

**Луценко Е.В., Павловский В.Н., Зубелевич В.З., Яблонский Г.П., Мудрый А.В., Стогний А.И.,
Гладышук А.А., Мамакин С.С., Юнович А.Э., Protzmann H., Schineller B., Heuken M.**

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ И ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ GaN

ВВЕДЕНИЕ

Крупномасштабные исследования широкозонных полупроводниковых соединений III-нитридов привели к коммерческому производству светодиодов высокой яркости синего, зеленого, желтого и белого излучения, а также импульсных и непрерывных фиолетовых инжекционных лазеров на гетероструктурах InGaN/GaN. Уже в настоящее время светодиоды на основе InGaN/GaN широко используются в устройствах регулировки дорожного движения, световых панно и начинают использоваться в осветительных приборах. Эффективность синих и зеленых светодиодов на настоящий момент уже превышает 30%. Дальнейший прогресс в этой области позволит в ближайшем будущем перевести светоизлучающие приборы, устройства и осветители на полупроводниковые технологии, что даст значительный экономический эффект.

Однако коммерческие лазеры имеют длину волны генерации между 390 и 430 нм. Имеется только одно сообщение о получении генерации в непрерывном режиме на диодах InGaN на длинах волн до 450 нм [1,2]. Для практических применений, таких как полноцветные лазерные дисплеи и лазерные проекторы с электронным возбуждением, требуется получение реального синего излучения на длинах волн, превышающих 450 нм. В нашей предыдущей работе показано, что при оптическом возбуждении можно получить генерацию на InGaN/GaN квантоворазмерных структурах до длин волн порядка 470 нм [3]. Поэтому особенно актуальным в настоящее время является вопрос об оптимизации технологических параметров роста, необходимых для получения синих лазеров, и выяснении основных причин, влияющих на возрастание порога генерации с увеличением длины волны их излучения.

Качество эпитаксиальных слоев GaN оказывает решающее влияние на порог генерации и время жизни инжекционных лазеров, выращенных на этих слоях. Высокая стоимость инжекционных лазеров на основе нитрида галлия в основном определяется технологическими процессами при выращивании эпитаксиальных слоев GaN с низкой концентрацией дислокаций. Дальнейшее повышение качества эпитаксиальных слоев, возможно, позволит отказаться в будущем от сложной технологии роста бездефектного GaN, основанной на использовании масок SiO₂, и значительно понизит стоимость этих лазеров, доведя ее до уровня, приемлемого для массового потребления.

Изучение люминесцентных и генерационных характеристик эпитаксиальных слоев при оптическом возбуждении является наиболее экспрессным методом диагностики качества и определения рекомбинационных параметров GaN. Установление важнейших оптических свойств материалов с помощью данных методов исследования особенно важно для отработки технологий роста. Особую актуальность в связи с перспективами интеграции с традиционными полупроводниковыми технологиями и дешевой кремниевых подложек

приобрела технология роста эпитаксиальных слоев GaN на Si.

В настоящей работе приводится краткий обзор исследований авторов и даются новые результаты по изучению лазеров с оптическим возбуждением и светодиодов на основе InGaN/GaN.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В настоящей работе исследовалась фотолюминесценция (ФЛ) и генерация квантоворазмерных гетероструктур на основе InGaN/GaN множественных квантовых ям (МКЯ), выращенных в планетарных реакторах AIX 2000 G3 HT фирмы AIXTRON (рис.1) на подложках (0001) сапфира по MOVPE технологии с применением TMGa, TEGa, TMIп и NH₃ в качестве источников химических элементов. После десорбции подложки при 1300°C растился переходной слой GaN при температуре 550 - 570°C с последующим отжигом. Затем выращивались буферные микронные слои GaN и GaN:Si, на которых растилось 5 или 10 квантовых ям InGaN/GaN при различных условиях роста. В качестве газов носителей использовались H₂ для GaN и N₂ для InGaN.



Рисунок 1 – Рабочая камера планетарного реактора AIX 2000.

Электролюминесцентные тестовые структуры представляли собой трех- или пятислойные InGaN/GaN МКЯ, выращенные на n-типа GaN:Si(2.8 мкм)/Al₂O₃ или GaN:Si(1 мкм)/GaN(1 мкм)/Al₂O₃ с наращенным на них слоем GaN:Mg (200-400 нм) p-типа в планетарных MOVPE реакторах фирмы AIXTRON.

Исследовались также эпитаксиальные слои нитрида галлия, выращенные методом MOVPE на подложках сапфира (0001) и кремния (111). Слои GaN имели толщину от 1.5 до 3 мкм, и различались термодинамическими условиями роста. В качестве переходного слоя при росте на Al₂O₃ использовался

Луценко Е.В., Павловский В.Н., Зубелевич В.З., Гурский А.Л., Яблонский Г.П. Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Беларусь, 220072, Минск, пр. Ф. Скорины 68, e-mail: lutsenko@dragon.bas-net.by

Мудрый А.В., Стогний А.И. ИФТТП НАН Беларуси.

Беларусь, 220072, Минск, ул. П. Бровки 17.

Гладышук А.А. Зав. каф. физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, Брест, ул. Московская, 267.

Schineller B., Alam A., Dikme Y., Heuken M. AIXTRON AG, KACKERTSTR. 15-17, D-52072 AACHEN, GERMANY.

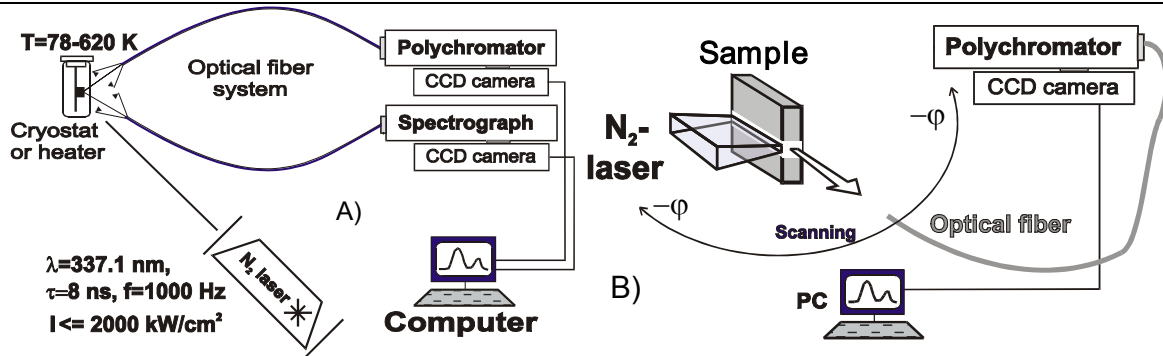


Рисунок 2 – Блок схемы экспериментальных установок:

- А) установка для изучения фотолюминесценции и генерации при импульсном возбуждении;
- В) установки спектроскопии дальнего поля генерации.

