

08

## Монолитная интеграция микродисковых лазеров на основе InGaAs/GaAs квантовых точек с просветляемыми оптическими волноводами

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

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

<sup>2</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: fominy-nikita@yandex.ru

Поступило в Редакцию 29 мая 2025 г.

В окончательной редакции 30 июня 2025 г.

Принято к публикации 1 июля 2025 г.

Исследован направленный вывод излучения микродисковых лазеров через сопряженный оптический волновод, выполненный из той же гетероструктуры. Использовались диски диаметром 30 и 40  $\mu\text{m}$  с активной областью на основе InGaAs/GaAs квантовых точек. Для уменьшения потерь на поглощение в волноводе к нему прикладывалось прямое смещение. При величине тока в волноводе порядка 60 мА наблюдалось резкое (почти на порядок) увеличение выводимой оптической мощности микролазера, что связывается авторами с достижением состояния просветления волновода.

**Ключевые слова:** микродисковые лазеры, квантовые точки, оптический волновод, фотонные интегральные схемы.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.19.61143.20390

Реализация фотонных интегральных схем (ФИС) с использованием полупроводников на основе соединений  $\text{A}_3\text{B}_5$  в последнее время вызывает большой интерес из-за возможности совмещения как классических компонентов ФИС (волноводов, разветвителей, интерферометров и т. п.), так и активных элементов (источников, приемников излучения) на одной платформе [1]. Микродисковые (МД) лазеры с активной областью на основе квантовых точек (КТ)  $\text{A}_3\text{B}_5$  обладают малым размером, высокой добротностью и возможностью латерального вывода излучения, что делает их перспективными для использования в качестве источников излучения в ФИС [2]. Однако в силу аксиальной симметрии резонаторов таких микролазеров в их диаграмме направленности отсутствует выделенное направление. Направленный вывод излучения МД-лазеров может быть реализован с помощью сопряжения с латеральными оптическими волноводами (ОВ) [3]. При этом МД-лазер и волновод могут быть выполнены из одной гетероструктуры и образовать элементарный блок ФИС [4]. Однако наличие у ОВ и МД-лазеров одинаковой активной области приводит к тому, что излучение будет поглощаться при распространении по ОВ. Данный эффект значительно уменьшает выводимую через ОВ мощность микролазера [4]. Приложение к ОВ прямого смещения ведет к постепенному заполнению электрон-дырочных состояний и, как следствие, к меньшему поглощению излучения МД-лазера. При некоторой накачке возможно достижение состояния просветления ОВ на длине волны излучения микролазера. Ранее возможность просветления  $\text{A}_3\text{B}_5$ -волноводов, интегрированных с микролазерами, как и усиления из-

лучения в них, не изучалась. В настоящей работе выполнено исследование влияния просветления волновода на спектральные и мощностные характеристики выходного излучения МД-лазера, сопряженного с ОВ.

Для синтеза гетероструктуры была использована газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений. Эпитаксиальный рост проходил на подложке  $n^+$ -GaAs, разориентированной на  $6^\circ$  относительно плоскости (100). В состав гетероструктуры входили буферный слой  $n^+$ -GaAs, 1.5  $\mu\text{m}$  нижний эмиттерный слой  $n$ -AlGaAs с уровнем легирования около  $7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , нелегированный волноводный слой GaAs толщиной 0.75  $\mu\text{m}$ , 1.5  $\mu\text{m}$  верхний эмиттерный слой  $p$ -AlGaAs ( $7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) и контактный слой  $p^{++}$ -GaAs толщиной 0.35  $\mu\text{m}$ . В слоях AlGaAs мольная доля AlAs составляла 40 %. Активная область представляла собой пять слоев КТ InGaAs/GaAs и была расположена в середине волноводного слоя. Слои КТ формировались путем осаждения слоев  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  (2 nm), разделенных спейсерами GaAs толщиной 40 nm. МД-лазеры диаметром 30 и 40  $\mu\text{m}$  и ОВ длиной 440  $\mu\text{m}$  и шириной 10  $\mu\text{m}$  были сформированы с помощью электронной литографии (Raith Voyager) и технологии глубокого плазменного реактивно-ионного травления (ICP-RIE Sentech SI500). Расстояние между боковыми гранями МД-лазеров и ОВ составляло величину порядка 100 nm. Подробное описание этих процессов может быть найдено в [5]. Для формирования  $p$ -контактов использовалась металлизация AgMn/Ni/Au к контактному слою  $p^{++}$ -GaAs. Контакты к ОВ имели форму полосы шириной 8  $\mu\text{m}$ , а на МД-лазерах они имели форму кругов диаметром на 2  $\mu\text{m}$

