

## Исследование излучения микродискового лазера, монолитно интегрированного с оптическим волноводом

© И.С. Федосов<sup>1</sup>, Н.А. Фоминых<sup>1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, И.С. Махов<sup>1</sup>, С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, Н.А. Калюжный<sup>2</sup>, М.С. Солодовник<sup>3</sup>, Н.Е. Черненко<sup>3</sup>, Н.А. Шандыба<sup>3</sup>, А.Е. Жуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 190121 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Южный федеральный университет, 344006 Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: igor-fedosov-2000@yandex.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 24 июня 2025 г.

Принята к публикации 18 сентября 2025 г.

Исследованы мощностные и спектральные характеристики излучения полупроводникового микродискового лазера диаметром 40 мкм, монолитно интегрированного с оптическим волноводом. Для уменьшения поглощения в волноводе применялась токовая накачка. На ватт-амперной зависимости наблюдаются особенности, связанные с началом генерации на более длинноволновом резонансе. При попадании этого резонанса в область слабого поглощения волновода наблюдается рост мощности излучения. Приложение прямого смещения к волноводу позволяет увеличить выводимую мощность более чем в 1.5 раза.

**Ключевые слова:** моды шепчущей галереи, микродисковый лазер, сопряженный волновод, переключение мод.

DOI: 10.61011/FTP.2025.07.62001.8046

В последнее время все больший интерес привлекает реализация фотонных интегральных схем на GaAs, так как на основе этой системы материалов возможно создавать эффективные источники и приемники оптического сигнала [1]. В качестве источников сигнала могут быть использованы микродисковые (МД) лазеры, обладающие высокой добротностью ( $\sim 10^5$ ) и малыми размерами вплоть до единиц мкм [2]. Для реализации направленной передачи излучения МД лазер может быть эманесцентно связан с оптическим волноводом (ОВ). При этом и МД лазер, и ОВ возможно изготовить из одной эпитаксиальной гетероструктуры, что увеличивает точность позиционирования и упрощает технологический процесс по сравнению с гетерогенной интеграцией (см., например, [3]). Стоит отметить, что наличие у ОВ в этом случае активной области ведет к частичному поглощению излучения МД лазера, распространяющегося в нем. Этот эффект значительно влияет на спектральные и мощностные характеристики света, выходящего с торца ОВ, и может быть компенсирован дополнительной накачкой ОВ. В данной работе было проведено исследование вывода излучения МД лазера через сопряженный ОВ при различных токах накачки ОВ.

Исследуемая гетероструктура получена методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке  $n^+$ -GaAs. В качестве активной области были использованы 5 слоев квантовых точек In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As/GaAs. МД лазер диаметром 40 мкм и примыкающий к нему ОВ длиной  $\sim 440$  мкм были сформированы с помощью электронной литографии и плазменного реактивно-ионного травле-

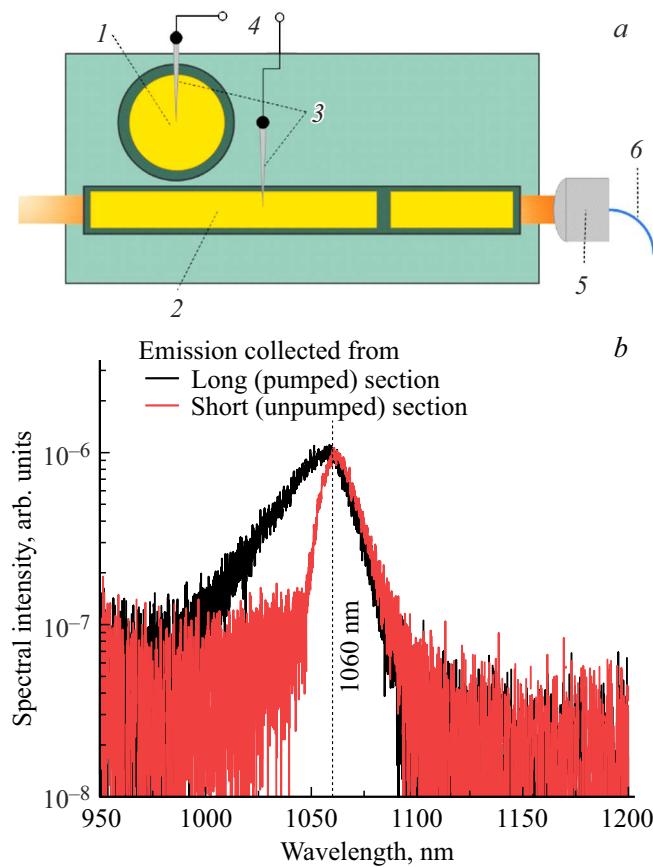
ния из одной и той же гетероструктуры и обладали, таким образом, одинаковой активной областью. Зазор между ОВ и МД составил 200 нм. На вершинах мез лазера и на волноводе с помощью фотолитографии и металлизации AgMn/Ni/Au были сформированы изолированные друг от друга омические контакты к слою  $p^+$ -GaAs. Контакт к ОВ был разделен фокусированным ионным пучком на две секции в соотношении 3/1: длинную вблизи МД лазера и короткую на удалении от МД (см. рис. 1, a). Ширина разреза составляла  $\sim 10$  мкм. Подложка была утончена до  $\sim 100$  мкм, затем на ее нижнюю грань была нанесена металлизация AuGe/Ni/Au, которая служила в качестве  $n$ -контакта.