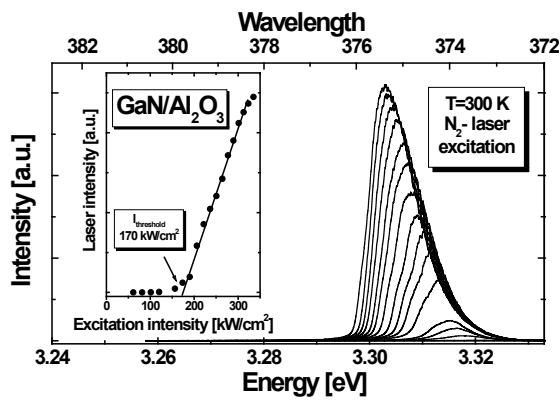


Рисунок 3 – Спектры и интенсивность (вставка) генерации GaN/Al₂O₃ при различных уровнях возбуждения.

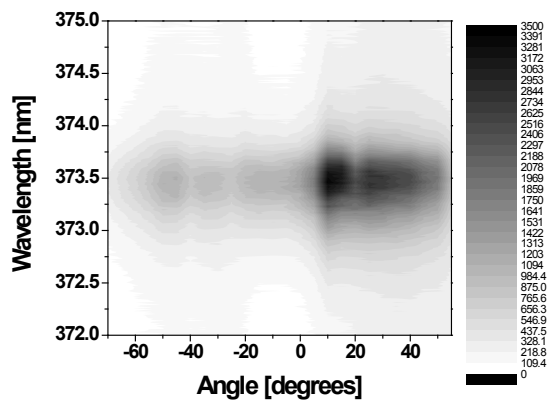


Рисунок 4 – Спектрально-угловое распределение излучения GaN/Al₂O₃ лазера в дальнем поле генерации.

низкотемпературный слой GaN, а на кремниевых подложках - переходной слой AlN (иногда использовалось два слоя AlN). Все эпитаксиальные слои были выращены также на MOVPE реакторах фирмы AIXTRON.

Спектры ФЛ и генерации InGaN/GaN МКЯ гетероструктур исследовались при различных плотностях мощности возбуждающего излучения азотного лазера ($\lambda = 337.1$ нм, $\tau_{\text{имп}} = 8$ нс, $f = 1000$ Гц, $I_{\text{возб}} = 10^3 - 10^6$ Вт/см²) в широком температурном интервале (78-500 К). Генерация возбуждалась полоской излучения азотного лазера шириной 50 - 100 мкм, сфокусированного при помощи цилиндрической линзы перпендикулярно сколам образца шириной 500 - 1000 мкм. Для измерений спектров возбуждения фотолюминесценции использовалось излучение ксеноновой лампы.

Электролюминесценция (ЭЛ) возбуждалась источниками постоянного стабилизированного напряжения и тока, а также импульсами напряжения длительностью 100 нс. Для возбуждения электролюминесценции использовались как точечные контакты, так и полосковые Ni контакты длиной 750-1000 мкм, шириной 10-20 мкм, напыленные на GaN:Mg p-типа, и In контакты к GaN:Si n-типа. Структуры формировались реактивным ионным травлением.

Регистрация излучения осуществлялась при помощи полихроматора, спектрографа СТЭ-1 и монохроматора МДР-6У на CCD линейку (Рисунок 2а) или монохроматора МДР-23 с ФЭУ Hamamatsu R-4632.

Угловое распределение излучения в дальнем поле генерации измерялось в плоскости, перпендикулярной гетероструктуре, с помощью оптоволоконной системы (Рисунок 2в). Отрицательные углы отсчитывались в направлении подложки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Фотолюминесценция и генерация эпитаксиальных слоев GaN

Стимулированное излучение и генерация наблюдались практически во всех нелегированных эпитаксиальных слоях GaN/Al₂O₃. Причем, как было показано ранее [4], эффективность излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда выше в образцах с большей интенсивностью желтой люминесценции при низких уровнях возбуждения. Все образцы показали ярко выраженный порог генерации для излучения ТЕ поляризации (Рисунок 3). Минимальный порог генерации при комнатной температуре составил 170 кВт/см².

Спектрально - угловое распределение излучения в дальнем поле генерации представлено на рисунке 4. В дальнем поле генерации при комнатной температуре наблюдалась несимметричная относительно плоскости гетероструктуры световая картина, обусловленная вытекающими в подложку и воздух модами. Такое пространственное распределение излучения может быть вызвано тем, что глубина усиливающего (активного) слоя мала из-за большого коэффициента поглощения излучения азотного лазера эпитаксиальным слоем GaN. При этом вследствие асимметрии волновода (воздух - активная область GaN - пассивная область GaN) локализации

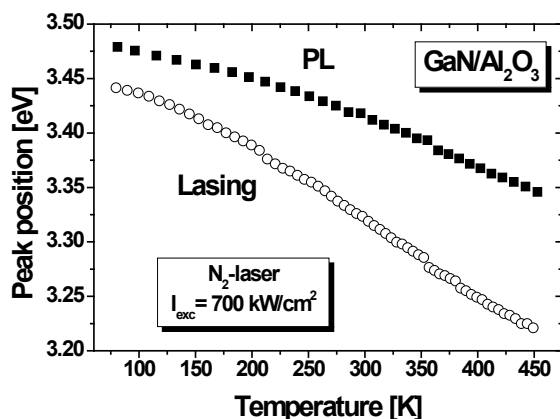


Рисунок 5 – Зависимость спектрального положения максимумов ФЛ и генерации от температуры.

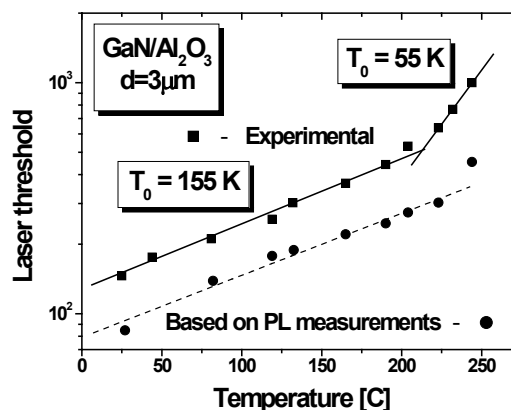


Рисунок 6 – Температурная зависимость порога генерации эпитаксиальных слоев GaN/Al₂O₃.

