

07.2;09.4

Микрооптопара на базе микродискового лазера и фотодетектора с активной областью на основе квантовых ям-точек

© Н.В. Крыжановская^{1,2}, Э.И. Моисеев^{1,2}, А.М. Надточий^{1,2}, А.А. Харченко², М.М. Кулагина³, С.А. Минтаиров³, Н.А. Калюжный³, М.В. Максимов^{2,3}, А.Е. Жуков¹

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nataliakryzh@gmail.com

Поступило в Редакцию 23 марта 2020 г.

В окончательной редакции 23 марта 2020 г.

Принято к публикации 26 марта 2020 г.

Показана возможность детектирования излучения микродискового лазера диаметром $23\ \mu\text{m}$ с активной областью на основе квантовых ям-точек InGaAs/GaAs с помощью близкорасположенного фотодетектора ($100 \times 4000\ \mu\text{m}$) с аналогичной активной областью. При непрерывном режиме работы лазера, токе накачки $20\ \text{mA}$ и расстоянии между гранями микролазера и фотодетектора около $100\ \mu\text{m}$ получена величина фототока $\sim 10\ \mu\text{A}$, что соответствует чувствительности фотодетектора $\sim 0.9\ \mu\text{A}/\mu\text{W}$.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер, микродисковый лазер, квантовая яма-точка, микрооптопара.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49582.18301

Полупроводниковые резонаторы дисковой геометрии, в которых поддерживаются моды шепчущей галереи (МШГ, whispering gallery modes, WGMs), могут служить основой для создания энергоэффективных и малогабаритных источников когерентного излучения, пригодных для различных приложений [1–3]. Помимо малого объема моды и высокой добротности, присущих МШГ-микрорезонаторам [4], они обладают высокой чувствительностью к изменениям и возмущениям в окружающей резонатор среде [5]. Поле МШГ экспоненциально спадает за боковой поверхностью резонатора на расстоянии $10\text{--}100\ \text{nm}$ и, таким образом, может взаимодействовать с материалом за пределами резонатора [6]. В связи с этим МШГ-микрорезонаторы являются очень привлекательными для создания сенсоров биомаркеров, ДНК и белков в низких концентрациях, а также для детектирования вирусов и наночастиц с одночастичным разрешением [7–9]. Для этих и других практических приложений желательно использовать оптопару, т. е. объединить полупроводниковый МШГ-микролазер с фотодетектором малого размера. Такие оптопары с открытым оптическим каналом, доступным для внешнего воздействия, могут использоваться в качестве различных типов микродатчиков (биосенсор, детектирование наночастиц), для гальванической развязки, бесконтактного управления и т. д.

Несмотря на то что использование в качестве активной области микродисковых лазеров квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs дает такие преимущества, как высокая рабочая температура, улучшенная температурная стабильность характеристик, низкий пороговый ток, слабая чувствительность к безызлучательной рекомбинации, выходная мощность инжекционного микролазе-

ра, испускаемая в свободное пространство, довольно мала [10]. Тем не менее в работе [11] было продемонстрировано детектирование излучения микродискового лазера диаметром $100\ \mu\text{m}$ с квантовыми точками InAs/InGaAs/GaAs с помощью близкорасположенного детектора, выполненного из той же эпитаксиальной гетероструктуры. Для улучшения вывода излучения из микролазера на его боковой поверхности был сформирован рассеиватель [11]. Недавно мы продемонстрировали, что новая активная область с квантовыми ямами-точками (КЯТ) InGaAs/GaAs имеет преимущества для применения в фотонных устройствах малого размера (порядка $10\ \mu\text{m}$), о чем свидетельствует резкое улучшение дифференциальной эффективности и выходной мощности, излучаемой в свободное пространство: получено значение выходной оптической мощности на уровне $18\ \text{mW}$ в микродисковом лазере диаметром $31\ \mu\text{m}$ [12].

В настоящей работе исследуется возможность детектирования излучения микродискового лазера с активной областью на основе КЯТ InGaAs/GaAs с помощью близкорасположенного фотодиода, выполненного с использованием такой же эпитаксиальной гетероструктуры. Получено детектирование лазерного излучения микролазера диаметром $23\ \mu\text{m}$ с помощью фотодиода, грань которого расположена на расстоянии от 100 до $1400\ \mu\text{m}$. Выполнена оценка чувствительности детектора не хуже $0.9\ \mu\text{A}/\mu\text{W}$.