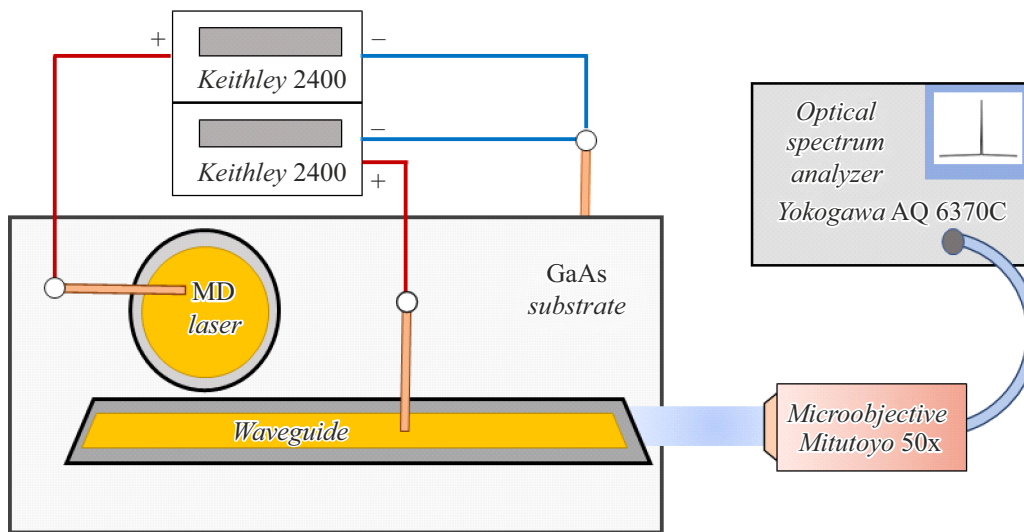


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

меньше диаметра микродиска. GaAs-подложка была утонена и на ее тыльную сторону был нанесен AuGe/Ni/Au  $n$ -контакт. Для подавления лазерной генерации самого ОВ на модах Фабри–Перо торцы ОВ были скошены под углом  $\sim 15^\circ$  с помощью травления фокусированным ионным пучком.

Из пластины, содержащей сформированные МД-лазеры и ОВ, выкалывались микрочипы, которые затем спаивались  $p$ -контактом на медный теплоотвод. Для осуществления контакта с верхними электродами МД-лазеров и ОВ использовались игольчатые вольфрамовые микрозонды диаметром  $15\ \mu\text{m}$ . В качестве источника тока применялся источник-измеритель Keithley 2400 Series SourceMeter®. Сбор излучения происходил в плоскости излучения МД-лазеров объективом Mitutoyo M Plan Apo NIR HR 20 $\times$  при фокусировке на торец ОВ. Для регистрации излучения был использован оптический анализатор спектра Yokogawa AQ 6370C. Оптическая мощность определялась с помощью измерителя Thorlabs PM100D, на который через оптическое волокно подавалось собранное микрообъективом излучение. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Сначала были исследованы спектры электролюминесценции (ЭЛ) с торца ОВ при комнатной температуре при накачке только ОВ в непрерывном режиме (рис. 2, *a*). На спектрах наблюдается спонтанное излучение InGaAs/GaAs КТ. С ростом тока наблюдается увеличение интенсивности ЭЛ и оптической мощности (рис. 2, *b*), но перехода в режим лазерной генерации не происходит благодаря использованию скошенных граней. Положение спектрального максимума изменяется от  $1035\ \text{nm}$  при токе накачки  $10\ \text{mA}$  до  $1055\ \text{nm}$  при токе накачки  $100\ \text{mA}$ , что связано с разогревом ОВ. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) ОВ имеет вид стандартной ВАХ диода и не демонстрирует каких-либо заметных особенностей (рис. 2, *b*).

