

08

Оптические свойства лазерных мезоструктур с квантовыми ямами HgCdTe, сформированных методом ионного травления

© А.А. Разова^{1,2}, В.В. Румянцев^{1,2}, Д.В. Шенгуров¹, Н.С. Гусев¹, Е.Е. Морозова¹, В.В. Уточкин¹, М.А. Фадеев¹, В.А. Вербус¹, Н.Н. Михайлов³, С.А. Дворецкий³, В.И. Гавриленко^{1,2}, С.В. Морозов^{1,2}

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

³ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: annara@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 17 января 2025 г.

В окончательной редакции 30 июня 2025 г.

Принято к публикации 30 июня 2025 г.

Исследована возможность формирования мезоструктур HgCdTe с микродисковыми резонаторами с использованием металлических масок в рамках процесса взрывной литографии. Продемонстрирована работа микродисковых лазеров в различных спектральных диапазонах от 3 до 25 μm при оптической накачке. Получена одномодовая генерация на длине волны 4.05 μm при 60 К в микродисковом резонаторе диаметром 50 μm .

Ключевые слова: ионное травление, лазерная литография, HgCdTe, мезоструктуры.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.19.61142.20259

В последние десятилетия технология молекулярно-лучевой эпитаксии твердого раствора HgCdTe (кадмий-ртуть-теллур, КРТ) была беспрецедентно улучшена благодаря низкой температуре роста и эллипсометрическому контролю состава слоев непосредственно во время осаждения материалов [1]. Последнее привело к доступности высококачественных гетероструктур на основе теллуридов ртути и кадмия, в том числе дираковских материалов и двумерных топологических изоляторов, а также открыло новые перспективы использования квантовых ям (КЯ) Hg(Cd)Te в инфракрасной оптоэлектронике. Речь идет в первую очередь о возможности создания приемников и излучателей среднего инфракрасного диапазона, характеризующихся выраженным подавлением ударной (оже-) рекомбинации [2], что позволяет таким приборам работать при более высоких температурах, чем изготовленные на основе объемных твердых растворов. Экспериментально данный эффект был продемонстрирован в серии недавних публикаций применительно к стимулированному излучению (СИ) на межзонных переходах (в частности, в работе [3] достигнута длина волны до 31 μm). Тем не менее формирование резонаторов сколом в таких структурах затруднено вращательной ориентацией подложки (013). С другой стороны, травление материалов HgCdTe также является сложной технологической задачей, так как воздействие температур выше 180 °С приводит к катастрофической деградации HgCdTe. Мокрое травление структур бромсодержащими травителями в основном рассматривается в качестве вспомогательного процесса к сухому травлению для удаления нарушенного слоя [4,5]. Особенностью сухого (ионного и плазмохимического) травления является возникновение

n^{++} -слоя на поверхности структуры, простирающегося на десятки микрометров даже при умеренных временах травления [6–9]. В то же время подобный эффект наблюдается в основном для составов, обогащенных ртутью. В настоящей работе исследуется влияние ионного травления (ИТ) на оптические свойства структур с волноводом из HgCdTe с долей кадмия ~ 0.7 , выращенных на подложке GaAs (013). Ранее этот вопрос был изучен слабо, особенно в структурах с КЯ.

Исследуемые структуры содержат массив КЯ Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_yHg_{1-y}Te внутри обкладочных слоев широкозонного материала, выращенного для эффективного удержания излучения вблизи КЯ. Волноводные слои выращивались на буфере CdTe, толщина которого составляла 5 или 10 μm в зависимости от спектрального диапазона генерации. Подложка из арсенида галлия в случае структур, рассчитанных на длинноволновую генерацию, дополнительно легировалась до концентрации около 10^{18} cm^{-3} . Микродисковые резонаторы формировались ионами аргона с энергией $\sim 1.4 \text{ keV}$ и током ионов 12.7 mA/cm^2 . В качестве масок использовались фоторезист (ФР) и металлические маски с последующим процессом „lift-off“. Маски на основе алюминия, никеля и прочих металлов наносились с помощью магнетронного напыления после формирования рисунка с помощью лазерной литографии.

