

Влияние золь-гель пассивации SiO_2 на оптические характеристики InGaAsN/GaAs микролазеров

И. А. Мельниченко^{1, 2)}, Т. М. Шугабаев²⁾, Н. А. Фоминых¹⁾, И. С. Махов¹⁾,
Э. И. Моисеев¹⁾, В. О. Гридчин²⁾, А. Е. Жуков¹⁾, Н. В. Крыжановская¹⁾,
Е. В. Луценко³⁾

¹⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: imelnichenko@hse.ru

²⁾ Академический университет им. Ж. И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: melniczenko@spbau.ru

³⁾ Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

В работе исследовано влияние пассивации поверхности слоем SiO_2 , нанесённым методом золь-гель синтеза, на оптические характеристики GaAs мезоструктур с InGaAs/GaAs квантовыми ямами и микролазеров с активной областью из InGaAsN/GaAs квантовых ям. Показано значительное увеличение интенсивности фотолюминесценции мезоструктур, а так же снижение пороговой мощности возникновения лазерной генерации при оптической накачке, а также уменьшение пороговой плотности тока для микролазеров с электрической инжекцией после пассивации. Полученные результаты подтверждают эффективность метода золь-гель пассивации для улучшения характеристик полупроводниковых излучающих структур.

Ключевые слова: пассивация поверхности; золь-гель метод; микролазеры; InGaAsN/GaAs квантовые ямы; фотолюминесценция; электролюминесценция.

Effect of sol-gel passivation of SiO_2 on the optical characteristics of InGaAsN/GaAs microlasers

I. A. Melnichenko^{1, 2)}, T. M. Shugabaev²⁾, N. A. Fominykh¹⁾, I. S. Makhov¹⁾,
E. I. Moiseev¹⁾, V. O. Gridchin²⁾, A. E. Zhukov¹⁾, N. V. Kryzhanovskaya¹⁾,
E. V. Lutsenko³⁾

¹⁾ HSE University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: imelnichenko@hse.ru

²⁾ Alferov University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: melniczenko@spbau.ru

³⁾ B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

The study investigates the effect of surface passivation with a SiO_2 layer applied by sol-gel synthesis on the optical characteristics of GaAs mesostructures with InGaAs/GaAs quantum wells and microlasers with an active region made of InGaAsN/GaAs quantum wells. A significant increase in the photoluminescence intensity of mesostructures is shown, as well as a decrease in the threshold power for laser generation during optical pumping, and a decrease in the threshold current density for electrically injected microlasers after passivation. The results confirm the effectiveness of the sol-gel passivation method for improving the characteristics of semiconductor emitting structures.

Keywords: surface passivation; sol-gel method; microlasers; InGaAsN/GaAs quantum wells; photoluminescence; electroluminescence.

Введение

Сегодня полупроводники АІІВV являются основными материалами современной оптоэлектроники, обладающие высокой подвижностью электронов и прямозонной структурой, обеспечивающей широкий спектр приложений – от высокоскоростных систем оптической связи до эффективных солнечных элементов. Существенной проблемой, ограничивающей миниатюризацию устройств на основе GaAs, является высокая плотность поверхностных состояний и скорость поверхностной рекомбинации (10^5 – 10^6 см/с) [1]. Это обусловлено большим количеством дефектов, оборванных связей и паразитных оксидов на поверхности полупроводника, которые приводят к безызлучательной поверхностной рекомбинации. Высокая скорость безызлучательной поверхностной рекомбинации особенно критична для микро- и наноструктур, таких как микролазеры, где используется травление эпитаксиальных слоев и существует высокое значение отношения площади поверхности прибора к его объему.

Для уменьшения негативного влияния поверхностных эффектов традиционно используется методика пассивации. К числу традиционных подходов относятся химическая обработка сульфидами, такими как $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ [2], нитридирование поверхности, плазменная обработка, а также осаждение диэлектрических плёнок методом атомно-слоевого осаждения [3]. Однако, указанные технологии имеют ряд серьёзных недостатков, таких как необходимость обработки образцов в высоких температурах и воздействие плазмы, что может приводить к термическим напряжениям или повреждению поверхности, нивелируя преимущества пассивации. В качестве еще одного метода пассивации всё большее внимание привлекает метод золь-гель синтеза [4–6], который подразумевает формирование тонких пленок из коллоидного раствора при комнатной температуре, что делает этот подход исключительно щадящим. Эффективность метода подтверждена рядом исследований, сообщающих о значительном увеличении фотолюминесценции (ФЛ) как для структур GaAs, так и для наноструктур InGaN [7, 8].

