

08.3.; 09.1.

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

А. А. Разова<sup>1,2</sup>, В. В. Румянцев<sup>1,2</sup>, Д. В. Шенгуров<sup>1</sup>, Н. С. Гусев<sup>1</sup>, Е. Е. Морозова<sup>1</sup>, В. В. Уточкин<sup>1</sup>, М. А. Фадеев<sup>1</sup>, В. А. Вербус<sup>1</sup>, Н. Н. Михайлов<sup>3</sup>, С. А. Дворецкий<sup>3</sup>, В. И. Гавриленко<sup>1,2</sup>, С. В. Морозов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

\*e-mail: annara@ipmras.ru

### **Аннотация**

Гетероструктуры с квантовыми ямами на основе твердых растворов HgCdTe в последнее время рассматриваются как перспективный материал для приложений среднего инфракрасного диапазона, в частности, для создания лазеров. В данной работе исследовано влияние процессов фотолитографии с различными масками и ионного травления на оптические свойства мезоструктур с микродисковыми, микрокольцевыми и гребенчатыми резонаторами, сформированных на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe. Показана возможность использования предлагаемой технологии для изготовления лазеров диапазона окна прозрачности атмосферы 3 – 5 мкм, работающих при термоэлектрическом охлаждении.

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

На протяжении нескольких десятилетий фотоэлектрические приемники на основе HgCdTe (кадмий-ртуть-теллур, КРТ) являются одними из детекторов, применяемых в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне. Тенденциями дальнейшего развития этих устройств помимо увеличения чувствительности и понижения плотности дефектов является миниатюризация и повышение разрешения матричных детекторов. Кроме фотоприемников, велись работы и по созданию лазеров и светодиодов на основе HgCdTe [1]. В последние годы достигнут значительный прогресс в этом направлении с точки зрения максимальных длины волны и температуры генерации [2, 3]. Очевидно, что для формирования резонаторов для получения лазерного излучения необходима хорошо отработанная технология постростовой обработки структур на основе HgCdTe. В настоящее время различные методы литографии и травления являются неотъемлемой частью планарных технологий, которые используют в электронной промышленности для создания чипов, матриц, детектирующих или излучающих приборов. Однако из-за высокой чувствительности HgCdTe к температурным и химическим воздействиям в технологии формирования мезоструктур на основе этого материала сохраняется ряд проблем. Мокрое травление структур на основе HgCdTe в основном осуществляется с помощью растворов на основе  $\text{Br}_2$  [4]. Однако при химическом травлении HgTe и CdTe травятся в кислых растворах с разной скоростью [5] и на данный момент химическое травление в основном рассматривается в качестве дополнительного процесса к сухому травлению для удаления нарушенного слоя, а не как самостоятельный способ формирования мезоструктур. В то же время, несмотря на высокую анизотропию и в целом большую контролируемость сухое травление приводит к неблагоприятным «побочным эффектам». Во многих работах было установлено, что в образцах *p*-типа при сухом травлении происходит инверсия проводимости с образованием *n*-слоя толщиной от единиц до 10 мкм при ионном травлении [6] и от десятков до сотен мкм при плазмохимическом травлении [7]. Стоит отметить, что инверсия проводимости

происходит не только в вакансионно-легированных объемных структурах HgCdTe, но и в эпитаксиальных пленках HgCdTe, легированных акцепторной примесью [8,9]. В случае структур с *n*-типом проводимости ионное травление (ИТ) также приводит к образованию нарушенного слоя, в котором увеличены концентрация носителей и их подвижность по сравнению с исходной структурой [10]. Релаксация концентрации носителей к исходному или близкому к исходному значению происходила как с течением времени [11], так и при использовании термического отжига [12] или отжига в атмосфере азота [13].