Эпитаксиальные структуры выращивались методом металлоорганической газофазной эпитаксии при пониженном давлении с использованием водорода в качестве газа-носителя при температурах $500\text{--}700^\circ\text{C}$. В качестве источников атомов Ga, Al, In и Zn были использованы

металлоорганические соединения триметилгаллий, триметилиндий, триметилалюминий и диэтилцинк. Гидриды арсина (AsH_3) и силана (SiH_4) использовались в качестве источников атомов As и Si соответственно. Структуры состояли из эмиттерных слоев $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$, легированных примесями *p*- и *n*-типа, и нелегированного волноводного слоя GaAs толщиной $0.8\ \mu\text{m}$. Активная область гетероструктур для микролазера и фотодиода содержала пять и десять слоев КЯТ InGaAs соответственно. КЯТ были сформированы осаждением восьми монослоев $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ и разделены спейсерами GaAs толщиной $40\ \text{nm}$. Для формирования выраженных неоднородностей толщины и состава в слоях InGaAs были использованы разориентированные подложки GaAs [13]. Микролазеры с диаметром мезы $D = 23\ \mu\text{m}$ формировались методами фотолитографии и сухого травления (STE ICPe68). Высота мезы составляла около $5.5\ \mu\text{m}$ для обеспечения достаточного оптического ограничения мод шепчущей галереи. Вертикальность боковой стенки контролировалась с точностью до 5° . Металлизация AgMn/Ni/Au и AuGe/Ni/Au использовалась для формирования омических контактов с покрывающим слоем *p*⁺-GaAs и подложкой *n*-GaAs соответственно (вставка к рис. 1). Фотодиодные структуры были изготовлены в форме параллелепипеда, выколотого вдоль основных кристаллографических направлений. В качестве *p*-контакта на поверхности фотодиода создавались полоски шириной $100\ \mu\text{m}$ с использованием сплава AgMn/Ni/Au толщиной $0.1\text{--}0.15\ \mu\text{m}$. Длина полоска составила $4000\ \mu\text{m}$. В качестве *n*-контакта использовалась традиционная металлизация сплава AuGe и Ni , наносимая методом термического испарения на обратную сторону подложки. Светопоглощающие грани фотодиодных структур были сформированы с помощью колки кристаллов без нанесения дополнительных антибликовых покрытий. Исследования спектров излучения микролазеров выполнялись в непрерывном режиме накачки при комнатной температуре с использованием игольчатых зондов в качестве контактов к верхнему дисковому электроду и сплошному электроду со стороны подложки. Выходящее излучение собиралось в плоскости выходного излучения микролазера с помощью микрообъектива Olympus LMPlan IR $\times 10$ и регистрировалось оптическим спектроанализатором (Yokogawa AQ 6370C). Исследования фототока фотодиода с КЯТ были выполнены при освещении поверхности фотодиода излучением с выделенной длиной волны в спектральном диапазоне $800\text{--}1200\ \text{nm}$. Использовалось излучение галогеновой лампы, пропущенное через монохроматор МДР6. Также были выполнены исследования отклика фотодиода, возбуждаемого излучением микродискового лазера. В качестве источника тока накачки микролазера во всех случаях использовался источник-измеритель Keithley 2401.

На рис. 1 представлен спектр фототока фотодиода с КЯТ. Полученная зависимость демонстрирует максимальные значения фототоклика в спектральной обла-

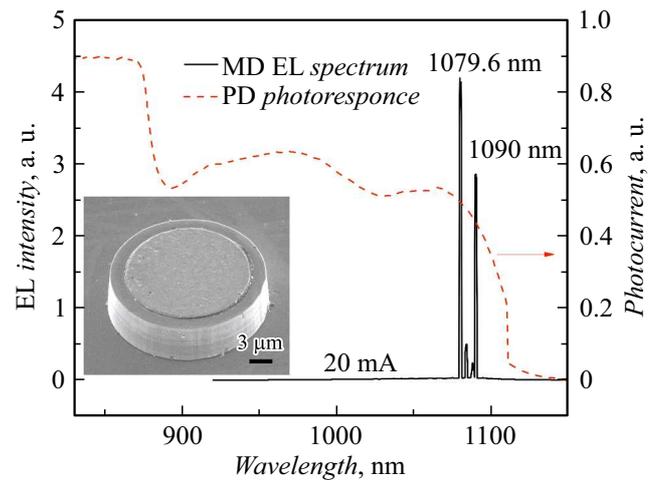


Рис. 1. Спектр электролюминесценции микролазера диаметром $23\ \mu\text{m}$ (сплошная линия), полученный при комнатной температуре, и спектральная зависимость фототоклика фотодиода с КЯТ, возбуждаемого галогеновой лампой (штриховая линия). На вставке — микрофотография микролазера.