Настоящая работа посвящена всестороннему исследованию эффективности пассивирующего покрытия SiO_2 , полученного методом золь-гель синтеза, для микроструктур на основе GaAs. Исследовалось изменение оптических свойств мезоструктур с InGaAs/GaAs квантовыми ямами (КЯ) после нанесения золь-гель слоя SiO_2 . Демонстрируются существенное улучшение оптических свойств микролазеров с модами шепчущей галереи на основе InGaAsN/GaAs КЯ, работающих при оптической и электрической накачке.

1. Материалы и методы

Структуры для создания мех и микролазеров выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs (100). Структура содержала одну КЯ, сформированную слоем $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ толщиной 10 нм, расположенным в центре слоя GaAs толщиной 200 нм, и сверхрешётку, состоящую из 10 периодов слоев GaAs/AlAs толщиной 2 нм/2 нм. Далее из эпитаксиальной структуры были сформированы цилиндрические мезоструктуры методом фотолитографии и плазменно-химического травления. Пассивация с помощью золь-гель метода проводилась по методу Штобера [9]

для всех образцов и начиналась с добавления этанола и деионизированной воды к образцу, после чего вводился поверхностно-активный агент – бромид цетилтриметиламмония и прекурсор тетраэтоксисилан (TEOS). Смесь выдерживалась в течение 30 минут, что приводило к формированию пассивирующего слоя SiO_2 толщиной около 10 нм на поверхности мез.

Активная область эпитаксиальных структур для микролазеров содержала три $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_{0.02}\text{As}_{0.98}$ КЯ, разделённых 10-нм слоями GaAs. Для формирования микродисков «грибовидной» формы с пьедесталом в структуру включался жертвенный слой $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ толщиной 1 мкм, удаляемый методом жидкофазного химического травления. Микролазеры с инжекционной накачкой были выполнены в конфигурации *p-i-n* диода. Активная область содержала три $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_{0.02}\text{As}_{0.98}$ КЯ, которые располагались в центре GaAs волновода толщиной 400 нм и ограничивалась с двух сторон барьерными слоями $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ толщиной 2 мкм. Омические контакты формировались с использованием AgMn/NiAu для верхнего *p*-контакта и AuGe/Ni/Au для нижнего *n*-контакта.

Оптические свойства микролазеров исследовались как при комнатной, так и при пониженных температурах в нормальной геометрии. Для накачки оптических структур использовался Nd:YLF лазер с длиной волны 527 нм, работающий в непрерывном режиме. Мощность лазерного излучения изменялась с помощью вращающегося градиентного фильтра и направлялось на образец с помощью системы зеркал и оптических фильтров и фокусировалось на поверхности структуры с помощью микрообъектива Mitutoyo MPlan ApoNIR 10x. Этот же объектив использовался для сбора излучения ФЛ с поверхности образца. Сигнал ФЛ микродисков направлялся по оптическому треку на входную щель монохроматора Andor Shamrock 500i, с InGaAs CCD матрицей.

Для исследования структур с инжекционной накачкой контакт к верхнему электроду осуществлялся с помощью игольчатого зонда из вольфрама диаметром 15 мкм. Для накачки лазеров использовались электрические импульсы частотой 5 кГц и длительностью 500 нс. Сбор излучения микролазеров происходил с помощью микро-объектива Mitutoyo M Plan Apo NIR HR 20x при его фокусировке на боковой поверхности исследуемого микродискового лазера.

2. Полученные результаты

На рис. 1, *а* представлены спектры ФЛ мез диаметром 1,25 мкм до пассивации и сразу после неё. На спектрах наблюдаются максимумы интенсивности ФЛ, соответствующие переходам в сверхрешетке GaAs/AlAs (845 нм), GaAs (870 нм), а также линия в диапазоне 950–1000 нм, характеризующая излучение $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ /GaAs КЯ.

