

**ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ
Cd_xHg_{1-x}Te/Cd_yHg_{1-y}Te С МИКРОДИСКОВЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ
В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 4.1—5.1 мкм**

А. А. Разова^{1,2}, В. В. Уточкин¹, М. А. Фадеев¹, В. В. Румянцев^{1,2}, А. А. Дубинов^{1,2*},
К. Е. Кудрявцев^{1,2}, Д. В. Шенгуров¹, Е. Е. Морозова¹, Е. В. Скороходов¹,
Н. Н. Михайлов³, С. А. Дворецкий³, В. И. Гавриленко^{1,2}, С. В. Морозов^{1,2}

УДК 621.373.8

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-5-632-637>

¹ Институт физики микроструктур Российской АН, Нижний Новгород, Россия

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

³ Институт физики полупроводников СО Российской АН,
Новосибирск, Россия; e-mail: sanya@ipmras.ru

(Поступила 16 июня 2022)

Исследованы спектры фотолюминесценции и лазерного излучения структуры с квантовыми ямами на основе твердого раствора CdHgTe с микродисковыми резонаторами разных диаметров. Показано, что наличие резонатора способствует повышению максимальной рабочей температуры генерации по сравнению с непроцессированной структурой.

Ключевые слова: CdHgTe, микродисковые резонаторы, лазер.

The first results on the study of photoluminescence and lasers radiation spectra of a CdHgTe solid solution-based quantum well structure with microdisk cavities of different diameters are demonstrated. It is shown that the presence of cavities contributes to an increase in the maximum operating temperature of generation compared to the unprocessed structure.

Keywords: CdHgTe, microdisk cavities, laser.

Введение. Компактные полупроводниковые источники излучения востребованы и для прикладных, и для фундаментальных приложений. Большой интерес представляют источники на основе полупроводниковых материалов, рассчитанные на диапазон длин волн 3—5 мкм. Данный диапазон является одним из окон прозрачности атмосферы, на который приходится большое число спектральных линий таких газов, как CO, CO₂, CH₄, HCl и др. Потребность в таких источниках, помимо мониторинга окружающей среды, также связана с проведением различных химических анализов и с медицинскими приложениями [1, 2].

Несомненные лидеры по рабочим характеристикам, температурному и частотному диапазону на сегодняшний день — квантово-каскадные лазеры (ККЛ) [3]. Несмотря на достигнутые характеристики в ККЛ, существует ряд ограничений, которые препятствуют их широкому распространению, например, высокая стоимость, жесткие требования к технологии роста, а также слабая температурная перестройка линии генерации (не более 1.0—2.5 мЭВ [4]).

LASER GENERATION OF Cd_xHg_{1-x}Te/Cd_yHg_{1-y}Te QUANTUM WELL HETEROSTRUCTURE WITH MICRODISK RESONATORS AT A WAVELENGTH OF 4.1—5.1 μm

A. A. Razova^{1,2}, V. V. Utochkin¹, M. A. Fadeev¹, V. V. Rumyantsev^{1,2}, A. A. Dubinov^{1,2*}, K. E. Kudryavtsev^{1,2}, D. V. Shengurov¹, E. E. Morozova¹, E. V. Skorohodov¹, N. N. Mikhailov³, S. A. Dvoretzky³, V. I. Gavrilenko^{1,2}, S. V. Morozov^{1,2} (¹ Institute for Physics of Microstructures of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia; ² Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia; e-mail: sanya@ipmras.ru; ³ Institute for Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia)

Альтернативой могут быть лазеры, основанные на межзонных оптических переходах, где в качестве материала могут выступать гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) на основе твердого раствора CdHgTe. В данных структурах за счет вариабельности параметров структуры (толщины КЯ и состава) можно получить ширину запрещенной зоны от сотен до нескольких единиц мэВ [5, 6]. В отличие от ККЛ в структурах CdHgTe можно осуществлять перестройку по длине волны с изменением температуры за счет изменения ширины запрещенной зоны в широком диапазоне, что делает их удобными для молекулярной диодной лазерной спектроскопии. Отметим, что на данный момент уже существуют лазеры на межзонных переходах на основе солей халькогенидов свинца [7], однако высокий уровень остаточного легирования ($>10^{17} \text{ см}^{-3}$) приводит к низким мощностным характеристикам и низким рабочим температурам лазеров такого типа.

