

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИСКОВОГО ЛАЗЕРА НА ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ CdS/ZnSe/ZnSSe С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ

М. Р. Бутаев¹, В. И. Козловский^{1,2}, Я. К. Скасырский¹, Н. Р. Юнусова²

Методом парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений получена гетероструктура с резонансно-периодическим усилением, содержащая 8 квантовых ям ZnSe/CdS/ZnSe с разрывами зон II-ого типа. На основе данной структуры реализован полупроводниковый дисковый лазер с продольной накачкой излучением лазерного диода с длиной волны 430 нм. Использовался составной резонатор, включающий микрорезонатор и внешнее зеркало обратной связи. Исследовались характеристики лазера от длины резонатора. В случае резонатора, близкого к полуконцентрическому, получена импульсная мощность 57 мВт на длине волны 521 нм при дифференциальном КПД 1.5% с углом расходимости примерно 10°. Расходимость излучения уменьшалась до 5 мрад при использовании полуконфокального резонатора. Однако мощность лазера существенно падала из-за высокого порога генерации. Обсуждаются пути улучшения характеристик лазера.

Ключевые слова: полупроводниковый дисковый лазер, парофазная эпитаксия, гетероструктура CdS/ZnSe, микрорезонатор, оптическая накачка лазерным диодом.

1. *Введение.* Интенсивное развитие полупроводниковых дисковых лазеров (ПДЛ) с оптической накачкой лазерными диодами связано с их способностью генерировать мощное излучение при высоком качестве пучка с высокой эффективностью [1]. В настоящее время в ПДЛ в основном используются гетероструктуры на основе соединений A_3B_5 , излучающие в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. Для перехода

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kozlovskiyvi@lebedev.ru.

² НИЯИ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

в средний ультрафиолетовый (УФ) диапазон (220–280 нм), который востребован для многих применений, необходимо использовать третью или четвертую гармонику ПДЛ на основе гетероструктур A_3B_5 , что значительно снижает эффективность лазерной системы в целом [2, 3]. В связи с этим актуальной является разработка ПДЛ, излучающих в сине-зеленом диапазоне спектра, с перспективой реализации внутри резонатора этих лазеров второй гармоники, соответствующей среднему ультрафиолетовому диапазону.

Для сине-зеленого диапазона излучения подходят гетероструктуры соединений A_2B_6 . В отличие от InGaN/GaN гетероструктуры соединений A_2B_6 могут быть относительно легко отделены от ростовой подложки, которым обычно является GaAs, поскольку существуют селективные травители для GaAs. Это позволяет решить проблему встроенного брэгговского зеркала, сформировав резонатор двумя внешними зеркалами [4].

В работах [5–8] мы исследовали возможность использования гетероструктуры с 8–10 квантовыми ямами (КЯ) CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон II-ого типа и резонансно-периодическим усилением в полупроводниковых лазерах для зеленой области спектра. Предполагалось, что такая гетероструктура, в отличие от ранее изученной ZnCdSe/ZnSSe [9], менее восприимчива к твердофазной диффузии при температурах эпитаксиального роста и интенсивному возбуждению из-за более сильных химических связей серы в КЯ. Взаимная диффузия атомов Cd и Zn снижается при отсутствии вакансий металла. Для этого рост надо проводить при небольшом избытке металла, что трудно осуществить при формировании КЯ из твердых растворов ZnCdSe.

На основе гетероструктуры с двойными КЯ CdS/ZnSe/CdS/ZnSe/ZnSSe нами впервые был реализован полупроводниковый дисковый лазер с продольной оптической накачкой импульсным N_2 -лазером [6]. Из-за короткого импульса накачки длительность лазерного импульса составляла всего 3 нс, и лазер работал только при длине резонатора, равной примерно 1 мм. Кроме того, порог генерации был слишком высоким – 35 Вт, что не позволяло надеяться на реализацию непрерывного режима генерации. В данной работе мы исследуем лазер на аналогичной гетероструктуре с 8 одиночными КЯ CdS/ZnSe/ZnSSe при продольной оптической накачке излучением лазерного диода на основе структуры InGaN/GaN. Для снижения порога генерации мы использовали составной резонатор, включающий микрорезонатор и внешнее зеркало обратной связи.

2. Эксперимент. Выращивание гетероструктур CdS/ZnSe/ZnSSe производилось методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений в потоке водорода при атмосферном давлении в кварцевом реакторе. Дизайн исследуемых гетерострук-

тур схематически представлен на рис. 1(а). Рост проводился на подложках GaAs, разориентированных от плоскости (001) на 10° к плоскости (111)А. Разориентация, с одной стороны, позволяла достигнуть меньшую шереховатость ростовой поверхности, а, с другой стороны, обеспечивала устойчивую линейную поляризацию излучения лазера.