Далее при комнатной температуре в непрерывном режиме исследовалось излучение микролазеров с торцов волноводов при отсутствии тока на волноводе (рис. 3). Пороговый ток микролазеров диаметром  $40\ \mu\text{m}$  составлял величину порядка  $13\ \text{mA}$ , а микролазеров диаметром  $30\ \mu\text{m}$  — порядка  $20\ \text{mA}$ . Начало лазерной генерации происходило на длинах волн вблизи  $1056\ \text{nm}$  для МД-лазера диаметром  $30\ \mu\text{m}$  и в диапазоне  $1052\text{--}1057\ \text{nm}$  для МД-лазера диаметром  $40\ \mu\text{m}$ . Лазерная генерация  $30\ \mu\text{m}$  МД-лазеров, сопряженных с ОВ, имела преимущественно одномодовый характер (рис. 3, *b*), тогда как  $40\ \mu\text{m}$  микролазеры обладали большим числом лазерных мод в спектре, что согласуется с полученными ранее результатами спектральных исследований МД-лазеров похожей конструкции [4].

После этого были выполнены исследования выводимой оптической мощности МД-лазеров с торцов сопряженных с ними ОВ при разном токе накачки последних (рис. 3, *a*). В том случае, когда ток на МД-лазере равен нулю, а на ОВ приложено ненулевое прямое смещение, вся детектируемая мощность состоит только из оптической мощности самого ОВ. Для того чтобы исключить его вклад, величина оптической мощности, полученная при отсутствии тока на микролазере, была принята за нуль.

Для МД-лазеров диаметром  $30\ \mu\text{m}$  порог генерации, определенный по возникновению узких лазерных мод в спектре излучения, также проявляется как характерный излом ватт-амперной характеристики (ВтАХ). Увеличение тока накачки ОВ практически не меняет порога генерации. В МД-лазерах диаметром  $40\ \mu\text{m}$  порог генерации не визуализируется на ВтАХ, что мы связываем с большим вкладом спонтанного излучения.

Для МД-лазеров обоих диаметров наблюдался постепенный рост выводимой оптической мощности с ростом тока накачки ОВ. Повышение тока, приложенного к