Как известно, для получения лазерного излучения необходим резонатор. В “классических” полупроводниковых структурах групп A^3B^5 или A^2B^6 резонатор Фабри—Перо формируется путем скола граней структуры, благодаря чему образуются плоскопараллельные грани, играющие роль зеркал. Создание резонатора с помощью такого метода в структурах с КЯ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ невозможно из-за специфического направления роста (013). Поэтому рассматриваются альтернативные варианты, один из которых — создание микродискового резонатора. В полупроводниковых структурах ограничение света в вертикальном направлении (направлении роста структуры) может быть реализовано за счет различия показателей преломления полупроводниковых слоев гетероструктуры. В структурах с КЯ на основе CdHgTe ограничение для мод достигается за счет реализации диэлектрического волновода [8].

Микродисковые резонаторы могут обладать высокой добротностью, наивысшей добротностью в них обладают моды, которые распространяются по окружности резонатора с максимумом поля вблизи края, называемые модами шепчущей галереи. Кроме того, микродиски при определенных параметрах обеспечивают большое расстояние между соседними резонансными длинами волн и способствуют достижению одночастотной генерации [9].

В данной работе исследованы спектры фотолюминесценции (ФЛ) и лазерного излучения (ЛИ) гетероструктур с КЯ на основе CdHgTe с микродисковыми резонаторами. Проведено сравнение характеристик структуры с микродисковыми резонаторами с исходной непротравленной структурой, исследованной в [10].

Методика эксперимента. Исследуемая структура с толщиной КЯ $d = 2.7 \text{ нм}$ и концентрацией Cd в барьерах $y = 0.75$ и в КЯ $x = 0.08$ выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs (013) с буферным слоем ZnTe (30 нм) и релаксированным буфером CdTe (10 мкм) [11]. Активная область, представленная 13 квантовыми ямами, располагается в волноводном слое $\text{Cd}_{0.75}\text{Hg}_{0.25}\text{Te}$ толщиной 1.05 мкм. За счет изменения показателя преломления обеспечивается локализация TE_0 -моды излучения, частота которого соответствует ширине запрещенной зоны фундаментального перехода в КЯ. Затем проводилось травление структуры методом масочной литографии для формирования массива микродисковых резонаторов. Диски диаметром 10 и 40 мкм и высотой ~4 мкм расположены с шагом 500 мкм. На рис. 1 представлены сделанные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) SUPRA 50VP (Carl Zeiss) фотографии микродисков диаметрами 10 и 40 мкм.

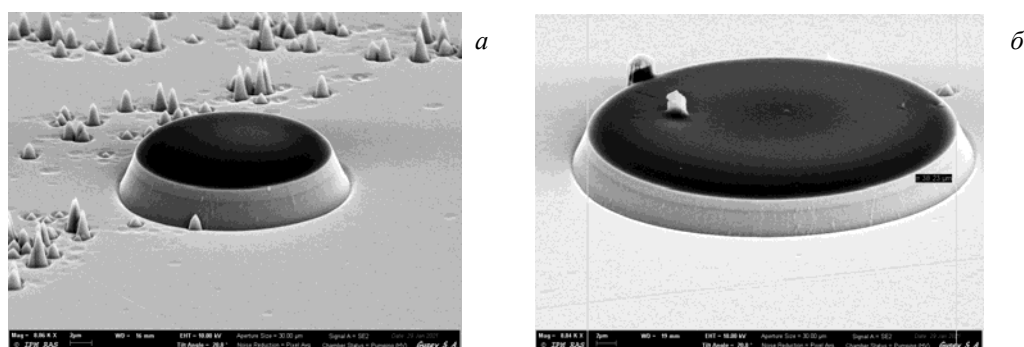


Рис. 1. СЭМ-изображение микродискового резонатора диаметрами 10 (а) и 40 мкм (б)

Исследования спектров ФЛ и ЛИ проводились с помощью Фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v в режиме пошагового сканирования. Образец устанавливался на хладопровод оптического гелиевого криостата замкнутого цикла с возможностью перестройки по температуре в диапазоне 8—300 К. Фурье-спектрометр оптически сопряжен с криостатом с помощью эллиптического зеркала. Излучение накачки направлялось под углом 45° к поверхности образца от параметрического импульсного генератора света компании Solar с длиной волны 1.7 или 2 мкм, длительностью импульса 10 нс, частотой повторения импульсов 10 Гц и максимальной интенсивностью до 1 МВт/см^2 . Мощность накачки варьировалась с помощью оптических аттенюаторов. Размеры пятна излучения накачки на поверхности образца больше размеров рассматриваемых структур. Детектором излучения служил CdHgTe-приемник Kolmar Technologies D317.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 приведены спектры ЛИ исследуемой структуры с массивом микродисков при температурах в диапазоне 9—270 К. Возбуждение излучения происходило при накачке с $\lambda = 2 \text{ мкм}$, регистрация спектра осуществлялась при разрешении 1 мэВ. Максимальная температура, при которой удалось получить генерацию ЛИ, для процессированной структуры 260 К. При более высоких температурах при любой плотности мощности возбуждающего излучения наблюдалась только ФЛ.