На рис. 1, *б* показана зависимость интегральной интенсивности ФЛ в спектральном диапазоне 900–1020 нм от диаметра исследованных мез. Увеличение интенсивности ФЛ наблюдается для всех исследованных диаметров 1,25–20 мкм. Наибольшее увеличение интегральной интенсивности ФЛ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ /GaAs КЯ наблюдается для мезоструктур диаметром 1,25 мкм и составляет 50 раз. С ростом диаметра мез вклад безызлучательной рекомбинации уменьшается, вследствие чего наибольший эффект пассивации проявляется для малых мез диаметром 1,25–3 мкм.

Для таких диаметров мез реализация лазеров затруднительна, и в дальнейшем исследовались лазеры, с резонатором диаметром более 8 мкм.

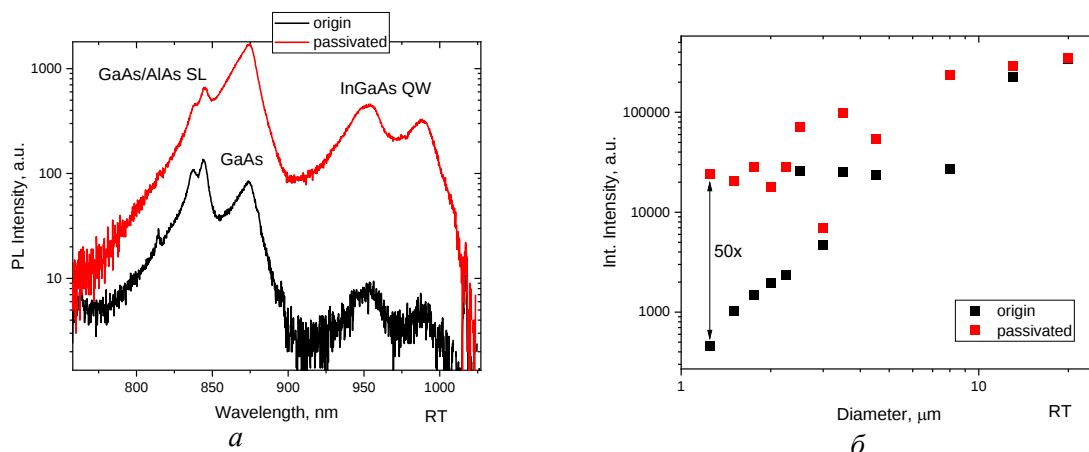


Рис. 1. Спектры ФЛ до и после пассивации для образца с мезами диаметром 1,25 мкм (а); интегральная интенсивность ФЛ для мез разных диаметров до и после пассивации (б)

Исследование температурной динамики порога лазерной генерации для пассивированных и непассивированных микролазеров с оптической накачкой продемонстрировано на рис. 2. а на примере микролазеров диаметром 8 мкм. Наблюдается снижение порога лазерной генерации во всем диапазоне исследованных температур от 180 К до 300 К. Важно отметить, что при комнатной температуре у микролазеров до пассивации лазерная генерация не достигалась. После пассивации пороговая плотность мощности накачки микролазеров при температуре 180 К снижается в 1,5 раза. Максимальное снижение пороговой плотности мощности накачки достигло 2,43 раза при 280 К.