В данной работе исследуется возможность использования ионного травления для создания микрорезонаторов на базе гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) HgCdTe/CdHgTe для получения лазерной генерации в среднем ИК-диапазоне. Очевидно, что в случае гетероструктур с КЯ возможности отжига структур ограничены из-за рисков сильного размытия гетерограниц. С другой стороны, большие концентрации электронов и дырок, требуемые для создания инверсии населенностей (особенно при относительно высоких температурах), отчасти смягчают требования к низкой дефектности структур по сравнению с фотоприемниками. Ранее влияние ИТ на генерацию лазерного излучения в HgCdTe был изучен слабо, особенно в структурах с КЯ. В настоящей работе продемонстрировано, что методом ИТ удастся сформировать микродисковые резонаторы на основе гетероструктур HgCdTe с КЯ, в которых лазерная генерация достигается при температуре не менее 230 К (для длин волн 3 – 4 мкм).

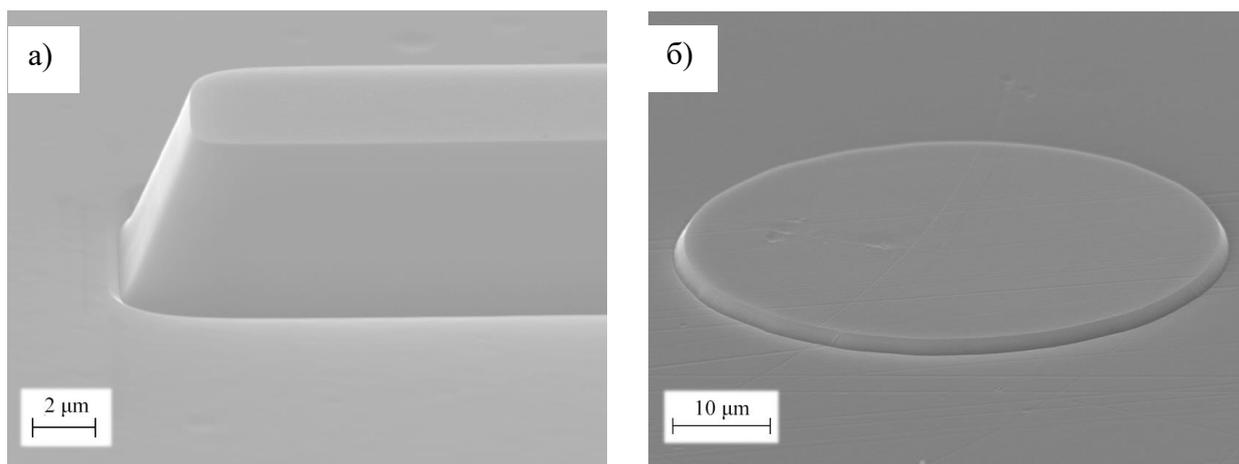
В работе исследовались гетероструктуры с КЯ  $Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_yHg_{1-y}Te$ , выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложке GaAs (013). Толщина буферного слоя CdTe составляла 5 мкм. Расположенный на буфере волноводный слой CdHgTe локализует  $TE_0$  моду межзонного излучения в области КЯ за счёт увеличения его показателя преломления по сравнению с буферным слоем. Формирование мезоструктур осуществлялось методом ионного травления с использованием лазерной литографии. В качестве масок использовался либо фоторезист (ФР), либо металлические маски с

последующим процессом «lift-off». Перед началом процессинга поверхность структуры подвергалась очистке в ультразвуковой ванне. Нанесение ФР осуществлялось в центрифуге, а металлические маски наносились с помощью магнетронного напыления. Травление производилось ионами аргона с энергией  $\sim 1.4$  кэВ.

Характеризация структур осуществлялась с помощью микроскопических и спектроскопических исследований. Микроскопические исследования выполнялись на оптическом микроскопе (ОМ) и сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Исследование оптических свойств мезоструктур осуществлялась с помощью измерения спектров лазерного излучения (ЛИ), стимулированного излучения (СИ) и фотолюминесценции (ФЛ) методом фурье-спектроскопии. Запись спектров проходила с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v, выход которого был сопряжен с эллиптическим зеркалом, в режиме пошагового сканирования. В качестве приемников в зависимости от диапазона использовались фотоэлектрические детекторы на основе HgCdTe. Для оптического возбуждения использовались 1) непрерывный волоконный лазер (длина волны 1.9 мкм с максимальной интенсивностью до сотни Вт/см<sup>2</sup>) для наблюдения ФЛ в непрерывном режиме; 2) импульсный оптический параметрический генератор света (длина волны 2 мкм, длительность импульса 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, максимальная интенсивность до 1 МВт/см<sup>2</sup>).