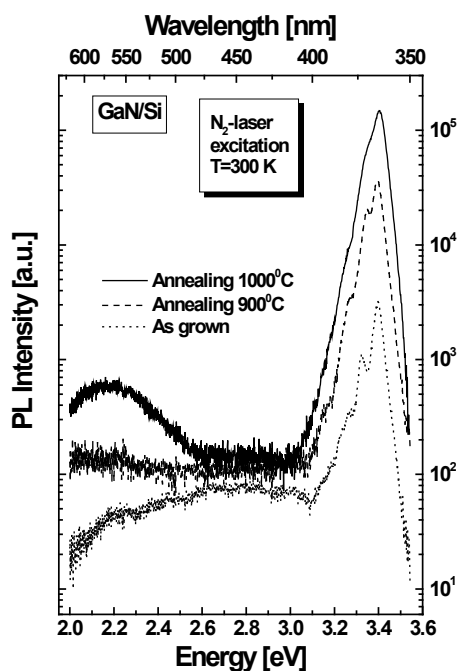


Рисунок 7 – Спектры ФЛ исходного и отожженных образцов GaN/Si.

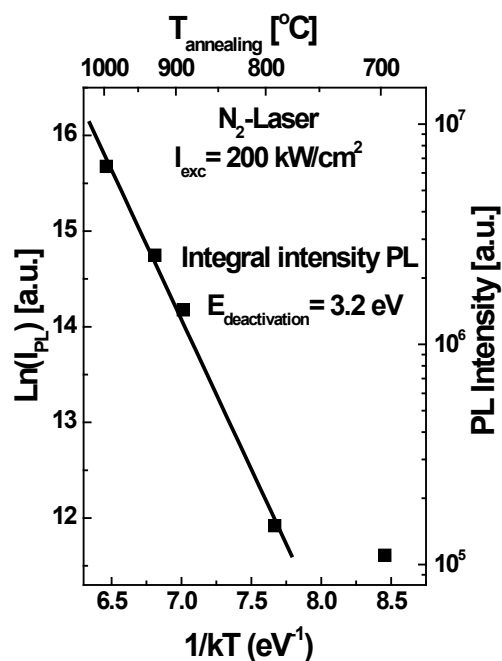


Рисунок 8 – Интенсивность краевой ФЛ как функция температуры отжига.

волновода выступает весь эпитаксиальный слой GaN. Поскольку толщина активного слоя мала по сравнению с толщиной эпитаксиального слоя, максимум фактора оптического ограничения будет наблюдаться для мод высокого порядка. Действительно, форма дальнего поля излучения показывает, что величина фактора оптического ограничения максимальна для вытекающих в воздух мод.

Были измерены люминесцентные и лазерные характеристики эпитаксиальных слоев GaN/Al₂O₃ при оптической накачке в диапазоне температур 78 – 500 К. С увеличением температуры от 78 до 300 К интенсивность стимулированного излучения при фиксированном уровне накачки изменялась незначительно, в то время как интенсивность спонтанного излучения при этом же уровне накачки значительно умень-

валось. При низких температурах (менее 150 К) стимулированное излучение наблюдалось на фоне люминесценции, что возможно связано с небольшими значениями коэффициента усиления, вызванными уменьшением концентрации неравновесных носителей заряда в активной области за счет разбегания вследствие их большой подвижности. Как известно [5], для температур более 150 К подвижность носителей уменьшается. И в спектрах излучения выше этой температуры наблюдается стимулированное излучение, имеющее ТЕ поляризацию и ярко выраженный порог.

На рисунке 5 показана зависимость спектрального положения максимума ФЛ и генерации от температуры. Перестройка длины волны генерации составила 35 нм (360 - 395 нм) при изменении температуры от 78 до 500 К. Как видно из рисунка, с увеличением температуры возрастает интервал

между положениями максимумов ФЛ и генерации. Скачки в положении длины волны генерации при температурах выше 300 К обусловлены перескоком мод генерации. Увеличение интервала между положениями максимумов ФЛ и генерации, как отмечалось авторами работы [6], свидетельствует о том, что усиление обусловлено рекомбинацией электронно-дырочной плазмы.

Исследование температурной зависимости порога генерации показало, что имеются два интервала температур, в которых есть различия в поведении порога. Как видно из рисунка 6 (сплошная прямая), с увеличением температуры от комнатной до 210°C (483 K), порог генерации увеличивается экспоненциально с характеристической температурой $T_0 = 155$ K. Для температур выше 210°C, порог генерации возрастает более резко с характеристической температурой $T_0 = 55$ K (рисунок 6, сплошная прямая). Уменьшение величины характеристической температуры при рабочих температурах выше 210°C связано с деградацией поверхности эпитаксиальных слоев GaN/Al₂O₃ под действием высоких температур и больших плотностей мощности возбуждения (> 500 кВт/см²).

Специально для сопоставления с порогами генерации, измеренными при различных температурах, были проведены измерения спектров фотolumинесценции при соответствующих этим порогам плотностях мощности возбуждения и температурах. Характеристики спонтанного излучения, такие, как положение максимума $h\nu$ и полуширина спектра люминесценции $\Delta(h\nu)$, эффективность спонтанной рекомбинации η_{sp} , измеренная в относительных единицах, с помощью формулы (3.8.44):

$$I_{порог} \sim \frac{(h\nu)^2 \cdot \Delta(h\nu)}{\Gamma \eta_{sp}}, \quad (1)$$

предложенной в монографии [7], сопоставлялись с измеренными порогами генерации (рисунок 6, пунктирная кривая). Как видно из рисунка, именно влияние температуры на полуширину и эффективность спонтанного излучения определяют ход температурной зависимости порога генерации эпитаксиальных слоев GaN.

Были проведены исследования люминесцентных характеристик эпитаксиальных слоев GaN, выращенных на кремневых подложках. Слои GaN выращены с применением буферного слоя AlN на кремнии. В некоторых образцах использовался также низкотемпературный промежуточный слой AlN, расположенный между слоями GaN.

Все исследуемые эпитаксиальные слои GaN/Si показали значительно меньшую по сравнению с GaN/Al₂O₃ эффективность излучательной рекомбинации. Ранее нами было установлено [8], что отжиг в атмосфере азота с подсветкой ультрафиолетовым излучением может приводить к значительному (до 25 раз) возрастанию интенсивности ФЛ слоев InGaN. Причем, возрастание интенсивности люминесценции в отожженных квантоворазмерных структурах InGaN/GaN происходило за счет сглаживания флуктуаций потенциала и улучшения качества обкладочных слоев GaN. Поэтому были проведены серии тридцатиминутных отжигов эпитаксиальных слоев GaN/Si при различных температурах в кварцевых ампулах в потоке азота при подсветке излучением азотного лазера.

На рисунке 7 в полулогарифмическом масштабе представлены спектры ФЛ исходного и подвергнутого отжигу с ультрафиолетовой подсветкой эпитаксиальных слоев GaN/Si при различных температурах. Для температур отжига более 800°C наблюдалось значительное увеличение интенсивности ФЛ. Интенсивность ФЛ увеличивалась в 50 раз после отжига при 1000°C по сравнению с интенсивностью ФЛ исходного образца. Отжиг без ультрафиолетовой подсветки давал меньшие значения возрастания интенсивности люминесценции.