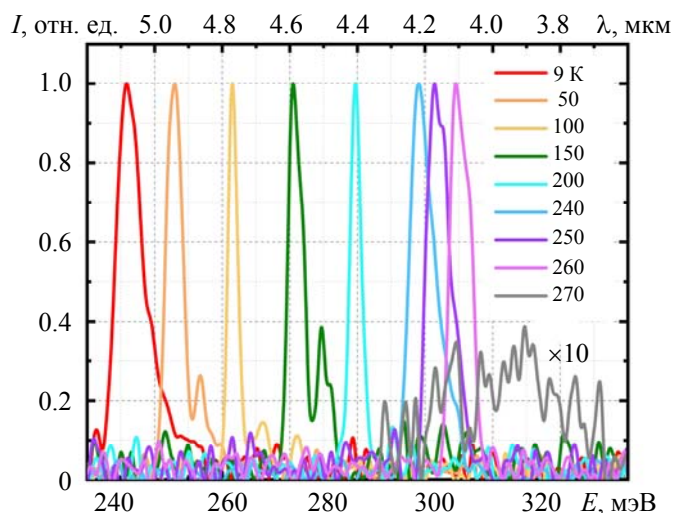


Рис. 2. Спектры лазерного излучения исследуемой структуры при различных температурах и спектр фотолюминесценции при 270 К при длине волны накачки 2 мкм

Основными признаками генерации ЛИ являются сужение в несколько раз спектра ФЛ, а также сверхлинейный рост интенсивности сигнала при повышении мощности возбуждаемого излучения. Ширина линии спектра ЛИ при $T = 260 \text{ К}$ на полувысоте составляет 4.6 мэВ, что практически в пять раз меньше, чем $k_B T$ при той же температуре (22.4 мэВ), где k_B — постоянная Больцмана. По нашему мнению, это свидетельствует в пользу работы резонатора. Также видно, что по мере увеличения температуры ширина спектров ЛИ уменьшается. Полагаем, это связано с тем, что на поверхности структуры располагаются диски разного диаметра. Чем больше диаметр диска, тем медленнее с температурой растет пороговая плотность мощности, необходимая для генерации ЛИ. В дисках меньшего диаметра больше излучательные потери [9], поэтому при небольших температурах вклад в спектр от микродисков всех диаметров практически одинаковый и его не удастся отделить при перестройке мощности падающего излучения накачки, в то время как при высоких температурах генерируют только диски большого диаметра.

Рассмотрим, каким образом расположение двух пиков на рис. 3 соотносится с межмодовым расстоянием. Для мод шепчущей галереи межмодовое расстояние определяется как

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (2\pi R n), \quad (1)$$

где λ — резонансная длина волны; R — радиус диска; n — показатель преломления в активной области [9]. В исследуемой структуре радиусы микродисков $R = 5$ и 20 мкм , $n = 2.8$ [12]. Тогда при 150 К

межмодовое расстояние должно составлять 0.233 мкм для диска с $R = 5$ и 0.058 мкм для диска с $R = 20$ мкм. Расстояние между рассматриваемыми пиками ~ 0.06 мкм, что близко к межмодовому расстоянию в микродисковом резонаторе с диаметром 40 мкм. С учетом разрешения, с которым зарегистрированы спектры ЛИ (рис. 3), можно предположить, что видны две моды шепчущей галереи микродисков диаметром 40 мкм. Более подробные исследования модового состава при селективном возбуждении дисков одного диаметра с высоким разрешением не дали дополнительной информации, по-видимому, из-за относительно большого неоднородного уширения линий, связанного с латеральной неоднородностью параметров КЯ, а также из-за невысокого отношения сигнал/шум при возбуждении малого числа резонаторов.