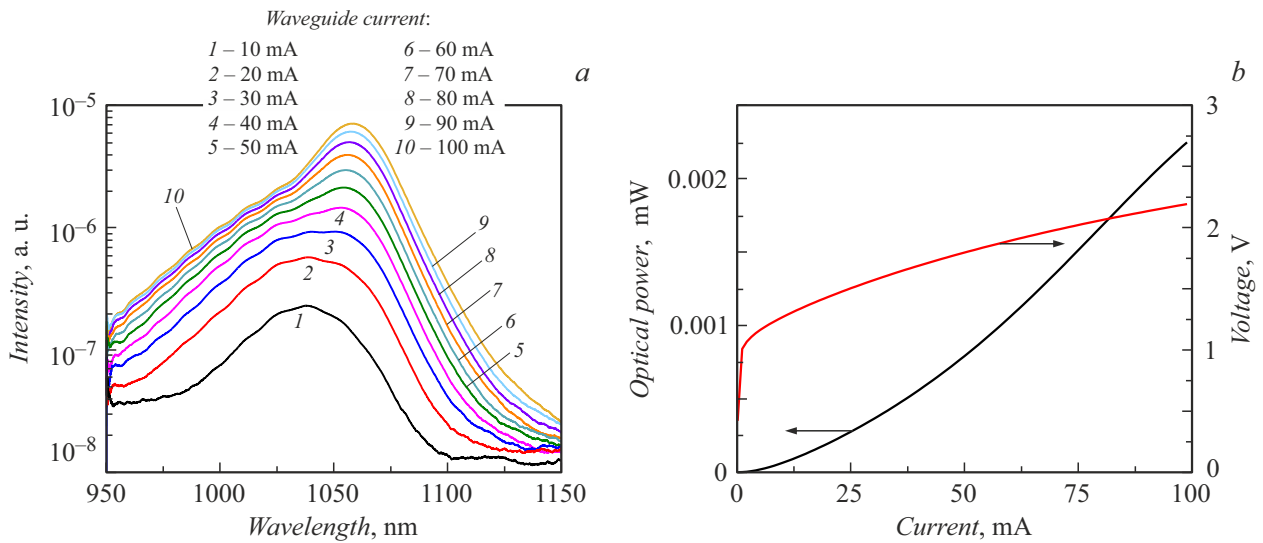


Рис. 2. *a* — спектры ЭЛ ОВ при разном токе накачки; *b* — зависимость оптической мощности ОВ от тока накачки и его ВАХ.

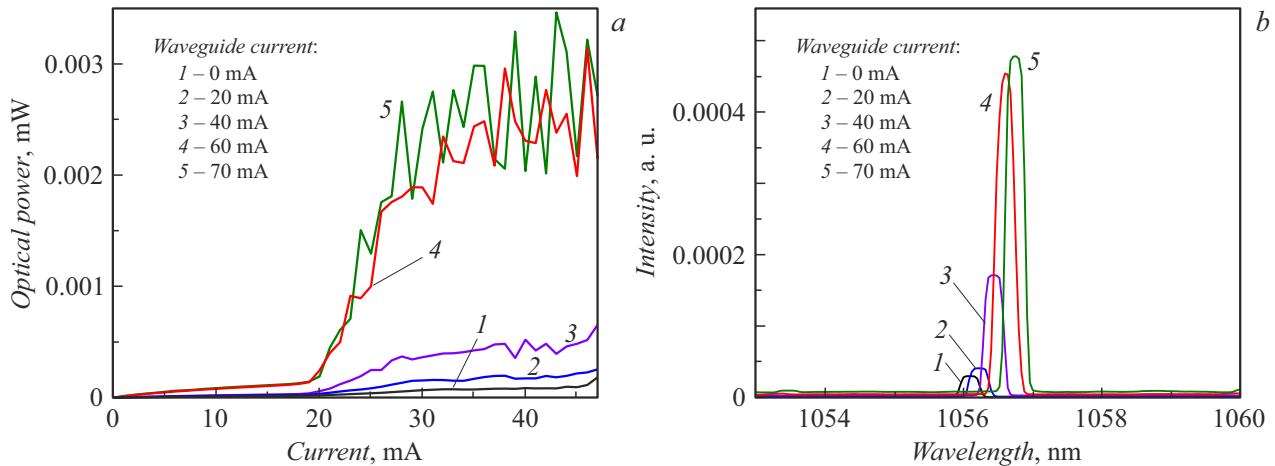


Рис. 3. *a* — зависимости оптической мощности МД-лазера диаметром  $30\text{ }\mu\text{m}$  от тока накачки при разном токе на ОВ. *b* — спектры ЭЛ  $30\text{ }\mu\text{m}$  МД-лазера при токе накачки 30 мА, полученные с торцов ОВ со скошенными гранями при разном токе на ОВ.

ОВ, до 60 мА для всех исследованных образцов вело к резкому увеличению почти на порядок выводимой оптической мощности. При этом дальнейший рост тока на ОВ не приводил к заметному увеличению выводимой оптической мощности МД-лазера, что мы связываем с достижением состояния просветления ОВ и возникновением в нем усиления. Таким образом, необходимый для достижения оптической прозрачности используемых ОВ со скошенными торцами ток составляет величину порядка 60 мА, что сопоставимо с током накачки собственно МД-лазера.

