

## Лазерная генерация в дисковых и кольцевых микрорезонаторах InGaN/GaN/AlGaN на кремнии

Н. В. Крыжановская<sup>1)</sup>, Э. И. Моисеев<sup>1)</sup>, С. Д. Комаров<sup>1)</sup>, К. А. Иванов<sup>1)</sup>,  
А. Ф. Цацульников<sup>2)</sup>, Е. В. Луценко<sup>3)</sup>, А. Г. Войнилович<sup>3)</sup>,  
А. В. Сахаров<sup>2, 4)</sup>, Д. С. Артеев<sup>2, 4)</sup>, А. Е. Николаев<sup>4)</sup>, Е. Е. Заварин<sup>2, 4)</sup>,  
Д. А. Масютин<sup>1)</sup>, А. А. Пивоварова<sup>4)</sup>, Н. Д. Ильинская<sup>4)</sup>,  
И. П. Смирнова<sup>4)</sup>, Л. К. Марков<sup>4)</sup>, А. Е. Жуков<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: nataliakryzh@gmail.com

<sup>2)</sup> НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3)</sup> Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>4)</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Созданы микродисковые и микрокольцевые лазеры с использованием InGaN/GaN/AlGaN эпитаксиальной полупроводниковой структуры на подложке кремния. При оптической накачке в импульсном режиме продемонстрирована лазерная генерация в микролазерах диаметром 5–8 мкм, работающих на модах шепчущей галереи. Получена генерация от комнатной температуры до 100 градусов Цельсия вблизи 420 нм, с высокой температурной стабильностью длины волны излучения, которая описывается коэффициентом  $d\lambda/dT = 0,0115$  нм/К.

**Ключевые слова:** дисковый резонатор; кольцевой резонатор; III-N полупроводниковые соединения; микролазер; моды шепчущей галереи; микролазер на кремнии.

## Lasing in disk and ring InGaN/GaN/AlGaN microcavities on silicon

N. V. Kryzhanovskaya<sup>1)</sup>, E. I. Moiseev<sup>1)</sup>, S. D. Komarov<sup>1)</sup>, K. A. Ivanov<sup>1)</sup>,  
A. F. Tsatsul'nikov<sup>2)</sup>, E. V. Lutsenko<sup>3)</sup>, A. G. Vainilovich<sup>3)</sup>, A. V. Sakharov<sup>2, 4)</sup>,  
D. S. Artyeyev<sup>2, 4)</sup>, A. E. Nikolaev<sup>4)</sup>, E. E. Zavarin<sup>2, 4)</sup>, D. A. Masyutin<sup>1)</sup>,  
A. A. Pivovarova<sup>4)</sup>, N. D. Ilyinskaya<sup>4)</sup>, I. P. Smirnova<sup>4)</sup>, L. K. Markov<sup>4)</sup>,  
A. E. Zhukov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> HSE University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: nataliakryzh@gmail.com

<sup>2)</sup> Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS,  
Saint-Petersburg, Russia

<sup>3)</sup> B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>4)</sup> Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint Petersburg, Russia

Microdisk and microring lasers have been developed using an InGaN/GaN/AlGaN epitaxial semiconductor structure grown on a silicon substrate. Lasing has been demonstrated in microlasers with diameters of 5–8  $\mu\text{m}$ , operating on whispering gallery modes under pulsed optical pumping. Lasing has been achieved from room temperature to 100 degrees Celsius, with high temperature stability of the emission wavelength near 420 nm, described by the coefficient  $d\lambda/dT = 0.0115$  nm/K.

**Keywords:** disk resonator; ring resonator; III-N semiconductors; microlaser; whispering gallery modes; silicon microlaser.

## Введение

Создание эффективных и компактных микролазеров, излучающих в УФ и видимом спектральном диапазоне и совместимых с фотонными схемами требуется для таких приложений как биохимическое детектирование и создание быстрых оптических межсоединений и переключений на плате [1, 2]. С использованием технологии комбинации зародышевого слоя и слоев-фильтров дислокаций возможно создать эпитаксиальные полупроводниковые слои АЗБ5 на Si с плотностью прорастающих дислокаций порядка  $10^5 \text{ см}^{-2}$ , и реализовать эффективные светоизлучающие устройства [3, 4]. Применение высокодобротных резонаторов, таких как дисковые или кольцевые позволяет реализовать очень компактные источники когерентного излучения [5]. Несмотря на высокий интерес к созданию и исследованию III-N микролазеров [6, 7], данных по их анализу при повышенных температурах практически нет. В тоже время благодаря уникальным характеристикам и III-N полупроводниковых соединений и большому междомодовому расстоянию в микролазерах возможна реализация высокой спектральной стабильности в широком температурном диапазоне.