Полученные мезоструктуры исследовались на оптическом микроскопе (ОМ) и растровом электронном микроскопе (РЭМ), после чего осуществлялись измерения спектров СИ или лазерного излучения (ЛИ) методом фурье-спектроскопии. Методика измерения подробно описана в работе [3]. Для детектирования преимуще-

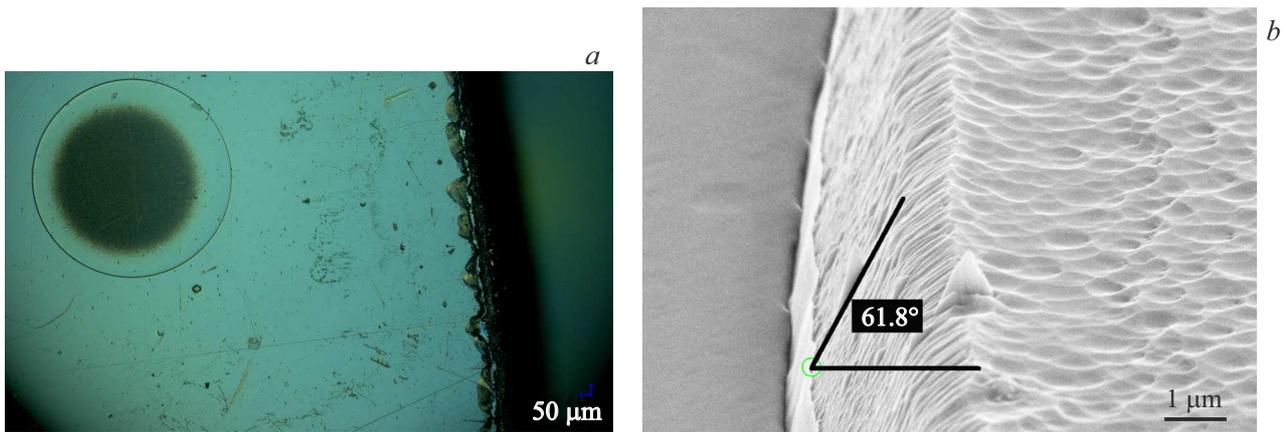


Рис. 1. Снимки поверхности гетероструктур HgCdTe с КЯ и микродисков на их основе. *a* — ОМ-снимок поверхности исследуемой структуры с микродиском диаметром 1 мм; *b* — РЭМ-снимок боковой поверхности микродиска с указанием угла наклона.

Параметры исследованных структур

Номер структуры	$\lambda, \mu\text{m}$	Маска	$h, \mu\text{m}$	$D, \mu\text{m}$	T_{max}, K	$I, \text{kW/cm}^2$
0422	4	Ni/V	1.7	50	60	26 ± 2
0201	2.8	Al	1	40/20	230	120 ± 5 (170 K)
1201-2	25	Ni/V/Cr	4.5	300	50	25 ± 3
1201-3	25	Al	4.3	200	50	30 ± 3

Примечание. λ — длина волны генерации, h — глубина травления, T_{max} — максимальная температура генерации, I — порог генерации при 30 K, D — диаметр микрорезонатора (внешний). Для кольцевого резонатора 0201 также через косую черту указан внутренний диаметр.

ственно использовались быстродействующие фотоэлектрические приемники на основе КРТ, а для наиболее длинноволновой генерации в отдельных случаях — кремниевый болометр, охлаждаемый жидким гелием. В качестве накачки использовались параметрический генератор света (длина волны $2 \mu\text{m}$, длительность импульса 10 ns, частота следования импульсов 10 Hz, максимальная плотность мощности до 1 MW/cm^2) и импульсный CO_2 -лазер (длина волны $10.6 \mu\text{m}$, длительность импульса ~ 100 ns, частота повторения до 50 Hz, максимальная плотность мощности до 100 kW/cm^2).

В мезаструктурах, формируемых с использованием исключительно ФР, угол наклона стенок мезаструктур не превышает $78\text{--}80^\circ$, что обуславливает низкую добротность резонаторов Фабри–Перо [10]. В настоящей работе были исследованы микродисковые резонаторы, так как в них наблюдалась выраженная модовая структура в спектрах излучения как в окрестности $4 \mu\text{m}$ [11], так и при генерации вблизи $25 \mu\text{m}$ [12]. На основе анализа изображений, полученных с помощью ОМ и РЭМ, было установлено, что непрерывное ИТ на протяжении более 3 min приводит к катастрофической деградации поверхности структуры (рис. 1). На снимке ОМ (рис. 1, *a*) видно, что цвет поверхности диска и остальной поверхности структуры заметно различается. РЭМ-изображение показывает высокую дефектность стенки и поверхности микродиска (рис. 1, *b*), что предполагает высокую скорость безызлучательной (поверх-

ностной) рекомбинации в таких мезаструктурах. Проведенные спектроскопические исследования показали, что лазерное/стимулированное излучение в них отсутствовало. Угол наклона боковой стенки в данных мезах составил $\sim 62^\circ$ (рис. 1, *b*). Таким образом, при непрерывном ИТ происходит интенсивный разогрев фоторезиста и структуры, что ведет к деградации поверхности. Циклическое травление с промежутками для остывания структуры в атмосфере аргона позволило уменьшить или полностью исключить этот эффект.