При проведении эксперимента для осуществления электрической накачки к  $p$ -контакту структуры подводился игольчатый вольфрамовый зонд (см. рис. 1, a). Структура была расположена на медном теплоотводе  $n$ -контактом вниз, так что он находился в соприкосновении с поверхностью теплоотвода, к которому был подключен общий провод, что обеспечивало замыкание цепи. Все исследованные МД лазеры работали при комнатной температуре в режиме постоянной накачки. Регистрация оптического сигнала происходила непосредственно с МД лазера, а также с торца сопряженного с ним ОВ с помощью микротехнического объектива Mitutoyo x20, после которого через оптоволокно сигнал поступал либо на измеритель мощности Thorlabs S155C, либо на оптический анализатор спектра Yokogawa AQ 6370C.

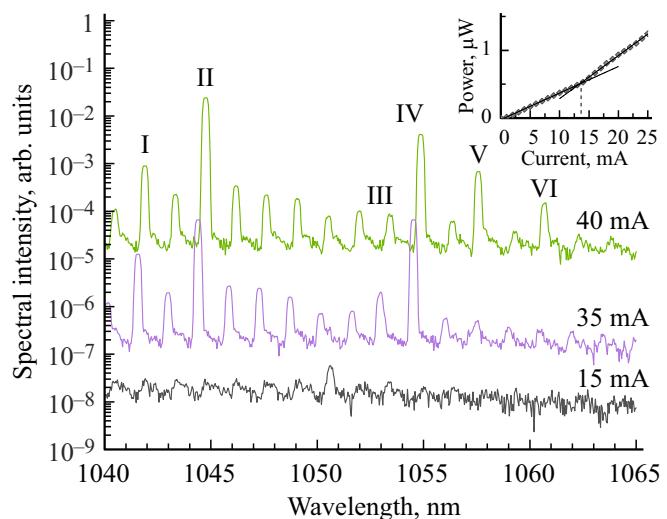
Сначала был исследован вывод излучения собственно ОВ с его разных торцов при приложении тока на-

качки к его длинной секции, тогда как МД оставался ненакачанным. В исследованном диапазоне токов от 0 до 75 мА лазерная генерация в ОВ, являющимся резонатором Фабри-Перо, не наблюдалась. Типичные спектры электролюминесценции (ЭЛ), полученные при токе накачки 10 мА с разных торцов ОВ, приведены на рис. 1, *b*. Спектры ЭЛ квантовых точек (КТ) уширены за счет статистического распределения размера точек (так называемое неоднородное уширение), полуширина линии ЭЛ равна 32 мэВ для излучения, собранного с торца длинной секции и 19.5 мэВ — с короткой. При детектировании ЭЛ со стороны короткой секции наблюдается поглощение света активной областью этой секции, что проявляется на спектрах ЭЛ в виде резкого спада интенсивности с краем поглощения при  $\lambda = 1060$  нм. Край поглощения не зависит от тока накачки длинной секции ОВ. Эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями спектра поглощения квантовых точек In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As/GaAs, представленными в работе [4].

Далее было выполнено исследование лазерной генерации МД лазера. На рис. 2 приведены спектры ЭЛ микролазеров при фокусировке объектива, собирающего



**Рис. 1.** Схема подключения токоведущих зондов и сбора излучения *a*: 1 — МД, 2 — ОВ с двумя секциями контактов, 3 — токоведущие зонды, 4 — клеммы к источникам тока, 5 — микрообъектив, 6 — оптоволокно. *b* — спектры ЭЛ ОВ с двух торцов, полученные при токе накачки длинной секции ОВ 10 мА.