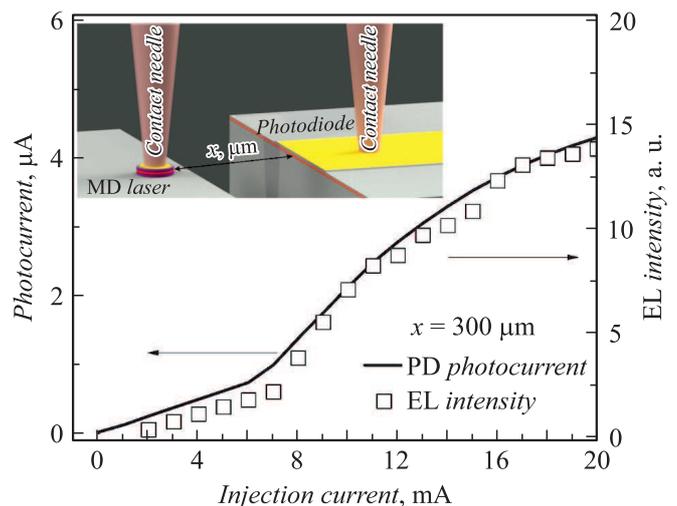


Рис. 2. Зависимости интенсивности электролюминесценции доминирующей линии МПП-лазера, измеренной спектроанализатором (точки), и фототока фотоприемника оптопары от тока инжекции (сплошная линия). На вставке — схематическое изображение микролазера и фотоприемника, расположенного на расстоянии x .

сти, соответствующей поглощению в объемном GaAs до $\sim 880\ \text{nm}$. При дальнейшем увеличении длины волны наблюдается уменьшение величины фототока, вызванное меньшим поглощением света в КЯТ; на спектральной зависимости наблюдаются максимумы, соответствующие возбужденному и основному состояниям в КЯТ (~ 980 и $\sim 1070\ \text{nm}$). Увеличение длины волны падающего света более $1070\ \text{nm}$ приводит к резкому падению величины фототока, что связано с уменьшением плотности состояний в КЯТ. Спектр генерации микродискового лазера является многомодовым, спектральное положение

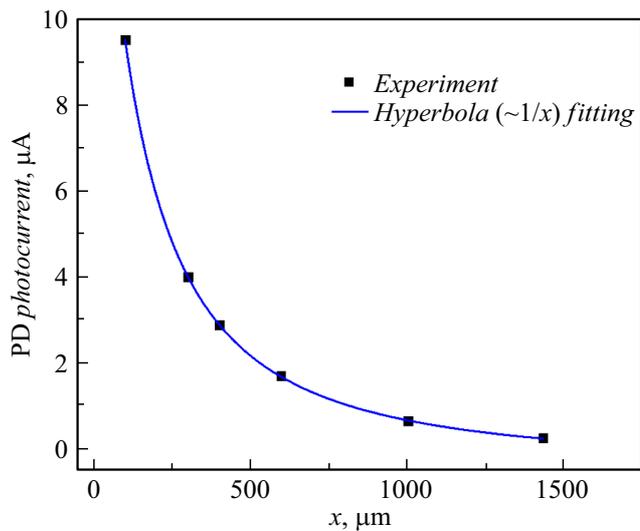


Рис. 3. Зависимость фототока КЯТ фотоприемника от расстояния между лазером и фотоприемником (x). Точки — экспериментальные данные, сплошная линия — аппроксимация функцией вида $f \sim 1/x$.

доминирующей линии (1079.6 nm) (рис. 1) находится в области спада фототока. Такой длинноволновый сдвиг линии генерации лазера связан с разогревом микролазера при протекании тока инжекции. Переход от спонтанного излучения к лазерной генерации проявляется в выраженном изломе на зависимости интенсивности доминирующей линии МШГ от тока инжекции (рис. 2) и сопровождается сужением ширины линии. При достижении порога лазерной генерации полуширина доминантной линии падает до 18 ± 2 nm, что является пределом разрешения нашей спектральной системы. Пороговый ток лазерной генерации составил $I_{th} = 7$ mA, что соответствует пороговой плотности тока $j_{th} \sim 0.7$ kA/cm².

Далее микролазер был расположен в непосредственной близости от фасетки фотодиода, обратное смещение к фотоприемнику не прикладывалось, величина темнового тока не превышала 80 nA. Зависимость фототока фотоприемника от тока инжекции лазера представлена на рис. 2 (приведены абсолютные значения фототока). При малых токах накачки в области регистрации спонтанного излучения фототок меняется слабо, а затем вблизи порогового тока наблюдается перегиб в соответствии с ходом интенсивности доминирующей линии МШГ-лазера, что подтверждает детектирование именно лазерной линии.