Для создания мезаструктур в длинноволновой области спектра требуется травление на глубину до $10 \mu\text{m}$, в то время как селективность травления при использовании ФР не превышает 1.5. Для повышения селективности были использованы металлические маски в рамках процесса взрывной литографии. Помимо большей глубины травления целью использования металлических масок было увеличение угла наклона стенок мезаструктур к плоскости структуры вплоть до 90° . В таблице приведены характеристики исследованных структур.

Использование традиционных материалов для металлических масок, таких как титан и никель, оказалось затруднено. Из-за высокой адгезии Ti и Ni возможность их удаления химическим путем ограничена, и примерно в 75% случаев происходит разрушение мезаструктуры. Вспомогательный слой ванадия на поверхности масок из Ni был использован для более эффективного удаления маски с помощью раствора H_2O_2 . Тем не менее и в этом

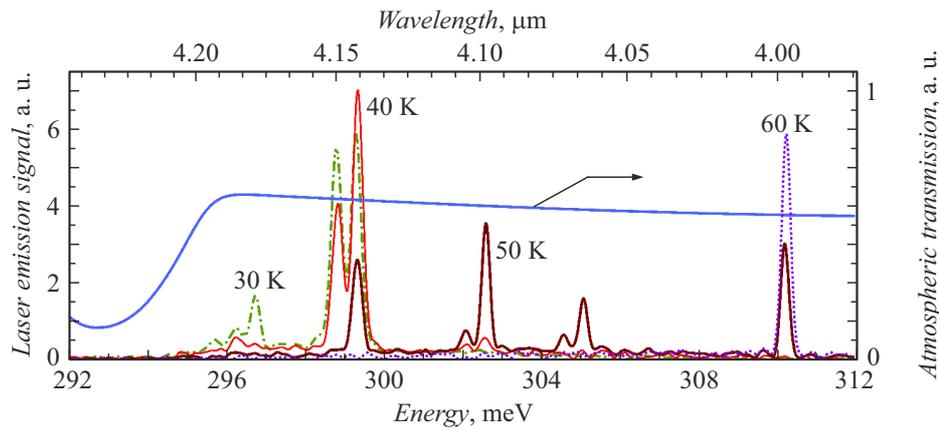


Рис. 2. Спектры ЛИ микродиска 0422 при различных температурах и спектр атмосферного поглощения.

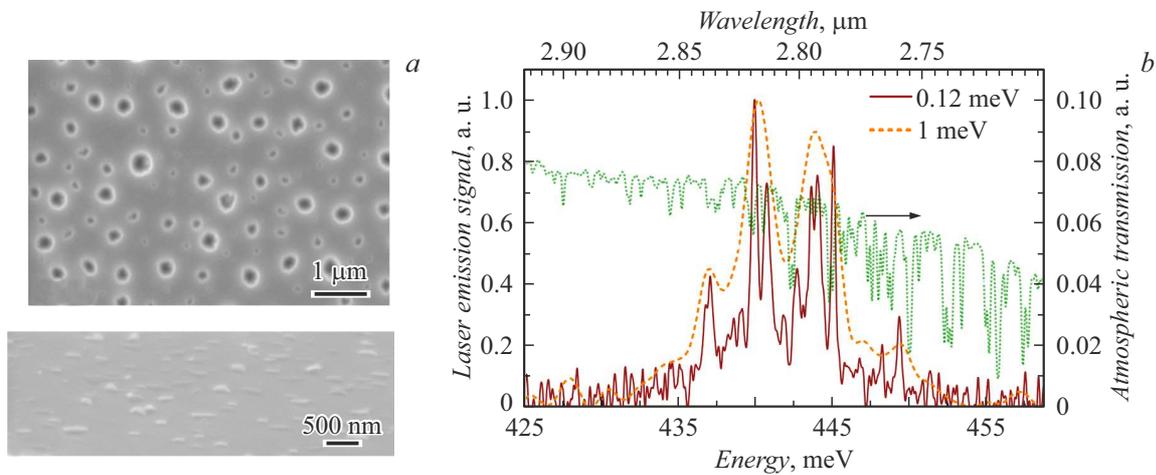


Рис. 3. *a* — РЭМ-изображения поверхности исследуемых мезоструктур, при формировании которых использовалась алюминиевая маска. *b* — спектры ЛИ микрокольца образца 0201 с разным разрешением при 130 К и спектр атмосферного поглощения.