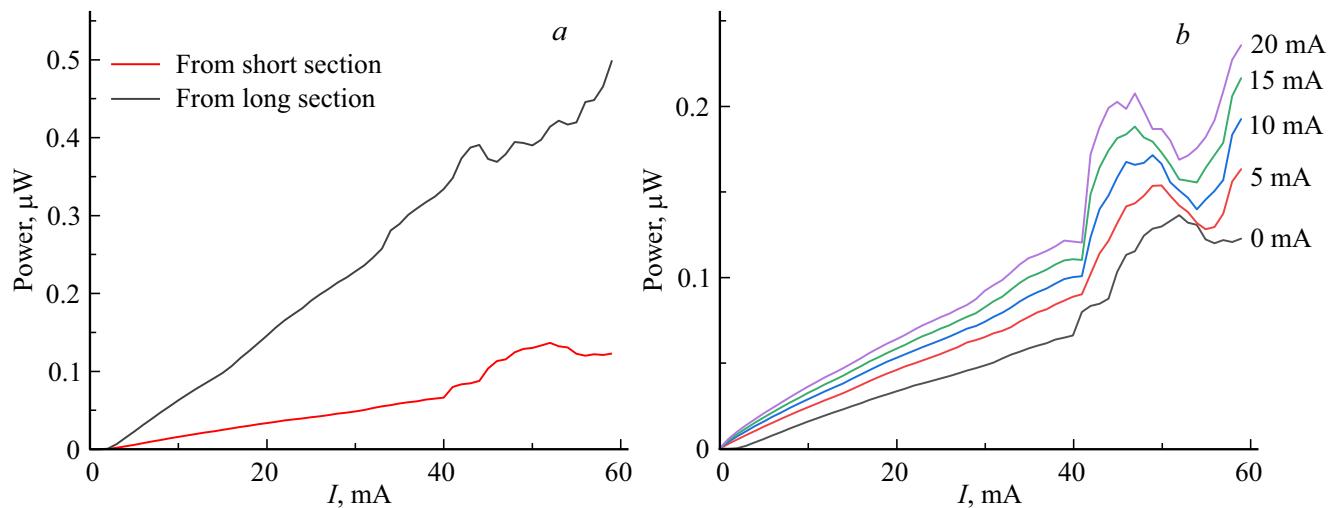


**Рис. 2.** Спектры лазерной генерации МД в свободное пространство при разных токах накачки. Спектры свинуты для удобства чтения. Римскими цифрами обозначены наиболее интенсивные моды. На вставке — ВтАХ вблизи 15 мА.

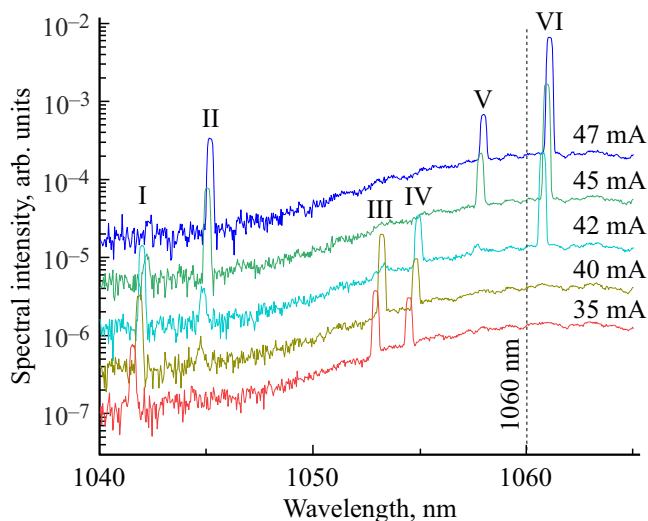
излучения, на боковой поверхности лазера. Величина порогового тока исследованного МД лазера была определена равной 13.67 мА. При этом токе на спектре ЭЛ возникает узкий резонанс, соответствующий моде шепчущей галереи (МШГ) с длиной волны  $\lambda \approx 1050$  нм, а на ватт-амперной характеристике (ВтАХ) регистрируется перегиб, подтверждающий переход в режим лазерной генерации (см. вставку на рис. 2). При увеличении тока накачки на спектрах возникают эквидистантные резонансы и лазер переходит в многомодовый режим генерации.