Были получены спектры ЭЛ исследованных МД-лазеров с торцов ОВ при разном токе накачки волновода (от 0 до 70 мА) (рис. 3, *b*). Видно, что на спектрах доминируют резонансные линии лазера и вклад ЭЛ самого ОВ незначителен. Сдвиг длины волны лазерных мод при росте тока через волновод, как мы полагаем, связан с

дополнительным нагревом микролазеров. За счет того, что расстояние между боковыми гранями МД-лазеров и ОВ достаточно мало, разогрев ОВ с ростом тока его накачки ведет также и к разогреву сопряженного с ним МД-лазера. Оценка дополнительного нагрева микролазера по сдвигу длины волны лазерной генерации показала, что при увеличении тока накачки ОВ с 0 до 70 мА МД-лазеры диаметром 30 и 40  $\mu\text{m}$  дополнительно нагреваются на 9 и 7  $^{\circ}\text{C}$  соответственно. Отметим, что в этом случае никаких изменений модового состава на спектрах ЭЛ микролазеров не происходит.

Проведено исследование направленного вывода излучения МД-лазеров на основе InGaAs/GaAs квантовых точек через сопряженный оптический волновод, выполненный из той же гетероструктуры. Для уменьшения потерь на поглощение в ОВ к ним прикладывалось прямое смещение. Лазерная генерация ОВ была подавлена

благодаря тому, что их торцевые грани были скошены под углом  $\sim 15^\circ$  с помощью травления фокусированным ионным пучком. При приложении к ОВ тока величиной порядка 60 мА наблюдалось резкое увеличение почти на порядок выводимой оптической мощности микролазера, что мы связываем с достижением состояния просветления волновода.

### Финансирование работы

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] P. Jiang, K.C. Balram, Opt. Express, **28** (8), 12262 (2020). DOI: 10.1364/OE.385618
- [2] J. Zhang, A.G. Shankar, X. Wang, Photonics, **11** (3), 212 (2024). DOI: 10.3390/photonics11030212
- [3] J. Guan, C. Li, R. Gao, H. Zhang, J. Lin, M. Li, M. Wang, L. Qiao, L. Deng, Y. Cheng, *Monolithically integrated high-power narrow-bandwidth microdisk laser*, arXiv:2212.10892 (2022). DOI: 10.48550/arXiv.2212.10892
- [4] N.V. Kryzhanovskaya, K.A. Ivanov, N.A. Fominykh, S.D. Komarov, I.S. Makhov, E.I. Moiseev, J.A. Guseva, M.M. Kulagina, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, A.I. Lihachev, R.A. Khabibullin, R.R. Galiev, A.Yu. Pavlov, K.N. Tomosh, M.V. Maximov, A.E. Zhukov, J. Appl. Phys., **134** (10), 103101 (2023). DOI: 10.1063/5.0165279
- [5] Н.А. Фоминых, Н.В. Крыжановская, С.Д. Комаров, И.С. Махов, К.А. Иванов, Э.И. Моисеев, Е.Е. Антонов, Ю.А. Гусева, М.М. Кулагина, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, Р.А. Хабибуллин, Р.Р. Галиев, А.Ю. Павлов, К.Н. Томош, А.Е. Жуков, ФТП, **58** (2), 107 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.02.57878.6049 [N.A. Fominykh, N.V. Kryzhanovskaya, S.D. Komarov, I.S. Makhov, K.A. Ivanov, E.I. Moiseev, E.E. Antonov, Yu.A. Guseva, M.M. Kulagina, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, R.A. Khabibullin, R.R. Galiev, A.Yu. Pavlov, K.N. Tomosh, A.E. Zhukov, Semiconductors, **58** (2), 104 (2024). DOI: 10.61011/SC.2024.02.58365.6049].