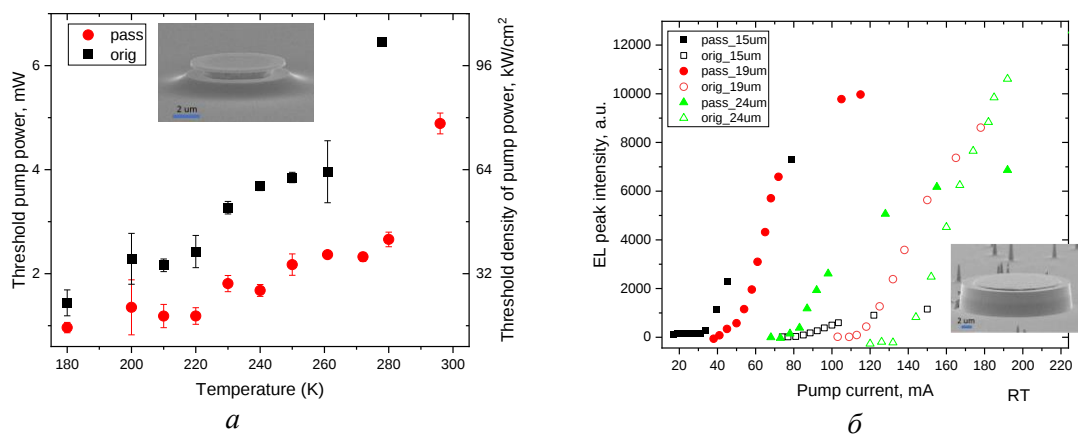


Рис. 2. Зависимость пороговой мощности от температуры для микролазера диаметром 8 мкм до и после пассивации (а); зависимость максимальной интенсивности для пассивированных и исходных инжекционных микролазеров диаметром 15 мкм, 19 мкм и 24 мкм от тока накачки (б)

Для исследования влияния пассивации поверхности SiO_2 было изучено влияние пассивации на структуры с электрической инжекцией при комнатной температуре,

рис. 2, б. Увеличение интенсивности электролюминесценции при фиксированном уровне накачки и уменьшение порогового тока лазерной генерации наблюдалось для всех исследованных диаметров инжекционных микролазеров (15–23 мкм). Наибольшее снижение пороговой плотности тока наблюдалось для микролазера 15 мкм – с 45,8 кА/см² до 20,1 кА/см². Абсолютные значения порогового тока для пассивированных микролазеров остаются значительно ниже во всем диапазоне размеров.

Заключение

Исследовано влияние пассивации поверхности с помощью слоя SiO₂, нанесенного с помощью золь-гель-процесса, на мезоструктуры GaAs с активной областью на основе InGaAs/GaAs КЯ и на микролазеры на основе GaAs с активной областью, состоящей из InGaAsN/GaAs КЯ. Максимальное усиление сигнала ФЛ для мезоструктур составило 50 для мезы диаметром 1,25 мкм. Для микролазеров с оптической накачкой пассивация методом золь-гель позволила наблюдать лазерную генерацию при комнатной температуре. Микролазеры с электрической инжекцией показали существенное снижение порога генерации после пассивации: для микролазеров 15 мкм пороговая плотность тока снизилась с 45,8 кА/см² до 20,1 кА/см².

Благодарность

Работа выполнена 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. Brief Review of Surface Passivation on III-V Semiconductor: 5 / L. Zhou [et al.] // Crystals. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018. V. 8, № 5. P. 226.
2. The effect of sulfide passivation on luminescence from microdisks with quantum wells and quantum dots / N. V. Kryzhanovskaya [et al.] // Tech. Phys. Lett. 2015. V. 41, № 7. P. 654–657.
3. Surface passivation of III–V semiconductors for future CMOS devices—Past research, present status and key issues for future / H. Hasegawa [et al.] // Applied Surface Science. 2010. V. 256, № 19. P. 5698–5707.
4. Huang W. Investigations of Sidewall Passivation Using the Sol-Gel Method on the Optoelectronic Performance for Blue InGaN Micro-LEDs / W. Huang, X. Miao, Z. Liu // Micromachines. 2023. V. 14, № 3. P. 566.
5. Dehghanghadikolaei A, Sol-gel process applications: A mini-review / A. Dehghanghadikolaei, J. Ansary, R. Ghoreishi // Proceedings of the Nature Research Society. 2018. № 2. P. 02008.
6. Sol-gel coatings for optoelectronic devices / Avellaneda C. [et al.]. 1994. V. 2255.
7. Enhanced surface passivation of GaAs nanostructures via an optimized SiO₂ sol-gel shell growth / Shen J. [et al.] // Applied Physics Letters. AIP Publishing, 2024. V. 124, № 12.
8. Highly efficient blue InGaN nanoscale light-emitting diodes / M. Sheen [et al.] // Nature. Nature Publishing Group UK London, 2022. V. 608, № 7921. P. 56–61.
9. Stöber W. Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range / W. Stöber, A. Fink, E. Bohn // Journal of Colloid and Interface Science. 1968. V. 26, № 1. P. 62–69.