Далее были получены ватт-амперные характеристики МД лазера с разных торцов ОВ в диапазоне токов накачки лазера 0–60 мА (рис. 3, *a*). На ВтАХ, полученной с торца короткой секции ОВ, наблюдается рост выводимой мощности при токе накачки микролазера  $\sim 40$  мА, тогда как с противоположной стороны этот эффект менее выражен. Затем были исследованы ВтАХ со стороны короткой секции ОВ при приложении электрического тока к длинной секции ОВ для уменьшения поглощения активной области. Уровень излучения при нулевом токе накачки лазера, обусловленный только спонтанным излучением ОВ, был принят для каждой кривой за нулевой. При увеличении тока накачки ОВ (рис. 3, *b*) величина указанного скачка на ВтАХ увеличивалась так же, как и общая выводимая оптическая мощность МД лазера. Для объяснения этого эффекта был изучен спектральный состав излучения, выводимого с торца ОВ.

Изучение спектров ЭЛ МД лазера с торца ОВ происходило при токах накачки длинной секции ОВ от 0 до 20 мА. Особенностью на ВтАХ, полученных с короткого торца ОВ при токе МД чуть выше 40 мА, соответствует появление в спектрах ЭЛ интенсивной лазерной линии на длине волны  $> 1060$  нм (рис. 4),



**Рис. 3.** *a* — ВтАХ МД лазера, полученные с разных сторон ОВ, без накачки ОВ. *b* — ВтАХ МД лазера за вычетом интенсивности спонтанного излучения ОВ, полученные со стороны короткой секции ОВ при разных уровнях накачки длинной секции (указаны справа от кривых).



**Рис. 4.** Спектры излучения МД лазера, собранного со стороны короткой секции ОВ при разных токах накачки МД. Ток накачки ОВ — 10 мА. Спектры сдвинуты для наглядности. Обозначения мод соответствуют обозначениям на рис. 2.

которая находится в спектральном диапазоне слабого поглощения излучения активной области в волноводе.

Таким образом, в работе проведено исследование спектральных и мощностных характеристик излучения МД лазера, распространяющегося по монолитно интегрированному с ним ОВ. На ВтАХ, полученных с торца секции ОВ без накачки, обнаружено нарастание интенсивности излучения при токе накачки МД 40 мА. Обнаруженные особенности на ВтАХ объяснены появлением в спектре ЭЛ микролазера лазерной моды на длине волны  $> 1060$  нм, что соответствует спектральной области слабого поглощения КТ. Приложение напряжения на ОВ

позволило увеличить выводимую оптическую мощность в 1.52 раза.

### Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных исследований Национального исследовательского университета „Высшая школа экономики“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] C.P. Dietrich, A. Fiore, M.G. Thompson, M. Kamp, S. Höfling. *Laser Photon. Rev.*, **10** (6), 870 (2016). DOI: 10.1002/lpor.201500321
- [2] N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov, E. Moiseev, M. Maximov. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **54** (45), 453001 (2021). DOI: 10.1088/1361-6463/ac1887
- [3] B. Guilhabert, J. McPhillimy, S. May, C. Klitis, M.D. Dawson, M. Sorel, M.J. Strain. *Optics Lett.*, **43** (20), 4883 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.004883
- [4] Н.В. Крыжановская, С.Ф. Блохин, И.С. Махов, Э.И. Мoiseев, А.М. Надточий, Н.А. Фоминых, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, Ю.А. Гусева, М.М. Кулагина, Ф.И. Зубов, Е.С. Колодезный, М.В. Максимов, А.Е. Жуков. *ФТП*, **57** (3), 202 (2023). DOI: 10.21883/FTP.2023.03.55634.4727

Редактор Г.А. Оганесян

## Study of the emission from a microdisk laser monolithically integrated with an optical waveguide

*I.S. Fedosov<sup>1</sup>, N.A. Fominykh<sup>1</sup>, N.V. Kryzhanovskaya<sup>1</sup>,  
I.S. Makhov<sup>1</sup>, S.A. Mintairov<sup>2</sup>, N.A. Kalyuzhny<sup>2</sup>,  
M.S. Solodovnik<sup>3</sup>, N.E. Chernenko<sup>3</sup>,  
N.A. Shandyba<sup>3</sup>, A.E. Zhukov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> National Research University  
Higher School of Economics,  
190121 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Southern Federal University,  
344006 Rostov-on-Don, Russia

**Abstract** The power and spectral characteristics of the radiation of a semiconductor microdisk laser with a diameter of  $40\mu\text{m}$ , monolithically integrated with an optical waveguide, have been studied. To reduce absorption in the waveguide, current pumping was used. In the light-current dependence, features associated with the onset of generation at a longer-wavelength resonance are observed. When this resonance falls within the region of weak waveguide absorption, an increase in output power is observed. Applying a forward bias to the waveguide makes it possible to increase the extracted power by more than 1.5 times.