видно, что при увеличении накачки с 1 до 1000 кВт/см² эффективность ФЛ возросла на 2 порядка, при этом наблюдался значительный коротковолновый сдвиг положения ФЛ, который практически прекратился уже к 100 кВт/см². Эффективность ФЛ структуры № 2 (Рис. 3, пунктир) незначительно увеличивалась до 500 кВт/см², слабое коротковолновое смещение положения пика ФЛ (штриховая кривая), не прекращалось во всем интервале накачек.

Происходящее одновременно с коротковолновым сдвигом излучения увеличение его квантового выхода свидетельствует скорее в пользу экранирования ПЭП, чем заполнения состояний в кластерах с повышенной концентрацией индия. Увеличение концентрации возбужденных носителей должно приводить к экранированию ПЭП [12], в результате чего выравнивается потенциальный профиль квантовой ямы (при этом энерге-

тический зазор между зонами проводимости и валентной возрастает) и увеличивается перекрытие волновых функций электронов и дырок (это увеличивает вероятность излучательных переходов). Однако, поскольку эффективность светодиодов на основе InGaN с длиной волны излучения $\lambda > 530$ нм резко уменьшается [1], а перестройка спектра структуры № 1 происходит почти от 550 нм, то такие глубокие кластеры могут содержать дефекты. Насыщение этих дефектных кластеров и «включение» рекомбинации через более мелкие кластеры могло бы также привести к наблюдаемому поведению спектров ФЛ. Поскольку оба подхода могут качественно объяснить наблюдаемые зависимости, то были проведены дополнительные аналогичные измерения при низкой температуре.

Понижение температуры сильно увеличило эффективность ФЛ из глубоких кластеров (полоса 1 на Рис. 4) так, что, несмотря на возбуждение в зону GaN, эта полоса по интенсивности значительно превосходит ЖЛ. Тем не менее, эффективность полосы, которая доминирует в спектре при высоких накачках (полоса 2 на Рис. 4), низка при малых уровнях возбуждения. Этот факт, а также независимое происхождение этой полосы от полосы глубоких кластеров свидетельствуют о том, что ее поведение определяется наличием внутренних ПЭП при низких уровнях возбуждения и их экранированием при повышении накачки. Сходное поведение этой полосы и полосы ФЛ из МКЯ при увеличении уровня возбуждения (ср. Рис. 2 и Рис. 4) дает основание полагать, что и при комнатной температуре ФЛ свойства структуры № 1 определяются влиянием ПЭП.

В отличие от структуры № 1 небольшой коротковолновой сдвиг спектра ФЛ структуры № 2, который наблюдается во всем исследуемом интервале уровней возбуждения (см. Рис. 3), можно объяснить заполнением флуктуаций состава. Большие ПЭП, очевидно, отсутствуют в данной структуре, так как общая перестройка спектра значительно меньше, а малые были бы экранированы при более низких уровнях возбуждения (по сравнению со структурой № 1).

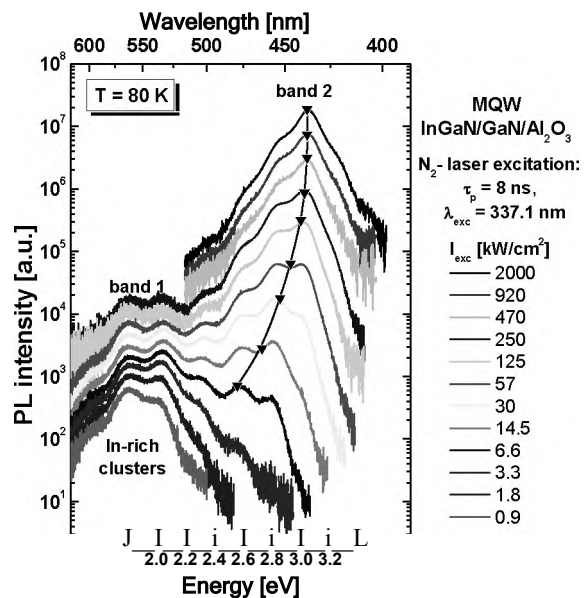


Рис. 4. Спектры ФЛ структур на сапфире при возбуждении азотным лазером и температуре жидкого азота

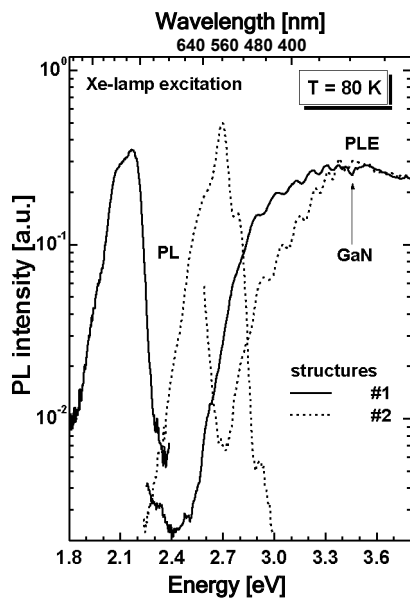


Рис. 5. Спектры ФЛ и ВФЛ

при температуре жидкого азота. В спектре ФЛ структуры на сапфире присутствует только излучение из глубоких обогащенных индием кластеров

Исследование спектров возбуждения ФЛ (ВФЛ) показало, что, край поглощения InGaN структуры № 1 смещен на величину 0.14 эВ в длинноволновую область относительно структуры № 2 (Рис. 5). В то же время, длина волны генерации структуры № 2 несколько больше (Рис. 1). Это означает, что для достижения длинноволновой генерации в структурах на кремнии требуется меньшая средняя концентрация индия.