Недавней демонстрацией перспективности использования лазерной литографии и ИТ для формирования мезоструктур на основе гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe стали гребенчатые лазеры (Рис. 1а), излучающие на длинах волн 7-9 мкм при температурах до 120 К [14] и микродиски диаметром 50 мкм (Рис. 1б), в которых было получено ЛИ вплоть до 230 К в области окна прозрачности атмосферы 3-5 мкм [15]. При формировании данных мезоструктур в качестве маски использовался ФР AZ1512 и проявитель MIF746. Из рис. 1 видно, что поверхность мезоструктур достаточно гладкая и имеет лишь незначительные дефекты. Оцениваемая шероховатость поверхности

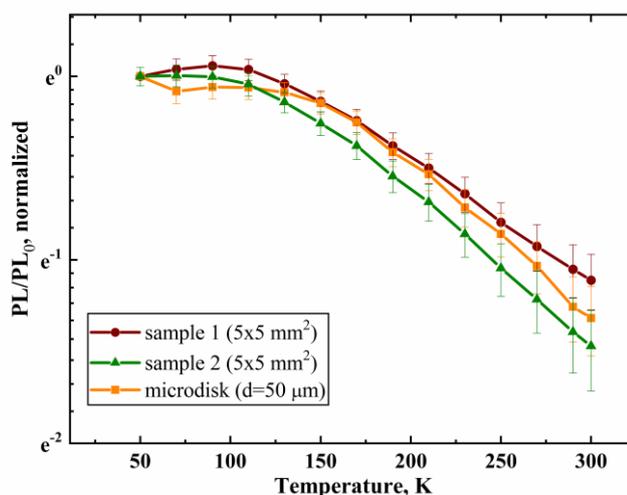
соотносится с длиной волны как 1:100. Угол наклона стенок мезаструктур составляет  $70^\circ$ - $73^\circ$  (Рис. 1а) и  $78^\circ$ - $80^\circ$  (Рис. 1б). Таким образом, торец гребня, выполняющий роль зеркала в резонаторе Фабри-Перо (ФП), в значительной степени не перпендикулярен поверхности. По-видимому, последнее является причиной того, что для рабочих длин волн  $\sim 4$  мкм ЛИ в подобных структурах добиться не удастся: на спектрах излучения отсутствует выраженная модовая структура. При этом в вытравленном резонаторе наблюдается предсказуемое уменьшение максимальной температуры наблюдения однопроходового СИ: с 290 К в макроскопических ( $5 \times 5$  мм<sup>2</sup>) выколотых из ростовой пластины образцов до 230 К в резонаторе, что связано с уменьшением длины образца, а значит и усиливающей области, до 500 мкм (это практически на порядок меньше, чем в выколотом макроскопическом образце).



**Рис. 1.** СЭМ снимки мезаструктур на основе HgCdTe, сформированных с помощью лазерной литографии и ионного травления: а) край гребенчатого резонатора, б) микродисковый резонатор

Модовая структура в спектрах излучения в окрестности 4 мкм была обнаружена при исследованиях микродисковых резонаторов, что связывается с большей устойчивостью мод шепчущей галереи (МШГ) к небольшому наклону боковой стенки мезы по сравнению с модами в резонаторе ФП. Стоит отметить, что максимальная рабочая температура лазера на МШГ также оказалась на 30-40 К ниже, чем максимальная температура наблюдения