случае наблюдалось уменьшение максимальной температуры генерации до 60 К при типичных температурах гашения СИ в непроцессированных образцах 240–270 К (рис. 2).

Преимуществом масок из алюминия является возможность его удаления с помощью раствора щелочи, несмотря на высокий уровень адгезии Al к поверхности КРТ. При использовании алюминиевой маски максимальная температура генерации падает лишь на 30–40 К относительно таковой для непроцессированного образца, несмотря на хорошо заметные на РЭМ-изображениях дефекты в виде углублений и зерен на поверхности микродисков (рис. 3, *a*). Отметим, что ЛИ наблюдалось и в микродисковых, и в микрокольцевых резонаторах, где площадь поверхности боковых стенок значительно больше, что косвенно указывает на слабую роль поверхностной рекомбинации на боковых стенках мезоструктуры (рис. 3, *b*).

Для длинноволновых структур были также апробированы маски из алюминия и трехслойная маска Ni/V/Cr для наиболее эффективного удаления всех металлов

с поверхности структуры. В этом случае травление осуществлялось на половину толщины волновода, этого достаточно для получения выраженной модовой структуры на спектрах излучения (рис. 4, *a*). В данном случае основные характеристики ЛИ оказались близки для обоих типов масок: уменьшение рабочей температуры относительно таковой для непроцессированных образцов составило 45 К, а пороговая плотность мощности накачки при 30 К находилась в диапазоне $(25–30) \pm 3 \text{ kW/cm}^2$. Угол наклона стенок, несмотря на возросшую глубину травления, сохраняется на уровне 83° по отношению к поверхности структуры (рис. 4, *b*).

Отметим, что гладкость стенок микродисков при использовании металлических масок, как правило, хуже, чем в случае использования исключительно ФР, что может быть дополнительным фактором ухудшения параметров генерации. Гофрировка боковой поверхности мезоструктур (рис. 4, *b*) связывается с дискретностью перемещения источника засветки в использованной технологии лазерной литографии. Можно ожидать, что в случае использования фотошаблона для фор-

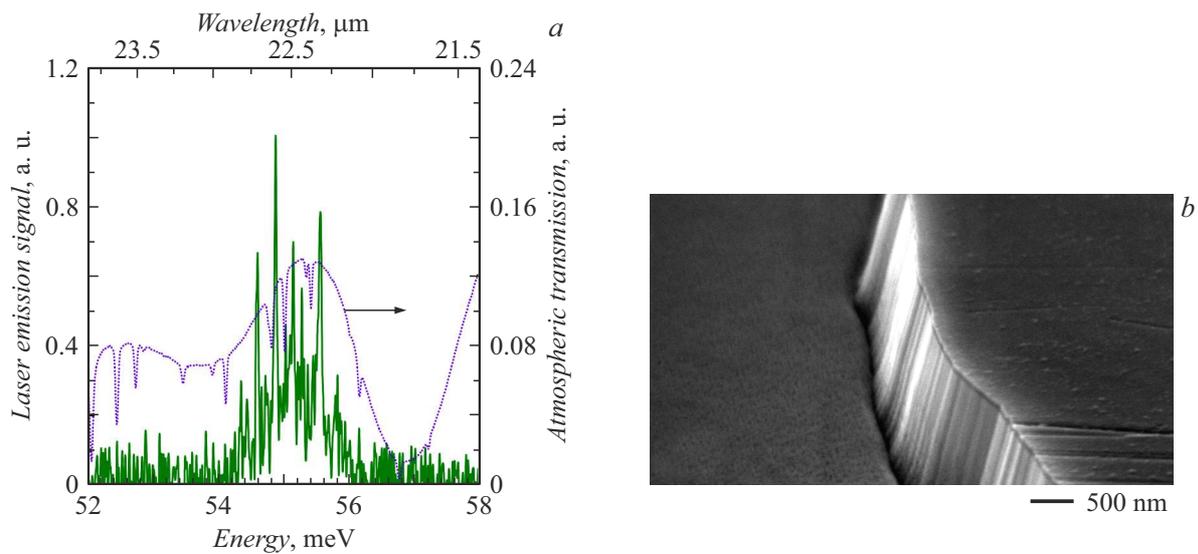


Рис. 4. *a* — спектр ЛИ для микродиска 1201-3 при 30 К и спектр атмосферного поглощения. *b* — РЭМ-изображение боковой стенки микродиска 1201-2, при формировании которого использовалась маска Ni/V/Cr.