Как видно из рисунка, с повышением температуры отжига не только возрастает интенсивность полосы рекомбинации электронно-дырочной плазмы, но и появляется полоса желтой люминесценции, интенсивность которой также повышается с увеличением температуры отжига, что связано с уменьшением концентрации центров безызлучательной рекомбинации и увеличением концентрации собственных дефектов, ответственных за желтую люминесценцию.

На рисунке 8 представлена интегральная интенсивность краевой ФЛ отожженных образцов GaN/Si. Из рисунка видно, что энергия активации краевой люминесценции равна примерно 3 эВ, что близко к энергиям диссоциации комплексов с участием глубоких уровней [9]. Это позволяет предположить, что отжиг подобных комплексов может объяснить наблюдаемое явление. При удалении поверхностного слоя с помощью ионного травления интенсивность фотolumинесценции отожженных образцов превышала интенсивность исходных. Это показывает, что изменение интенсивности ФЛ в результате отжига связано с изменением оптического качества в объеме слоя GaN.

Дальнейшее исследование фотolumинесценции GaN/Si при низких температурах и плотностях мощности возбуждающего излучения показало, что после отжига в спектрах краевого излучения разгорается интенсивная полоса 3,36 эВ, спектральное положение которой стабильно в диапазоне температур 17-200 K. Данная полоса практически отсутствует в спектрах исходных образцов. При более высоких температурах наблюдается сдвиг этой полосы, соответствующий температурному сужению запрещенной зоны. Энергия активации термического тушения этой полосы составляет около 30 мэВ. Возможной причиной появления этой полосы, по-видимому, может являться образование центров с участием протяженных собственных дефектов. Однако для выявления природы полосы требуются дополнительные исследования.

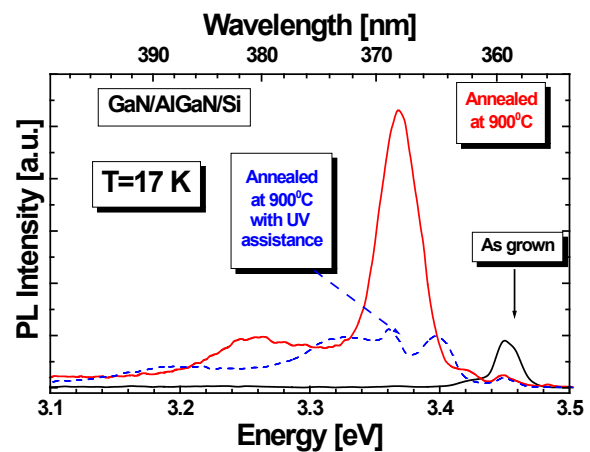


Рисунок 9 – Спектры ФЛ исходного и отожженных образцов GaN/Si при T=17 K.

Фотolumинесценция и генерация квантоворазмерных структур на основе нитрида галлия

Исследовались люминесцентные и лазерные характеристики при оптической накачке квантоворазмерных гетероструктур на основе InGaN/GaN, отличающихся параметрами роста без существенного изменения геометрических параметров гетероструктур. Варьировались такие параметры, как температура роста, соотношение потоков газов как при росте InGaN, так и при росте барьерных слоев GaN. Генерация на данных структурах была получена в интервале длин волн 400 - 470 нм. На рисунке 10 представлены спектры генерации

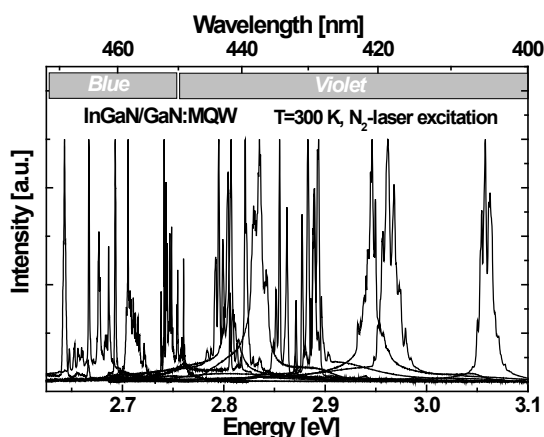


Рисунок 10 – Спектры генерации InGaN/GaN МКЯ при оптической накачке.

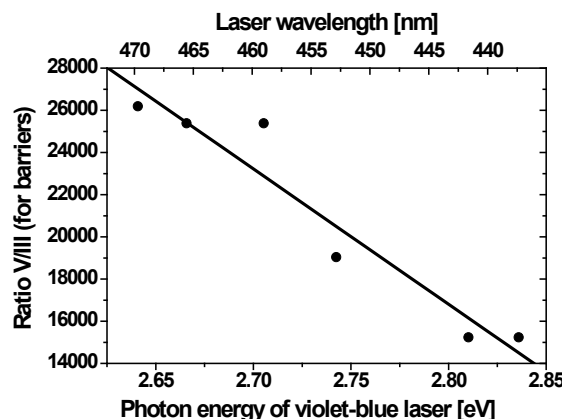


Рисунок 11 – Зависимость длины волны генерации синих InGaN/GaN МКЯ лазеров от соотношения потоков газов V/III при росте барьеров.

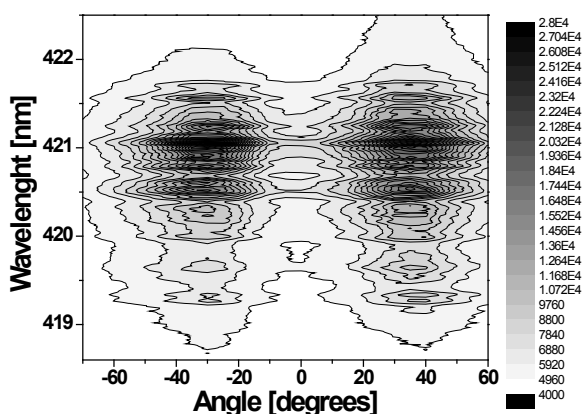


Рисунок 12 – Спектрально угловое распределение излучения InGaN/GaN МКЯ в дальнем поле генерации на поперечных модах.

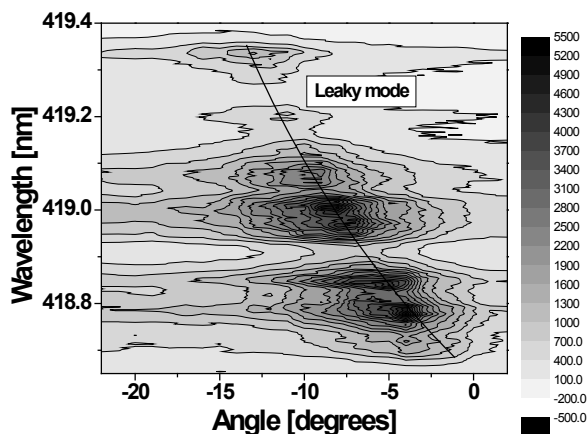


Рисунок 13 – Спектрально угловое распределение излучения InGaN/GaN КЯ в дальнем поле генерации на вытекающих модах.