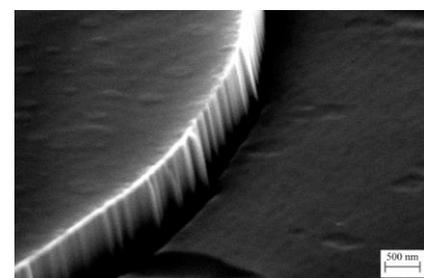
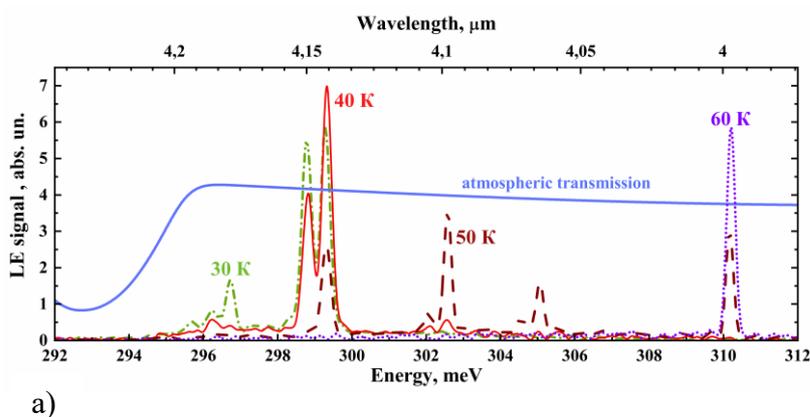
СИ в непроцессированных образцах той же структуры. Для оценки влияния безызлучательных механизмов рекомбинации на максимальную температуру ЛИ были измерены температурные зависимости интегральной ФЛ микродиска и непроцессированных образцов (Рис. 2). Динамика гашения ФЛ микродиска схожа с динамикой гашения ФЛ непроцессированных образцов исследуемой структуры. Небольшие отличия находятся в пределах экспериментальной точности измерений. Значения пороговых плотностей мощности накачки для возникновения генерации в микродиске и непроцессированном образце также совпадают до 190 К и начинают незначительно отличаться при бóльшей температуре [15]. Совокупность результатов измерения ФЛ и пороговых характеристик позволяет предположить, что безызлучательные процессы проходят практически одинаково в мезах и непроцессированных образцах, поэтому не являются определяющими в уменьшении рабочего диапазона температур резонаторов по отношению к непроцессированным структурам. Таким образом, уменьшение рабочей температуры связывается с потерями на вывод излучения из мезаструктуры, которые ничтожно малы в макроскопических образцах.



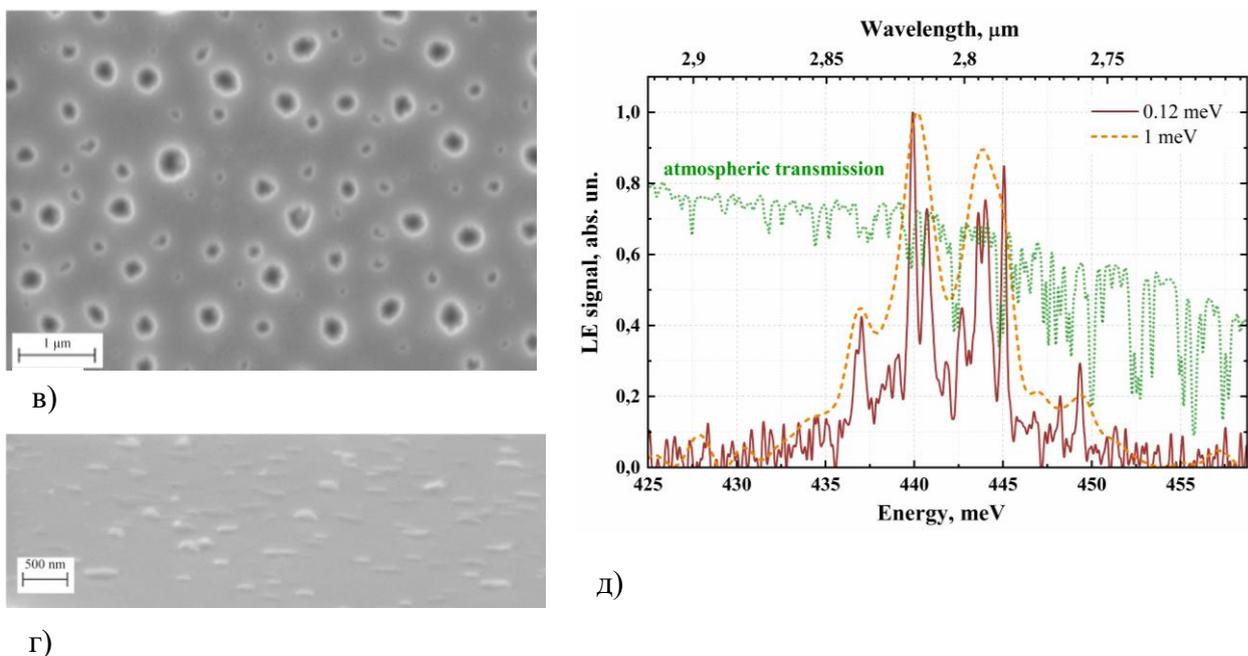
**Рис. 2.** Температурные зависимости интегральной ФЛ микродискового резонатора и двух макроскопических образцов, полученных из одной ростовой пластины, нормированные