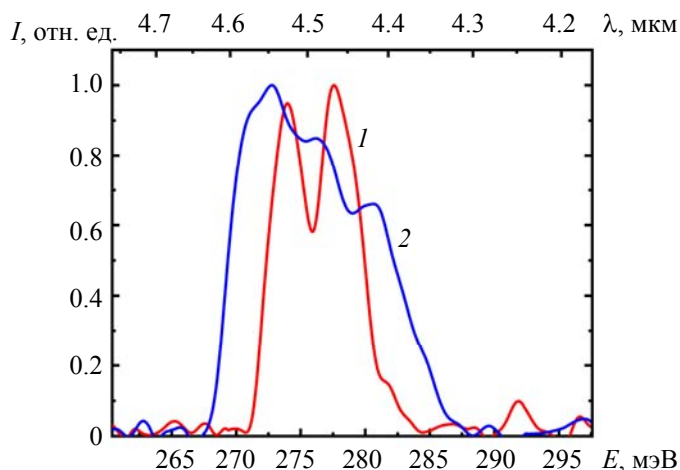


Рис. 3. Спектр лазерного излучения структуры при 150 К при средней мощности накачки 44 (1) и 600 мВт (2), длине волны накачки 1.7 мкм и разрешении 1 мэВ

Шероховатость границ микродисковых резонаторов по отношению к длине волны $\sim 1:100$. По сравнению с непроцессированной структурой [10] некоторые характеристики улучшаются. Так, максимальная температура наблюдения стимулированного излучения для исходной непроцессированной структуры ~ 230 К, что на 30 К меньше максимальной температуры наблюдения ЛИ в структуре с микродисками. Необходимая для генерации ЛИ плотность мощности накачки для структуры с микродисками практически на порядок меньше, чем для исходной структуры. Также наблюдается сужение линии спектров ЛИ структур с микрорезонаторами по сравнению с линиями спектров стимулированного излучения непроцессированной структуры. Все это в совокупности свидетельствует в пользу относительно высокой добротности спроектированных микродисковых резонаторов.

Обратим внимание на то, что в непроцессированной структуре минимальная длина волны генерации стимулированного излучения составляла 3.7 мкм при номинальной температуре 230 К, в то время как для структуры с микродисковыми резонаторами длина волны ЛИ 4.1 мкм при 260 К. Наблюдаемый “синий” сдвиг линии генерации в непроцессированной структуре можно было бы связать со сдвигом максимума усиления при повышении температуры неравновесных носителей заряда T_e из-за большего (на порядок) порога генерации, но согласно расчетам в рамках модели [13], изменение температуры неравновесных носителей заряда оказывает незначительное влияние на сдвиг максимума спектра усиления (рис. 4). Причиной такого сдвига может быть увеличение температуры образца за время импульса оптической накачки. Типичное время релаксации энергии в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ~ 10 нс [14]. Таким образом, при временах возбуждения ~ 10 нс необходимо учитывать возможный разогрев решетки, особенно при высоком уровне возбуждения. Если следовать такой логике, то положение максимума спектра усиления, определяемого разогревом кристаллической решетки до 350 К при концентрации неравновесных носителей заряда $N = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, показывает возможность такого сдвига в коротковолновую область спектра от 4.1 до 3.7 мкм (рис. 4).

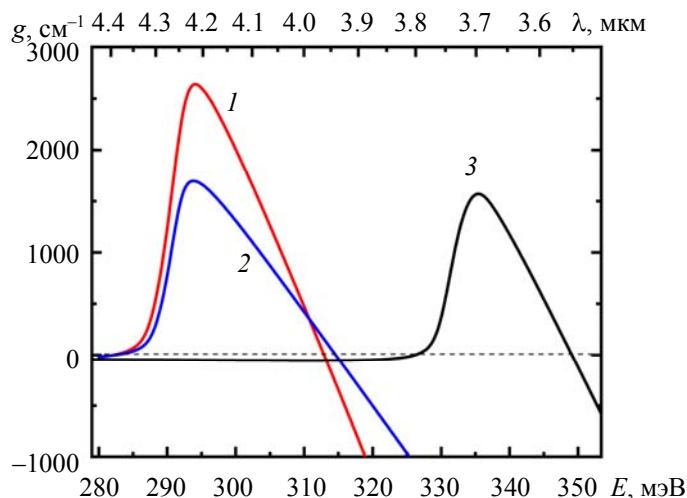


Рис. 4. Положение спектра усиления (g) исследуемой структуры при различных концентрациях неравновесных носителей заряда N , температурах измерения и неравновесных носителей заряда (T и T_e): 1 — $T = T_e = 240$ К, $N = 6 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$; 2 — $T = 240$ К, $T_e = 450$ К, $N = 10^{12}$ см $^{-2}$; 3 — $T = T_e = 350$ К, $N = 8 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$