порога.

Сопоставление параметров роста гетероструктур, имеющих одинаковый дизайн, с длиной волны генерации показало, что наиболее существенным фактором, влияющим на длину волны генерации InGaN/GaN МКЯ, является соотношение потоков газов V/III при росте барьерных слоев GaN. На рисунке 11 представлен график зависимости длины волны генерации от соотношения потоков газов V/III. Как видно из графика, с увеличением соотношения между потоками газов V/III длина волны генерации увеличивается.

Все исследованные структуры обладали ярко выраженным порогом генерации. При накачке выше пороговых значений, наблюдалось излучение, имеющее ТЕ поляризацию и модовую структуру спектра. Дальнее поле генерации в зависимости от толщины активной области имело или симметричную структуру относительно плоскости гетероструктуры (рисунок 12), определяемую поперечными модами, или асимметричную (рисунок 13), определяемую вытекающими модами. Причем генерация на вытекающих модах наблюдалась в

активной области менее 65 нм.

Минимальный порог генерации в исследованных квантоворазмерных гетероструктурах составлял 35 кВт/см² для фиолетовых и 50 кВт/см² для синих лазеров. Минимальная полуширина спектра генерации при уровнях возбуждения вблизи порога была 0.02 нм для фиолетовых и 0.05 нм для синих лазеров. Максимальная импульсная мощность достигала величины 80 Вт для фиолетовых и 40 Вт для синих лазеров. Максимальная дифференциальная внешняя квантовая эффективность генерации составила 3%.

С увеличением длины волны генерации синих лазеров происходит резкое возрастание порога генерации. Из рисунка 14 видно, что порог генерации фиолетово-синих лазеров возрастает экспоненциально от 70 до 900 кВт/см² при увеличении рабочей длины волны от 420 до 470 нм. Вследствие повышения порога генерации с увеличением рабочей длины волны происходит плавное уменьшение максимальной рабочей температуры лазеров. Рисунок 14 показывает, что максимальная рабочая температура уменьшается от 585 К до 300 К с увеличением рабочей длины волны от 420 до 470 нм.

На рисунке 15 представлены спектры ФЛ при различных лазерах на основе InGaN/GaN МКЯ совместно со спектрами

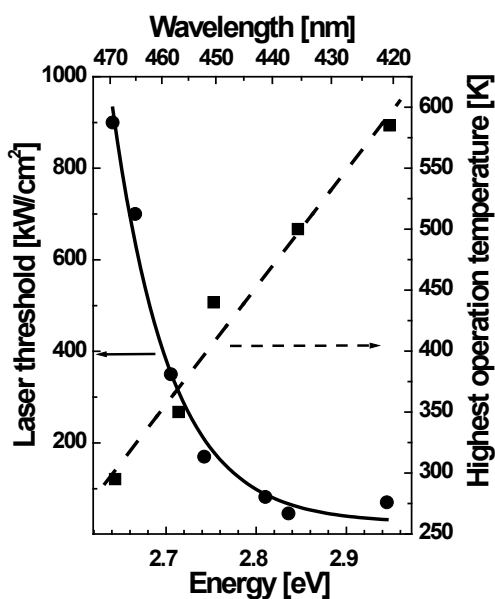


Рисунок 14 – Зависимость порога генерации и максимальной рабочей температуры InGaN/GaN МКЯ от длины волны генерации.

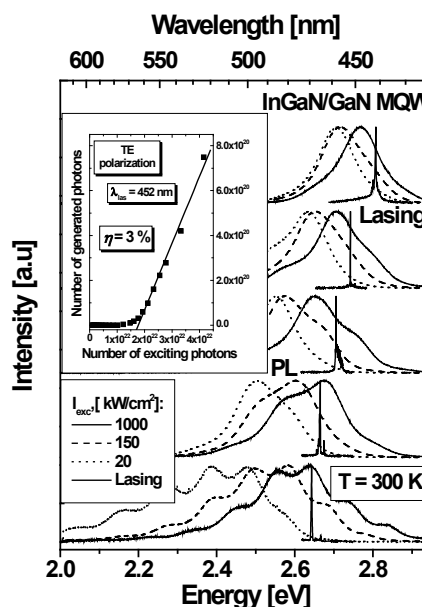


Рисунок 15 – Спектры ФЛ (при различных уровнях возбуждения) и генерации (в пороге) InGaN/GaN МКЯ.

Вставка: пороговая характеристика.

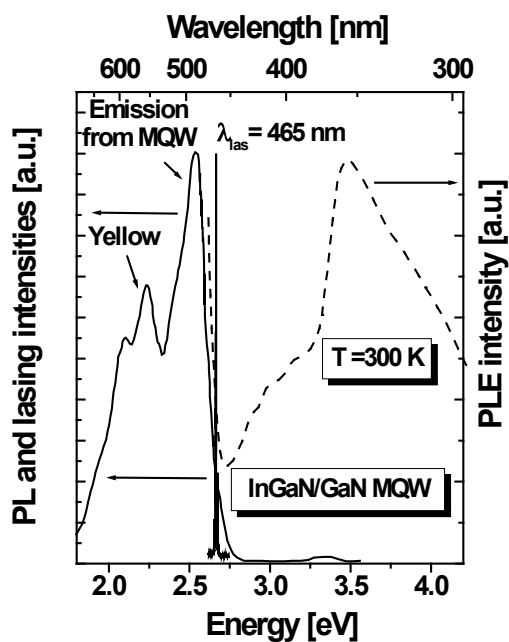


Рисунок 16 – Спектры ФЛ, возбуждения ФЛ и генерации InGaN/GaN МКЯ.

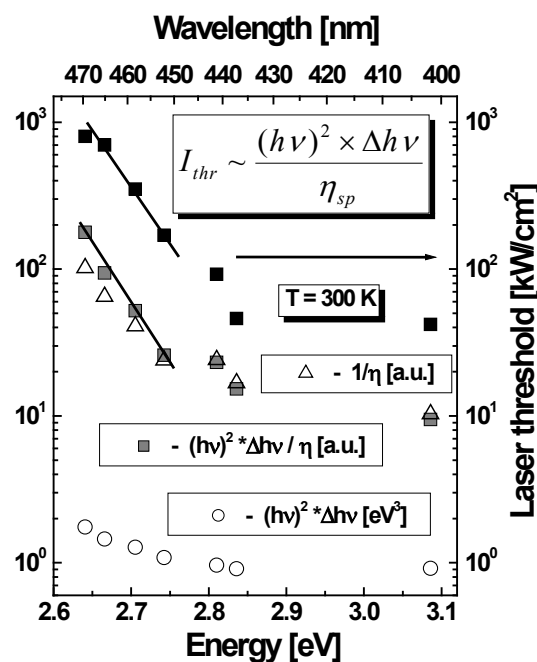


Рисунок 17 – Зависимость порога генерации и характеристик спонтанного излучения InGaN/GaN МКЯ от длины волны генерации.