мирования мезаструктур данный эффект будет минимизирован.

Таким образом, использование металлических масок в рамках процесса взрывной литографии позволяет сформировать микродисковые резонаторы на основе структур HgCdTe с КЯ, в которых возможна генерация ЛИ как в окне прозрачности атмосферы 3–5 μm, так и в „сверхдлинноволновом“ диапазоне 20–25 μm. Апробированная технология позволяет уменьшить угол отклонения боковых стенок мезаструктуры от нормали до 7°, что позволяет рассчитывать на улучшение добротности резонаторов Фабри–Перо в гребенчатых лазерах, формируемых аналогичной технологией ИТ.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ РАН (124050300055-9/FFUF-2024-0045).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Швец, Н.Н. Михайлов, Д.Г. Икусов, И.Н. Ужаков, С.А. Дворецкий, *Оптика и спектроскопия*, **127**, 318 (2019). DOI: 10.21883/OS.2019.08.48049.364-18 [V.A. Shvets, N.N. Mikhailov, D.G. Ikusov, I.N. Uzhakov, S.A. Dvoretzkiy, *Opt. Spectrosc.*, **127**, 340 (2019). DOI: 10.1134/s0030400x19080253].
- [2] S. Ruffenach, A. Kadykov, V.V. Rumyantsev, J. Torres, D. Coquillat, D. But, S.S. Krishtopenko, C. Consejo, W. Knap, S. Winnerl, M. Helm, M.A. Fadeev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzkiy, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, F. Teppe, *APL Mater.*, **5**, 035503 (2017). DOI: 10.1063/1.4977781
- [3] S.V. Morozov, V.V. Rumyantsev, M.S. Zholudev, A.A. Dubinov, V.Y. Aleshkin, V.V. Utochkin, M.A. Fadeev, K.E. Kudryavtsev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzkiy, V.I. Gavrilenko, F. Teppe, *ACS Photon.*, **8** (12), 3526 (2021). DOI: 10.1021/acsp Photonics.1c01111
- [4] A. Causier, I. Gerard, M. Bouttemy, A. Etcheberry, C. Pautet, J. Baylet, L. Mollard, *J. Electron. Mater.*, **40** (8), 1823 (2011). DOI: 10.1007/s11664-011-1660-7
- [5] R. Tenne, R. Brener, R. Triboulet, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **7** (4), 2570 (1989). DOI: 10.1116/1.575798
- [6] V.G. Savitsky, L.G. Mansurov, I.M. Fodchuk, I.I. Izhnin, I.S. Virt, M. Lozynska, A.V. Evdokimenko, *Proc. SPIE*, **3725**, 299 (1999). DOI: 10.1117/12.344754
- [7] J. Antoszewski, C.A. Musca, J.M. Dell, L. Faraone, *J. Electron. Mater.*, **29** (6), 837 (2000). DOI: 10.1007/s11664-000-0234-x
- [8] N.N. Berchenko, V.V. Bogoboyashchii, I.I. Izhnin, A.P. Vlasov, *Phys. Status Solidi B*, **229** (1), 279 (2002). DOI: 10.1002/1521-3951(200201)229:1<279::aid-ssb279>3.0.co;2-0
- [9] V.I. Ivanov-Omskii, K.E. Mironov, K.D. Mynbaev, *Semicond. Sci. Technol.*, **8** (5), 634 (1993). DOI: 10.1088/0268-1242/8/5/003
- [10] V. Utochkin, K. Kudryavtsev, V. Rumyantsev, M. Fadeev, A. Razova, N. Mikhailov, D. Shengurov, S. Gusev, N. Gusev, S. Morozov, *Appl. Opt.*, **62** (32), 8529 (2023). DOI: 10.1364/AO.504295
- [11] A.A. Razova, M.A. Fadeev, V.V. Rumyantsev, V.V. Utochkin, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzkiy, N.S. Gusev, D.V. Shengurov, E.E. Morozova, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, *Appl. Phys. Lett.*, **123** (16), 161105 (2023). DOI: 10.1063/5.0171781
- [12] A.A. Razova, V.V. Rumyantsev, K.A. Mazhukina, V.V. Utochkin, M.A. Fadeev, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzkiy, D.V. Shengurov, N.S. Gusev, E.E. Morozova, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, *Appl. Phys. Lett.*, **126** (12), 121102 (2025). DOI: 10.1063/5.0253661