В данной работе с использованием фотолитографии и плазмохимического травления InGaN/GaN/AlGaIn эпитаксиальных структур на Si созданы микролазеры диаметром 5–8 мкм и исследованы их характеристики вплоть до температуры 100 градусов Цельсия. Получена высокая температурная стабильность пороговой мощности накачки и спектрального положения линии лазерной генерации.

## 1. Описание эксперимента

Эпитаксиальная гетероструктура выращивалась методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке кремния (111) (установка Dragon-125 с горизонтальным индукционно-нагреваемым реактором). Триметилгаллий, триметилалюминий, триметилиндий и аммиак использовались в качестве прекурсоров, водород и азот – в качестве газов-носителей. Процесс роста эпитаксиальной структуры на подложке Si начинался с осаждения слоя AlN для предотвращения взаимодействия галлия и кремния с образованием эвтектики (так называемый meltback etching). После этого выращивались буферные слои со ступенчатым понижением состава AlN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N. При этом обеспечивается компенсация механических напряжений, возникающих при охлаждении структуры после эпитаксиального роста, и достигается плотность дислокаций не более  $10^9 \text{ см}^{-2}$ . Выращенная структура содержит слой AlN толщиной 200 нм, композицию буферных слоев AlGaIn переменного состава общей толщиной 770 нм, волноводный слой GaN толщиной 200 нм, пять квантовых ям In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N/GaN толщиной по 2 нм, разделенных между собой слоями GaN толщиной 8 нм, и покрывающего слоя GaN толщиной 200 нм. Спектр фотолюминесценции (ФЛ) синтезированной эпитаксиальной гетероструктуры, полученный при комнатной температуре и накачке в непрерывном режиме (He-Cd лазер, 325 нм, плотность мощности накачки 250 кВт/см<sup>2</sup>) приведен на рис. 1, а. Модуляция интенсивности спектров фотолюминесценции обусловлена интерференцией излучения, из-за отражения на гетерограницах и поверхности структуры GaN/воздух. Линия спектра ФЛ с максимумом на 365 нм соответствует

излучению из слоев GaN. Излучению InGaN/GaN квантовых ям соответствует широкая спектральная линия в диапазоне 370–480 нм, с максимумом излучения вблизи 415 нм.

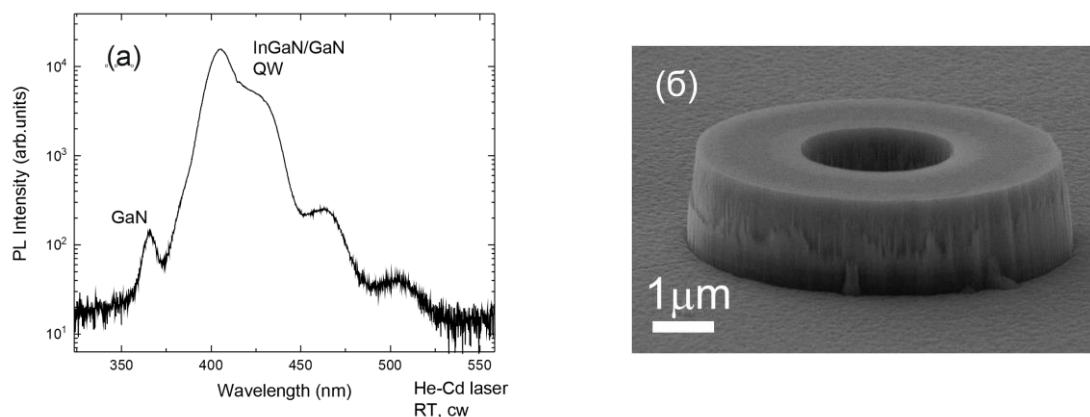


Рис. 1. Спектр ФЛ эпитаксиальной структуры, полученный при комнатной температуре (а); изображение, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии кольцевого микролазера диаметром 6 мкм (б)