уровнях возбуждения и спектры генерации синих лазеров при уровнях накачки вблизи порога. Сопоставление спектров фотолюминесценции и генерации показывает, что линия генерации находится на коротковолновом краю фотолюминесценции при уровнях возбуждения, соответствующих порогу генерации. Спектр возбуждения фотолюминесценции синих

генерации и ФЛ показан на рисунке 16. Как видно из этого рисунка, линия генерации находится в длинноволновой области относительно середины спада полосы возбуждения InGaN/GaN МКЯ. Такое спектральное положение линии генерации относительно спектров возбуждения люминесценции свидетельствует о том, что генерация возникает вблизи края

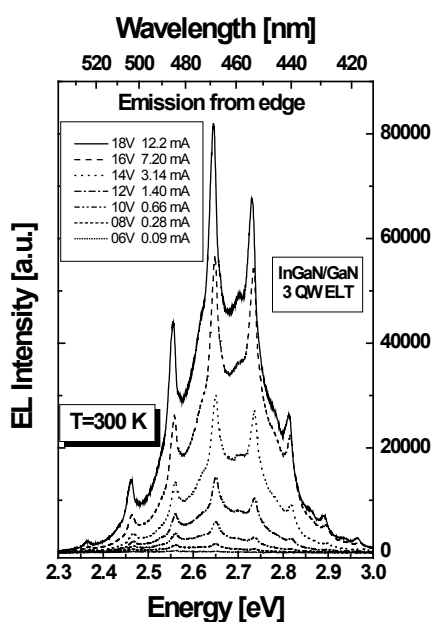


Рисунок 18 – Спектры ЭЛ InGaN/GaN МКЯ для различных токов накачки при регистрации излучения из подложки.

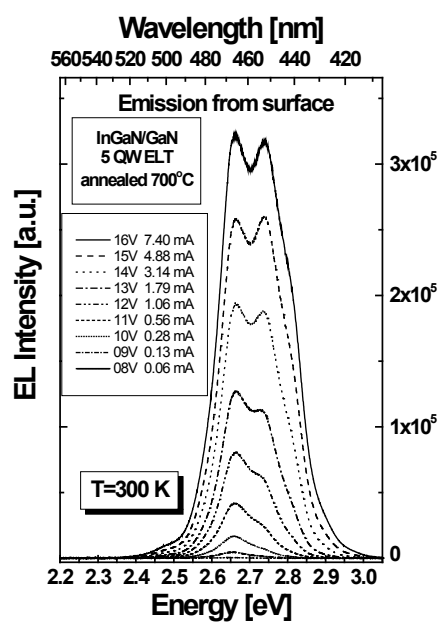


Рисунок 19 – Спектры ЭЛ InGaN/GaN МКЯ, для различных токов накачки при регистрации излучения с поверхности гетероструктуры.

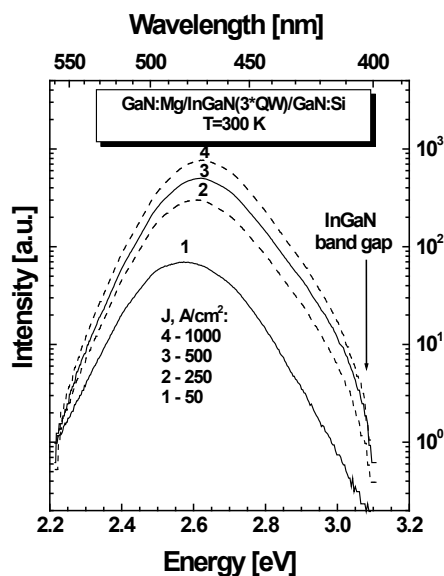


Рисунок 20 – Спектры ЭЛ InGaN/GaN МКЯ в полугарифмическом масштабе при возбуждении в полосковой геометрии.

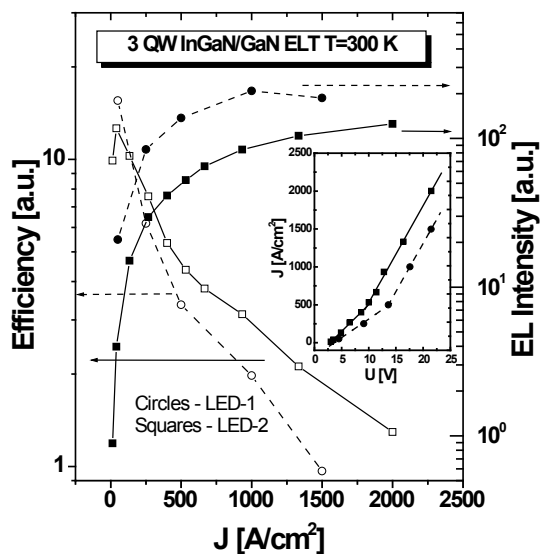


Рисунок 21 – Зависимость эффективности и интенсивности ЭЛ InGaN/GaN МКЯ от плотности тока.

Вставка: вольтамперная характеристика

о возможном вкладе локализованных состояний в формировании спектров усиления и генерации.

Для выявления влияния люминесцентных характеристик на пороги генерации лазеров, излучающих в фиолетовой - синей области спектра, были проведены измерения спектров фотолюминесценции всех гетероструктур в сравнительных единицах при плотностях мощности возбуждающего излучения, соответствующих порогам генерации этих лазеров. Характеристики спонтанного излучения, такие, как положение

интенсивность спонтанной рекомбинации (измеренная в относительных единицах), с помощью формулы (3.8.44) [7] (рисунок 17, серые квадраты) сопоставлялись с измеренными порогами генерации (рисунок 17, черные квадраты). Как видно из рисунка, именно падение эффективности спонтанного излучения (рисунок 17, треугольники) в длинноволновых лазерах вносит наибольший вклад в повышение порогов генерации InGaN/GaN МКЯ с ростом длины волны генерации.

Электролюминесценция и генерация тестовых инжекционных квантоворазмерных структур на основе InGaN

Были исследованы спектры электролюминесценции, фотолуминесценции, возбуждения фотолуминесценции и генерации тестовых инжекционных InGaN/GaN МКЯ с различным количеством ям (3 и 5 ямы InGaN).