на значение при 50 К.

Для исследования возможности улучшения «вертикальности» стенок мезоструктур, а также увеличения глубины травления, требуемого для более длинноволновых структур (из-за увеличения толщины волновода) была апробирована технология взрывной литографии с использованием различных металлических масок. Использование стандартных материалов – титана (Ti) и никеля (Ni) – оказалось затруднено из-за их сильной адгезии к HgCdTe, приводящей к разрушению мезоструктуры при процессе взрывной литографии. Кроме того, удаление остатков маски требовало агрессивной кислотной среды, что приводило к сильной деградации поверхности HgCdTe. Для решения этой проблемы была апробирована парная маска никель - ванадий (Ni/V). Ванадиевая маска повышает селективность травления и после достижения необходимой высоты мезоструктуры может быть относительно легко удалена химически с помощью раствора H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Тем не менее, из-за плохой адгезии нанесение ванадия на HgCdTe требует подслоя никеля, который впоследствии должен быть удален ИТ. Угол наклона стенок мезоструктуры при использовании таких масок вырос до 83°, однако предельная температура генерации упала с 230 К до 60 К (Рис. 3а).



б)



**Рис. 3.** а) Спектры ЛИ для микродисков, сформированных с помощью Ni/V маски. б, в, г) СЭМ-снимки структур, при формировании которых использовалась Al маска. д) Спектр ЛИ кольцевого резонатора внешним диаметром 40 мкм и внутренним диаметром 20 мкм, записанный с различным спектральным разрешением (см. легенду).

Наилучшие результаты были получены с помощью маски из алюминия (Al). Алюминий может быть удален с помощью раствора КОН, и имеет хорошую адгезию к HgCdTe. Несмотря на дефекты структуры, заметные на СЭМ-изображениях (Рис. 3б, в, г), ЛИ наблюдалось и в микродисковых, и в микрокольцевых резонаторах, полученных при использовании алюминиевой маски (Рис. 3г). Максимальная температура генерации составила 230 К, как и для гребенчатых мез, полученных с помощью ФР из той же структуры, однако на спектрах излучения отчетливо прослеживается модовая структура. Отсутствие существенного увеличения предельной температуры генерации, по-видимому, связано с дефектами стенок мезаструктуры. В использованной технологии экспонирование ФР осуществляется лазерным лучом с дискретным перемещением, приводящим к «ступенчатости» рисунка засветки. В результате при использовании металлических масок происходит гофрировка боковой поверхности мезаструктуры (Рис. 3б). В случае маски из ФР данный эффект выражен слабее из-за большей мягкости ФР и

его склонности к «растеканию» в ходе ионного травления. Таким образом, несмотря на улучшение вертикальности стенок мезоструктур (до  $83^\circ$ , как и в случае с маской Ni/V), их «гофрировка», по-видимому, все еще приводит к существенным оптическим потерям. Тем не менее, отметим, что использование маски из Al позволяет довести глубину травления до 4 мкм и получить ЛИ на длинах волн в существенно более длинноволновом диапазоне (22 – 25 мкм) [16].

Таким образом, в данной работе продемонстрировано, что в микродисковых резонаторах, сформированных ИТ с использованием лазерной литографии можно получить ЛИ в области окна прозрачности атмосферы при температуре по меньшей мере  $\sim 230$  К, как при использовании масок из ФР, так и алюминиевых масок с последующей технологией “lift-off”.