При увеличении расстояния между фасеткой фотодиода и резонатором лазера (x) от 100 до 1400 μm величина фототока спадает обратно пропорционально расстоянию (x), что обусловлено расходимостью выходящего лазерного излучения в латеральном и вертикальном направлениях (рис. 3). При расстоянии между элементами микрооптопары 100 μm и токе накачки микролазера 20 mA фототок составляет 9 μA . Сред-

нее значение эффективности преобразования мощности в лазере составляет около 5% [12]. Электрическая мощность, потребляемая микролазером, составляет $1.9 \text{ V} \cdot 20 \text{ mA} = 38 \text{ mW}$, что соответствует выходной оптической мощности $P_{out} \sim 1.9 \text{ mW}$, излучаемой однородно во всех направлениях в плоскости структуры. При этом расходимость лазерного излучения в вертикальном направлении составляет около 20° . Таким образом, при использованном расстоянии между элементами оптопары лишь 0.75% мощности лазера P_{out} (что соответствует $P \sim 14 \mu\text{W}$) достигает поверхности детектора в области волноводного слоя GaAs с поглощающими слоями КЯТ InGaAs. С учетом того, что 30% излучения отражается от поверхности фотодиода, поглощается около $10 \mu\text{W}$ мощности лазера. Таким образом, можно оценить чувствительность такого детектора как $9 \mu\text{A}/10 \mu\text{W}$. Некоторое увеличение чувствительности оптопары возможно при сдвиге в более длинноволновую область края поглощения детектора при приложении обратного смещения. Увеличить абсолютное значение фототока позволит дальнейшее уменьшение расстояния между лазером и фотоприемником (x) вплоть до 10 μm или формирование элемента вывода излучения из микролазера [11,13].

В результате в работе исследована величина фототока между элементами микрооптопары на базе микродискового лазера диаметром 23 μm и фотодетектора с активной областью на основе КЯТ InGaAs. Показана возможность создания компактных приемопередатчиков для систем передачи данных, микродатчиков, бесконтактного управления и прочих приложений.

Финансирование работы

Работы по созданию микролазера и фотоприемника и исследованию их характеристик выполнены при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 18-12-00287). Исследования фототока фотодиода осуществлены в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2020 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Noh W., Dupré M., Ndao A., Kodigala A., Kanté B. // ACS Photonics. 2019. V. 6. P. 389–394.
- [2] Shi B., Zhu S., Li Q., Wan Y., Hu E.L., Lau K.M. // ACS Photonics. 2017. V. 4. P. 204–210.
- [3] Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Zubov F.I., Mozharov A.M., Maximov M.V., Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Guseva Yu.A., Kulagina M.M., Blokhin S.A., Berdnikov Yu., Zhukov A.E. // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. P. 063107.
- [4] Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: Физматлит, 2011. 416 с.

- [5] Foreman M.R., Swaim J.D., Vollmer F. // *Adv. Opt. Photon.* 2015. V. 7. P. 168–240.
- [6] Soria S., Berneschi S., Brenci M., Cosi F., Nunzi Conti G., Pelli S., Righini G.C. // *Sensors*. 2011. V. 11. P. 785–805.
- [7] Arnold S., Khoshsima M., Teraoka I., Holler S., Vollmer F. // *Opt. Lett.* 2003. V. 28. P. 272–274.
- [8] Lin S., Crozie K.B. // *ACS Nano*. 2013. V. 7. P. 1725–1730.
- [9] Dantham V.R., Holler S., Kolchenko V., Wan Z., Arnold S. // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. P. 043704.
- [10] Зубов Ф.И., Крыжановская Н.В., Моисеев Э.И., Полу-
бавкина Ю.С., Симчук О.И., Кулагина М.М., Задиранов Ю.М., Трошков С.И., Липовский А.А., Максимов М.В., Жуков А.Е. // *ФТП*. 2016. Т. 50. В. 10. С. 1425–1428.
- [11] Wan Y., Zhang Z., Chao R., Norman J., Jung D., Shang C., Li Q., Kennedy M.J., Liang D., Zhang C., Shi J.-W., Gossard A.C., Lau K.M., Bowers J.E. // *Opt. Express*. 2017. V. 25. P. 27715.
- [12] Moiseev E., Kryzhanovskaya N., Maximov M., Zubov F., Nadtochiy A., Kulagina M., Zadiranov Yu., Kalyuzhnyy N., Mintairov S., Zhukov A. // *Opt. Lett.* 2018. V. 43. P. 4554–4557.
- [13] Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Lantratov V.M., Maximov M.V., Nadtochi A.M., Rouvimov S., Zhukov A.E. // *Nanotechnology*. 2015. V. 26. P. 385202.