Послойное стравливание образцов ионно-лучевыми методами показало, что с уменьшением толщины слоя GaN:Mg интенсивность фотолуминесценции из InGaN/GaN МКЯ постепенно увеличивается на порядок, пока травление не достигнет областей, непосредственно прилегающих к квантовой размерной структуре. При дальнейшем травлении интенсивность фотолуминесценции из InGaN/GaN МКЯ уменьшается. Интенсивность ультрафиолетовой полосы фотолуминесценции (365 нм), обусловленной рекомбинацией неравновесных носителей заряда в эпитаксиальных солях GaN:Mg и GaN:Si, также увеличивается с что с уменьшением толщины слоя GaN:Mg. Причем она возрастает на два порядка.

Такое поведение фотолуминесценции позволяет утверждать, что слой GaN:Mg р-типа проводимости имеет плохое качество и содержит большую концентрацию безызлучательных дефектов. Спектры возбуждения люминесценции этих структур также показывают, что возбуждение через слой GaN:Mg как минимум на порядок менее эффективно, чем непосредственно в ямы.

Положение и форма спектров электролюминесценции InGaN/GaN МКЯ сильно зависели от плотности тока через гетероструктуру и регистрации. При регистрации излучения, выходящего из подложки гетероструктур, на спектре электролюминесценции наблюдались ярко выраженные максимумы, обусловленные вытекающими в подложку модами (рисунок 18), как это ранее наблюдалось для фотолуминесценции и генерации [10]. А при регистрации электролюминесценции с поверхности образца, спектр был деформирован интерференцией (рисунок 19).

Наблюдалось смещение максимума спектра электролюминесценции гетероструктур с тремя InGaN/GaN МКЯ при увеличении плотности тока от 530 до 470 нм. Спектры электролюминесценции InGaN/GaN МКЯ с тремя ямами в зависимости от плотности тока накачки при полосковой геометрии возбуждения приведены в полулогарифмическом масштабе на рисунке 20. Как видно из рисунка, с повышением плотности тока наблюдается коротковолновый сдвиг ЭЛ. При этом на коротковолновом крыле спектра при высоких плотностях тока накачки виден резкий обрыв, обусловленный

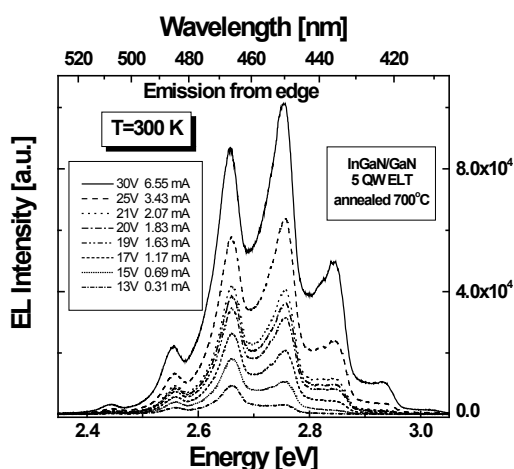


Рисунок 22 – Спектры ЭЛ InGaN/GaN МКЯ для различных токов накачки при регистрации излучения из подложки

перепоглощением собственного излучения внутри активного слоя InGaN.

На рисунке 21 представлены интенсивность и эффективность ЭЛ при комнатной температуре в относительных единицах, вычисленная как отношение интегральной интенсивности ЭЛ к электрической мощности, падающей на диоде, для двух полосковых диодных структур (LED-1 - 10x750 мкм² и LED-2 - 20x1000 мкм²). Диодная структура LED-1 в качестве одного из отражателей имела 90° призму, сформированную ионным травлением. Интенсивность электролюминесценции демонстрировала сублинейный рост и насыщалась при больших значениях плотности тока, что связано с разогревом диодов при больших токах [11,12]. Эффективность ЭЛ понижалась постепенно при уменьшении плотности тока до 500 А/см², после чего понижение продолжалось с меньшим наклоном. Вольт – амперные характеристики (рисунок 21, вставка) показали возрастание наклона при этих плотностях тока, что показывает значительное улучшение электрических характеристик диодов.

Такое улучшение электрических свойств может быть вызвано изменением проводимости вследствие увеличения концентрации неравновесных носителей заряда вблизи зоны проводимости ям InGaN и насыщения хвостов плотности состояний с преодолением порога подвижности. Это обосновывается тем, что при уровнях плотности тока около 500 А/см² и более наблюдается излучение с перепоглощенным коротковолновым крылом (рис. 20) обусловленным поглощением в зоне проводимости слоев InGaN.

Спектры возбуждения фотолуминесценции InGaN/GaN МКЯ при 4.2 К показали большой Стоксов сдвиг спектра люминесценции относительно полосы возбуждения и непрерывное гладкое распределение кластеров индия. Сдвиг длины волны максимума электролюминесценции от зеленой до голубой области спектра является дополнительным доказательством такого механизма электролюминесценции.

Таким образом, спектры излучения, эффективность и вольт-амперные характеристики изменяются вследствие заполнения хвостов зоны и появления существенной концентрации свободных носителей заряда в квантовых ямах.

Для определения качества активного слоя InGaN/GaN МКЯ электролюминесцентных структур большая часть верхнего слоя GaN:Mg снималась реактивным ионным травлением. При этом прокатка квантоворазмерных гетероструктур излучением азотного лазера контролировалась по интенсивности синей фотолуминесценции. После снятия эпитаксиаль-

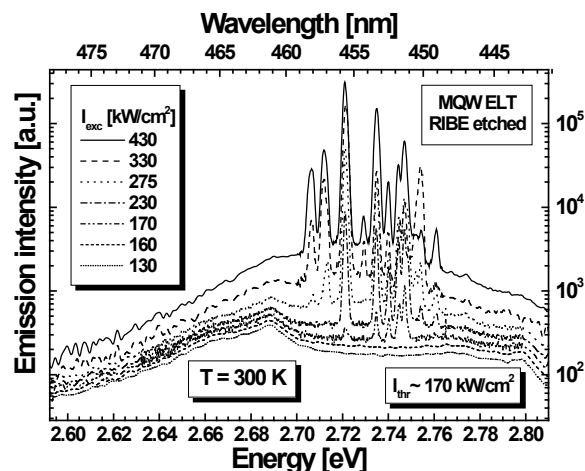


Рисунок 23 – Спектры ФЛ и генерации в зависимости от плотности мощности оптического возбуждения.

ного слоя GaN:Mg на пяти-ямной InGaN/GaN МКЯ электролюминесцентной структуре скальвированием формировался резонатор Фабри-Перо.

При возбуждении полоской излучения азотного лазера на этом образце была получена генерация вблизи длины волны 455 нм (рисунок 21). Минимальный порог генерации составил величину 140 кВт/см² при комнатной температуре. Для сравнения, InGaN/GaN МКЯ, выращенные без слоя GaN:Mg и имеющие длину волны генерации 453 нм, обладали порогом генерации около 100 кВт/см² при комнатной температуре. Отсюда следует вывод, что активная область InGaN/GaN МКЯ обладает достаточно высоким качеством, поскольку такое увеличение порога генерации можно отнести за счет приведенной ионным травлением дефектности [13].