### **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. J.M. Arias, M. Zandian, R. Zucca, J. Singh, *Semiconductor Science and Technology*, **8** (1S), S255 (1993). 10.1088/0268-1242/8/1S/056
2. 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. Dvoretzkii, V.I. Gavrilenko, F. Terpe, *ACS Photonics*, **8** (12), 3526-3535 (2021). DOI: 10.1021/acsp Photonics.1c01111

3. V.V. Utochkin, K.E. Kudryavtsev, A.A. Dubinov, M.A. Fadeev, V.V. Rumyantsev, A.A. Razova, E.V. Andronov, V.Y. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, F. Teppe, S.V. Morozov, *Nanomaterials*, **12** (15), 2599 (2022). DOI: 10.3390/nano12152599
4. A. Causier, I. Gerard, M. Bouttemy, A. Etcheberry, C. Pautet, J. Baylet, L. Mollard, *Journal of electronic materials*, **40** (8), 1823-1829 (2011). DOI: 10.1007/s11664-011-1660-7
5. R. Tenne, R. Brener, R. Triboulet, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **7** (4), 2570-2574 (1989). DOI: 10.1116/1.575798
6. В.И. Иванов-Омский, К.Е. Миронов, К.Д. Мынбаев, *ФТП*, **24** (12), 2222-2224 (1990).
7. V.G. Savitsky, L.G. Mansurov, I.M. Fodchuk, I.I. Izhnin, I.S. Virt, M. Lozynska, A.V. Evdokimenko, In *International Conference on Solid State Crystals' 98: Epilayers and Heterostructures in Optoelectronics and Semiconductor Technology*, **3725**, 299-303 (1999). DOI: 10.1117/12.344754.
8. J. Antoszewski, C. A. Musca, J. M. Dell, L. Faraone, *Journal of Electronic materials*, **29** (6), 837-840 (2000). DOI: 10.1007/s11664-000-0234-x
9. N.N. Berchenko, V.V. Bogoboyashchiy, I.I. Izhnin, A.P. Vlasov, *physica status solidi (b)*, **229** (1), 279-282 (2002). DOI: 10.1002/1521-3951(200201)229:1<279::aid-pssb279>3.0.co;2-0
10. V.I. Ivanov-Omskii, K.E. Mironov, K.D. Мынбаев, *Semiconductor science and technology*, **8** (5), 634-637 (1993). DOI: 10.1088/0268-1242/8/5/003
11. D.V. Gorshkov, G.Y. Sidorov, V.S. Varavin, I.V. Sabinina, M.V. Yakushev, *Applied Physics Letters*, **116** (8), 082102 (2020). DOI: 10.63/1.5136265
12. Б.А. Костюк, В.С. Варавин, И.О. Парм, В.Г. Ремесник, Г.Ю. Сидоров, *Прикладная физика*, (4), 85-89 (2014).

13. J. Huang, Z. Ye, W. Yin, H. Hu, C. Lin, X. Hu, R. Ding, L. He, 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronic Materials and Devices for Sensing, Imaging, and Solar Energy, ed. by Yadong Jiang, Junsheng Yu, Zhifeng Wang, (SPIE, 2012), 8419, 841921. DOI: 10.1117/12.977400
14. V. Utochkin, K. Kudryavtsev, V. Rumyantsev, M. Fadeev, A. Razova, N. Mikhailov, D. Shengurov, S. Gusev, N. Gusev, S. Morozov, Applied Optics, **62** (32), 8529-8534 (2023). DOI: 10.1364/AO.504295
15. A.A. Razova, M.A. Fadeev, V.V. Rumyantsev, V.V. Utochkin, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, N.S. Gusev, D.V. Shengurov, E.E. Morozova, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, Applied Physics Letters. **123** (16), 161105 (2023). DOI: 10.1063/5.0171781
16. S.V. Morozov, K.A. Mazhukina, A.A. Yantser, A.A. Razova, V.V. Utochkin, M.A. Fadeev, V.V. Rumyantsev, A.A. Dubinov, D.V. Shengurov, N.N. Mikhailov, 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) (IEEE, 2024), 1-6. DOI: 10.1109/PIERS62282.2024.10618720