Таким образом, связанные с формированием резонаторов технологические процессы не приводят к деградации оптических свойств структур, а наоборот, улучшают характеристики. Несомненно, для детального исследования добротности получаемых резонаторов и их модового состава в дальнейшем необходимо изучение структур с одиночными микродисковыми резонаторами. На основе полученных данных можно утверждать, что формирование микродисковых резонаторов способствует повышению максимальной температуры наблюдения ЛИ и тем самым показывает возможность создания лазерных источников при термоэлектрическом охлаждении в области длин волн 3—5 мкм. Отметим, что длина волны излучения для исследуемой структуры 4.1 мкм при 260 К, а при понижении до температуры жидкого азота ~5 мкм. Это свидетельствует о том, что при криогенном охлаждении существует возможность перестройки длины волны от 4 до 5 мкм, что важно для молекулярной диодной лазерной спектроскопии.

Заключение. Продемонстрирована генерация лазерного излучения при 260 К на длине волны 4.1 мкм в гетероструктуре с квантовыми ямами $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ с микродисковыми резонаторами. Сравнение исследуемой структуры с непроцессированной показало, что методика травления методом масочной литографии может быть использована для создания микродисковых резонаторов на основе гетероструктур CdHgTe с квантовыми ямами с высокой добротностью. Наличие резонатора способствует повышению максимальной температуры наблюдения лазерного излучения, понижению пороговой мощности накачки и сужению линий генерации по сравнению с результатами для непроцессированной структуры. Первые практические результаты в данном направлении подтверждают, что диапазон длин волн 3—5 мкм может быть охвачен лазерами на межзонных переходах на основе CdHgTe -структур с квантовыми ямами при термоэлектрическом охлаждении.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00310).

- [1] F. K. Tittel, R. Lewicki, M. Jahjah, B. Foxworth, Y. Ma, L. Dong, R. Griffin, K. Krzempek, Pr. Stefanski, J. Tarka. In: Terahertz and Mid Infrared Radiation: Detection of Explosives and CBRN, Using Terahertz, Springer, Netherlands (2014) 153—165
- [2] J. Haas, B. Mizaikoff. Annu. Rev. Anal. Chem., **9** (2016) 45—68
- [3] Yu Yao, A. J. Hoffman, C. F. Gmachl. Nat. Photon., **6** (2012) 432—439
- [4] A. Hugi, R. Maulini, J. Faist. Semicond. Sci. Technol., **25** (2010) 083001
- [5] A. Rogalski. Rep. Progress Phys., **68**, N 10 (2005) 2267—2336
- [6] B. A. Bernevig, T. L. Hughes, S.-C. Zhang. Science, **314** (5806) (2006) 1757—1761

-
- [7] **К. В. Маремьянин, В. В. Румянцев, А. В. Иконников, Л. С. Бовкун, Е. Г. Чижевский, И. И. Засавицкий, В. И. Гавриленко.** ФТП, **50**, N 12 (2016) 1697—1700
- [8] **S. V. Morozov, V. V. Romyantsev, A. M. Kadykov, A. A. Dubinov, K. E. Kudryavtsev, A. V. Antonov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretiskii, V. I. Gavrilenko.** Appl. Phys. Lett., **108**, N 9 (2016) 092104
- [9] **М. Л. Городецкий.** Основы теории оптических микрорезонаторов, Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова (2010)
- [10] **К. Е. Kudryavtsev, V. V. Romyantsev, V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, V. V. Utochkin, M. A. Fadeev, N. N. Mikhailov, G. Alymov, D. Svintsov, V. I. Gavrilenko, S. V. Morozov.** Appl. Phys. Lett., **117** (2020) 083103
- [11] **S. Dvoretisky, N. Mikhailov, Yu. Sidorov, V. Shvets, S. Danilov, B. Wittman, S. Ganichev.** J. Electron. Mat., **39**, N 7 (2010) 918
- [12] **Z. Kucera.** Phys. Status Solidi (a), **100** (1987) 659
- [13] **V. Ya. Aleshkin, A. A. Dubinov, V. V. Romyantsev, M. A. Fadeev, O. L. Domnina, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretisky, F. Teppe, V. I. Gavrilenko, S. V. Morozov.** J. Phys.: Cond. Matter, **30** (2018) 495301
- [14] **J. Chu, A. Sher.** Physics and Properties of Narrow Gap Semiconductors, New York, Springer (2008)