Таким образом, показано, что в исследованных инжекционных структурах активная область InGaN/GaN МКЯ не подверглась значительному ухудшению при наращивании верхнего GaN:Mg р-слоя, что является основной причиной деградации слоев InGaN, как отмечалось в [2]. Необходимо также отметить, что создание инжекционных лазеров на основе подобных гетероструктур позволило бы кардинально снизить их стоимость.

Основные результаты и выводы

При комнатной температуре в интервале длин волн 374 - 470 нм при оптическом возбуждении получена генерация эпитаксиальных слоев и гетероструктур на основе GaN. Генерация наблюдалась на поперечных и вытекающих модах.

Впервые получена генерация InGaN/GaN МКЯ на длинах волн, соответствующих синему цвету существующих цветовых стандартов. Минимальные порог и полуширина спектра генерации, максимальная импульсная мощность генерации составили 35 кВт/см², 0.02 нм, 80 Вт для фиолетовых и 50 кВт/см², 0.05 нм, 40 Вт для синих лазеров соответственно.

Показано, что наиболее существенный вклад в повышение порога генерации с увеличением длины волны излучения синих лазеров InGaN/GaN МКЯ вносит уменьшение квантового выхода спонтанного излучения.

Изучено температурное поведение порога генерации эпитаксиальных слоев GaN и показано, что зависимость порога генерации от температуры определяется характеристиками спонтанного излучения.

Исследовано влияние отжига на эпитаксиальные слои GaN, выращенные на кремниевых подложках. Возрастание до 50 раз интенсивности излучательной рекомбинации, по видимому, вызвано диссоциацией безызлучательных центров с энергией активации порядка 3 эВ с образованием собственных дефектов.

Изучены спектральные и вольт-амперные характеристики электролюминесцентных структур и диодов на основе GaN. Спектр излучения, эффективность и вольт-амперные характеристики изменяются вследствие заполнения хвостов зоны и появления существенной концентрации свободных носителей заряда в квантовых ямах.

Показано, что в инжекционных структурах, потенциально применимых для создания синих лазеров, выращенных на реакторах фирмы AIXTRON, активная область InGaN/GaN МКЯ не подверглась значительному ухудшению при наращивании верхнего GaN:Mg р-слоя.

На пороге двадцать первого века нитридными технологиями был совершен настоящий прорыв, что сделало коммерчески доступными высокоэффективные полупроводниковые источники излучения ближней ультрафиолетовой - желтой области спектра, а также белого света. Дальнейший прогресс и большие научные ресурсы в данной области исследований позволяют надеяться, что уже в ближайшем будущем такие

источники излучения появятся не только на улицах наших городов, но и войдут в каждый дом.

Работа частично выполнена в рамках проекта МНТЦ #В-176 и гранта Президиума НАН Беларуси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Matsushita, T. Mukai. Blue InGaN-based laser diodes with an emission wavelength of 450 nm// Appl. Phys. Lett., **76** (1999), pp. 22-24.
2. S. Nagahama, T. Yanamoto, M. Sano, T. Mukai. Wavelength dependence of InGaN laser diode characteristics// Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001), part 1, pp. 3075-3081.
3. G. P. Yablonskii, E. V. Lutsenko, V. N. Pavlovskii, I. P. Marko, A. L. Gurskii, V. Z. Zubialevich, A. L. Mudryi, O. Schoen, H. Protzmann, M. Luenenbuerger, B. Schineller, M. Heuken, H. Kalisch, K. Heime. Blue InGaN/GaN multiple-quantum-well optically pumped lasers with emission wavelength in the spectral range of 450-470 nm// Appl. Phys. Lett. **79** (2001), pp. 1953-1955.
4. E. V. Lutsenko, G. P. Yablonskii, V. N. Pavlovskii, V. Z. Zubialevich, I. P. Marko, M. Heuken, B. Schineller, K. Heime. Transverse optically pumped lasers based on GaN epitaxial layers/ Тезисы 4^{го} всероссийского совещания "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы" Санкт-Петербург, 2000, с. 5-6.
5. S. Dhar, S. Ghosh. Low field electron mobility in GaN//J. Appl. Phys. **86** (1999), pp. 2668-2676
6. S. Bidnyk, T. J. Schmidt, B. D. Little, J. J. Song. Near-threshold gain mechanisms in GaN thin films in the temperature range of 20-700 K// Appl. Phys. Lett. **74** (1999), pp. 1-3.
7. Х. Кейси, М. Паниш Лазеры на гетероструктурах/ Мир, М., 1981. Т. 1, с. 213.
8. P. Marko, E. V. Lutsenko, V. N. Pavlovskii, G. P. Yablonskii, O. Schoen, H. Protzmann, M. Luenenbuerger, M. Heuken, B. Schineller, K. Heime. Influence of UV Light-Assisted Annealing on Optical Properties of InGaN/GaN Heterostructures Grown by MOVPE// Phys. Stat. Sol. (b) (1999). V. 216, pp.175-179.
9. S. U. Yuldashev, Tae Won Kang, Woon Hyung Jung et al. Annealing effect on passivated deep levels in GaN epitaxial layers// Jpn. J. Appl. Phys. v. 39 (2000) Part 1, # 9A, pp. 5044-5047.
10. Е.В. Луценко. Люминесценция и генерация, обусловленные вытеканием мод, в одинарных и двойных асимметричных гетероструктурах на основе GaN/ Лазерная и опико-электронная техника: Сборник научных статей. Выпуск 5. Отв. ред. И.С. Манак. - Мн.: БГУ, 2000. - 158 с. С 55-62.
11. Shuji Nakamura, Masayuki Senon, Naruhito Iwasa, Shin-ichi Nagahama, Takao Yamada and Takashi Mukai / Jpn. J. Appl. Phys. **34** (1995), pp. L1332.
12. M. Hansen, P. Kozodoy, S. Keller, U. Mishra, J. Speck and S. Denbaars. The effect of diode area on the luminescence of InGaN quantum well light emitting diodes grown by MOCVD / Proceedings of the Second Intern. Symp. on Blue Laser and Light Emitting Diodes, Chiba, Japan, (1998), p. 540.
13. Stognij, S. N. Koriakin, G. P. Yablonskii, V. N. Pavlovskii, E. V. Lutsenko, V. Z. Zubialevich, M. Heuken, B. Schineller and K. Heime. Reactive ion-beam etching of GaN epitaxial layers using O₂ + Ar gas mixture// Proceedings of the International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2000), Sept. 2000, Nagoya, Japan, PME-32, p.229.