Резонаторы диаметром 5–8 мкм создавались с помощью плазмохимического травления через металлическую (Ni) маску. Для уменьшения шероховатости боковой стенки резонатора структуры обрабатывались в растворе KOH (0.8 %) в течение 20 минут при комнатной температуре. Полученное методом сканирующей электронной микроскопии изображение микрокольцевого лазера диаметром 6 мкм приведено на рис. 1, б. Оптическая накачка микролазеров осуществлялась с помощью импульсного лазера с акустооптическим модулятором добротности ( $\lambda = 355$  нм, длительность импульса 9 нс, частота 10 кГц). Луч лазера накачки направлялся перпендикулярно подложке и фокусировался на один микролазер с помощью объектива Thorlabs LMU-5X-NUV (NA 0,12). Фотolumинесценция и лазерное излучение микролазера регистрировались микрообъективом Mitutoyo Plan Apo NUV 50X (NA 0,42), установленным под углом  $30^\circ$  к плоскости подложки. Измерения проводились при комнатной и повышенной температуре вплоть до  $100^\circ\text{C}$ .

## 2. Результаты и их обсуждение

Для дисков и колец диаметром 5–8 мкм методом конечных элементов было проведено моделирование распределения электрического поля мод шепчущей галереи малых радиальных порядков. Моделирование проводилось с учётом вертикального ограничения в слоях структуры для набора азимутальных порядков  $m$  в двумерной геометрии с учётом осевой симметрии резонатора. Результаты моделирования показывают, что для мод первого радиального порядка (т. е. имеющих один максимум в распределении модуля электрического поля в осевом сечении), которым соответствует максимальный азимутальный порядок, как добротности, так и факторы оптического ограничения совпадают для дисков и колец. Это объясняется тем, что мода локализована вблизи внешнего края резонатора. Кроме того, как добротности, так и факторы оптического ограничения убывают с ростом длины

волны, что можно объяснить ослаблением волноводного эффекта в вертикальной плоскости. При этом добротность имеет значения более  $10^{12}$ , а фактор оптического ограничения – не менее 4,15 %.

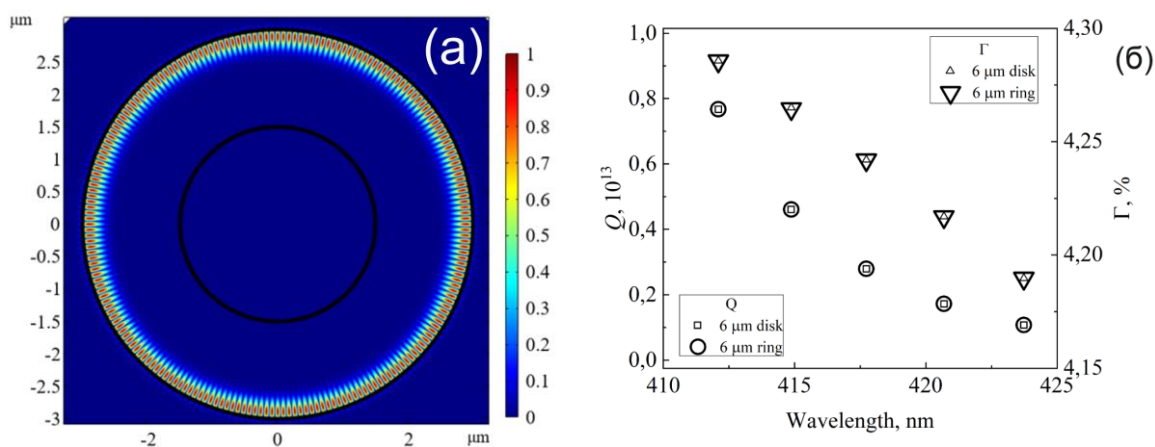


Рис. 2. Распределения модуля электрического поля моды первого радиального порядка и азимутального порядка  $m = 104$  в сечении через активную область параллельно плоскости подложки (а); сравнение добротностей (левая шкала) и факторов оптического ограничения (правая шкала) моды первого радиального порядка для дисков и колец диаметром 6 мкм (б)

Для всех исследованных микролазеров были получены спектры лазерной генерации при рабочих температурах от комнатной до 100 °С. Пример спектров генерации приведен на рис. 3 для микрокольцевого лазера диаметром 6 мкм для температур 20 °С и 100 °С. Переход в режим лазерной генерации подтверждается перегибом на зависимостях интенсивности резонансной линии от мощности оптической накачки.