Еще один факт, на который следует обратить внимание, это более резкий спад сигнала ВФЛ структуры № 2 сразу после прекращения поглощения в нитриде галлия. Это, по видимому свидетельствует о более сильной кластеризации индия в этой структуре.

Установлено, что фотолюминесцентные свойства InGaN/GaN МКЯ гетероструктуры, выращенной на сапфире, определяются влиянием внутренних ПЭП. Пьезополя в структуре на кремнии, по-видимому, отсутствуют или малы, так что не оказывают существенного влияния на фотолюминесцентные свойства. Рост InGaN структуры на сапфире сопровождался образованием глубоких дефектных кластеров, в то время как кластеры в структуре на кремнии мельче и менее дефектные. Для получения длинноволновой генерации в структуре на сапфире потребовалась большая, чем в структуре на кремнии, средняя концентрация индия в тройном растворе InGaN.

Следует отметить, что относительно меньшая концентрация индия, требуемая для достижения длинноволновой генерации, образование малodefekтных кластеров и отсутствие больших ПЭП делают InGaN/GaN гетероструктуры, выращенные на кремнии, весьма перспективными для получения лазеров, работающих в зеленой области спектра.

Работа выполнена при частичной поддержке проектов МНТЦ В-1043, БРФФИ Ф03-234 и Ф04М-133.

1. Mukai T., Yamada M., Nakamura S. // Jpn. J. Appl. Phys. 1999. V. 38. P. 3976.
2. Nakamura Sh., Senoh M., Nagahama Sh. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. Part 2. 1997 V. 36. P. L1568.
3. Nakamura Sh, Senoh. M., Nagahama Sh. et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 22.

4. Chichibu S., Azuhata T., Sota T. et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 4188.
5. Yablonskii G. P., Lutsenko E. V., Pavlovskii V. N. et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 2001. V. 188. P. 79.
6. Wetzel Ch., Nitta Sh., Takeuchi T. et al. // MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 1998. V. 3. Art. 31.
7. Chichibu S. F., Sota T., Wada K. et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 2001. V. 183. P. 91.
8. Nagahama S., Yanamoto T., Sano M., Mukai T. // Phys. Stat. Sol. (a). 2002. V. 190. P. 235.
9. Feltin E., Beaumont B., Laugt M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 3230.
10. Yablonskii G. P., Lutsenko E. V., Pavlovskii V. N. et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 2002. V. 192. P. 54.
11. Lutsenko E. V., Pavlovskii V. N., Zubialevich V. Z. et al. // Phys. Stat. Sol. (c). 2002. V. 0. P. 272.
12. Fiorentini V., Bernandini F., Della Sala F. et al. // Phys. Rev. B. 1998. V. 60. P. 8849.

ОПТИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ И ДИСКАМИ InGaN/GaN, CdSe/ZnMgSSe

Е. В. Луценко¹, А. В. Данильчик¹, А. Г. Войнилович¹,
А. В. Андриевский¹, Н. П. Тарасюк¹, В. Н. Павловский¹, В. З. Зубелевич¹,
А. Л. Гурский¹, Г. П. Яблонский¹, И. В. Седова², С. В. Сорокин²,
А. А. Торопов², В. А. Кайгородов², С. В. Иванов², П. С. Копьев²,
У. Дикме³, Н. Калиш³ R. Н. Jansen³, В. Schineller⁴, М. Heuken⁴

¹Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

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

³Institut für Theoretische Elektrotechnik, RWTH Aachen, Germany

⁴AIXTRON AG, Aachen, Germany

Современный уровень сложности электронных и электронно-вычислительных систем, проблемы электрических наводок и безопасности инициируют переход к волоконно-оптическому соединению устройств. Для обеспечения цифровой, видео- и аудио-связи (стандарт IEEE 1394), оптоэлектронной связи в пределах самолета и автомобиля, автоматизации производства перспективными являются световоды из органических материалов. Наиболее часто используется PMMA, что обусловлено низкой стоимостью и хорошими механическими характеристиками. Как видно из рис. 1, PMMA имеет окна прозрачности в синезеленой и желтой областях спектра, их использование дает возможность формирования линий в три раза большей протяженности, чем ныне используемое окно $\lambda = 650$ нм. Это обуславливает высокий интерес к исследованию оптического усиления полупроводниковых кванторазмерных структур, излучающих в синезеленой области спектра, таких,