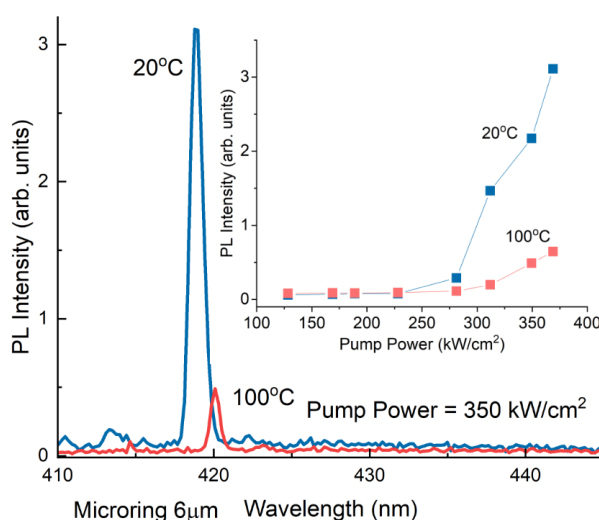


Рис. 3. Спектры лазерной генерации, полученные при комнатной температуре для микрокольцевого лазера диаметром 6 мкм и зависимости интенсивности резонансной линии микролазера от мощности оптической накачки (на вставке) для температур 20 °С и 100 °С

В работе также выполнено исследование зависимостей пороговой мощности оптической накачки и длины волны излучения от температуры для всех описанных выше микролазеров.

### **Заключение**

Продemonстрирована лазерная генерация в III-N дисковых и кольцевых резонаторах диаметром 5–8 мкм с активной областью на основе InGaN/GaN. Пороговая мощность оптической накачки при комнатной температуре составила 250 кВт/см<sup>2</sup>, получена характеристическая температура  $T_0 = 200$  К в диапазоне 20–100 °С. Температурная стабильность длины волны излучения лазеров вблизи 420 нм описывается коэффициентом  $d\lambda/dT = 0,0115$  нм/К. Таким образом, продемонстрирована высокая температурная стабильность характеристик III-N микролазеров.

### **Благодарности**

Статья подготовлена в ходе проведения исследования в рамках проекта «Международное академическое сотрудничество» НИУ ВШЭ. Оптические измерения проводились на уникальной научной установке «Комплексный оптоэлектронный стенд» НИУ ВШЭ- Санкт-Петербург.

### **Библиографические ссылки**

1. *Fu W. Y., Choi H. W.* Electrically injected InGaN microdisk lasers: A review of progress, challenges, and future prospects // *Progress in Quantum Electronics*. 2024. Vol. 95, Art. no. 100516.
2. Unidirectional emission of GaN-on-Si microring laser and its on-chip integration / H. Zhao [et al.] // *Nanophotonics*. 2023. Vol. 12, iss. 1. P. 111–118.
3. III-nitride semiconductor lasers grown on Si / M. Feng [et al.] // *Progress in Quantum Electronics*. 2021. Vol. 77, Art.no. 100323.
4. AlGaIn HEMT Structures Grown on Mismatched Si(111) Wafers / A. V. Sakharov [et al.] // *Materials*. 2023. Vol. 12, iss.16. P. 4265.
5. Bidirectionally injection-locked coupled microring GaN lasers/ S. Tohi [et al.] // *Phys. Rev. Appl.* 2024. Vol. 21, iss. 2. Art. no. 024014.
6. Demonstration of critical coupling in an active III-nitride microdisk photonic circuit on silicon / F. Tabataba-Vakili [et al.] // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9, P. 8095.
7. Electrically injected GaN-based microdisk towards an efficient whispering gallery mode laser / Y. Mei [et al.] // *Opt. Express*. 2021. Vol. 29, iss.4. P. 5598–5606.