Для изготовления активного элемента лазера с микрорезонатором на структуру наносилось первое диэлектрическое зеркало из 12 пар чередующихся четвертьволновых слоев SiO_2 и HfO_2 . Этим зеркалом структура приклеивалась к сапфировой подложке толщиной 5 мм оптическим эпоксидным клеем ЕРОТЕК-301. Далее ростовая подложка GaAs удалялась сначала шлифовкой, а затем селективным травлением, и на свободную поверхность структуры наносилось второе диэлектрическое зеркало. На часть структуры наносилось 11.5 пар чередующихся четвертьволновых слоев SiO_2 и Ta_2O_5 , на другую часть – 12 пар этих слоев. Также на структуре имелась область без второго зеркала. Спектры пропускания зеркал измерялись по контрольному стеклу. По полученным спектрам мы рассчитали коэффициент пропускания зеркал для плоской волны, падающей из структуры. Для длины волны 525 нм коэффициент отражения первого зеркала был равен 99.7%. У второго зеркала (12 пар), заканчивающегося слоем Ta_2O_5 , коэффициент отражения был 99.85%. В отсутствие верхнего слоя Ta_2O_5 коэффициент отражения уменьшался до 99.47%. Пропускание зеркал на длине волны лазера накачки 430 нм было примерно 73%.

Оптическая схема лазера представлена на рис. 1(б). Структура с микрорезонатором возбуждалась под углом 40° через сапфир и первое зеркало излучением коммерческого лазерного диода (ЛД) на основе гетероструктуры InGaN/GaN с длиной волны вблизи

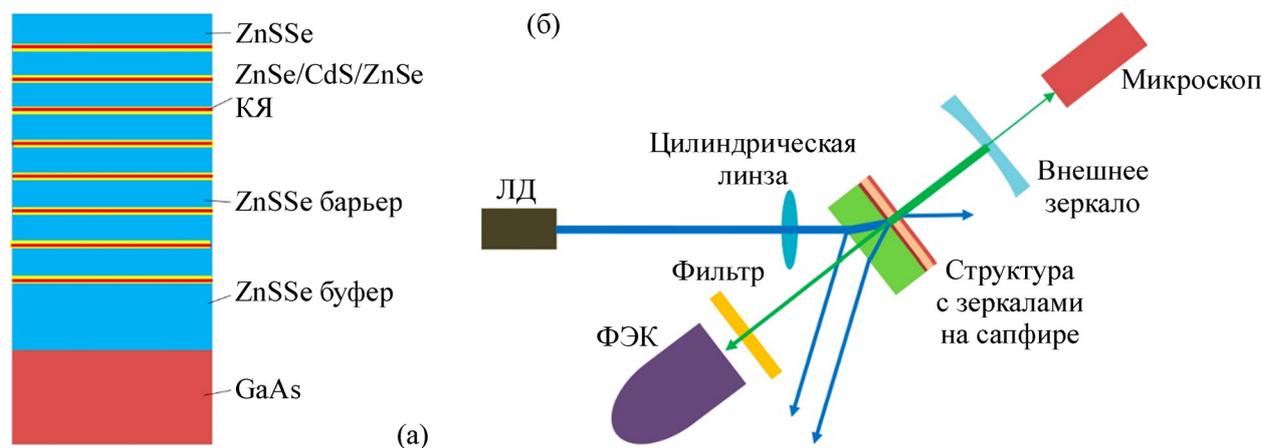


Рис. 1: Используемая структура (а) и оптическая схема лазера (б).

430 нм. Со стороны второго зеркала микрорезонатора помещалось внешнее зеркало с радиусом кривизны $r = 15$ мм. Коэффициент отражения внешнего зеркала на длине волны 525 нм был больше 99.8%. ЛД имел встроенную сферическую линзу, с помощью которой можно было получить изображение излучающего полоска на расстоянии примерно 150 мм. Для фокусировки излучения в пятно с размерами примерно 70×50 мкм перед плоскостью изображения полоска ставилась цилиндрическая линза на фокусном расстоянии 15 мм.

Максимальная мощность ЛД в непрерывном режиме не превышала 5 Вт. Однако, чтобы избежать перегрева структуры, ЛД был запущен в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса примерно 150 нс и частотой повторения 30 Гц. Пиковая мощность достигала 10 Вт. Излучение регистрировалось калиброванным фотоэлементом коаксиальным ФЭК-22. При измерении мощности лазера перед фотоэлементом ставился фильтр ЖС-17, пропускающий 84% излучения на длине волны 525 нм и менее 0.1% на длине волны 430 нм излучения накачки. Для измерения расходимости излучения вместо фотоэлемента ставилась цифровая камера (Canon) без объектива. Ближняя зона лазера фотографировалась этой же камерой через микрообъектив. Спектр лазера регистрировался с помощью спектрографа S-100 (Solar Laser Systems) с волоконным входом. Юстировка лазера осуществлялась с помощью микроскопа типа МБС-9 путем совмещения пятна излучения и пятна отражения от внешнего зеркала и второго зеркала на поверхности структуры.

Излучение ЛД частично проходило через активный элемент, не поглощаясь в нем. Эти потери оцениваются величиной 10%. Примерно 28% падающего излучения накачки отражалось от структуры. Излучение лазера в основном выходило через сапфировую подложку.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение. На структуре без второго зеркала лазерную генерацию получить не удалось. Ранее при использовании микрорезонатора со вторым зеркалом из 12 пар слоев и без внешнего зеркала была получена устойчивая генерация с импульсной мощностью до 0.33 Вт на длине волны вблизи 525 нм при дифференциальном КПД до 10% [10]. Использовалась другая геометрия накачки. Однако при использовании второго зеркала из 11.5 пар слоев генерация в микрорезонаторе не достигалась, поскольку потери на зеркалах были заметно больше. Далее мы исследовали лазер с составным резонатором, включающим микрорезонатор со вторым зеркалом из 11.5 пар слоев и внешнее зеркало.

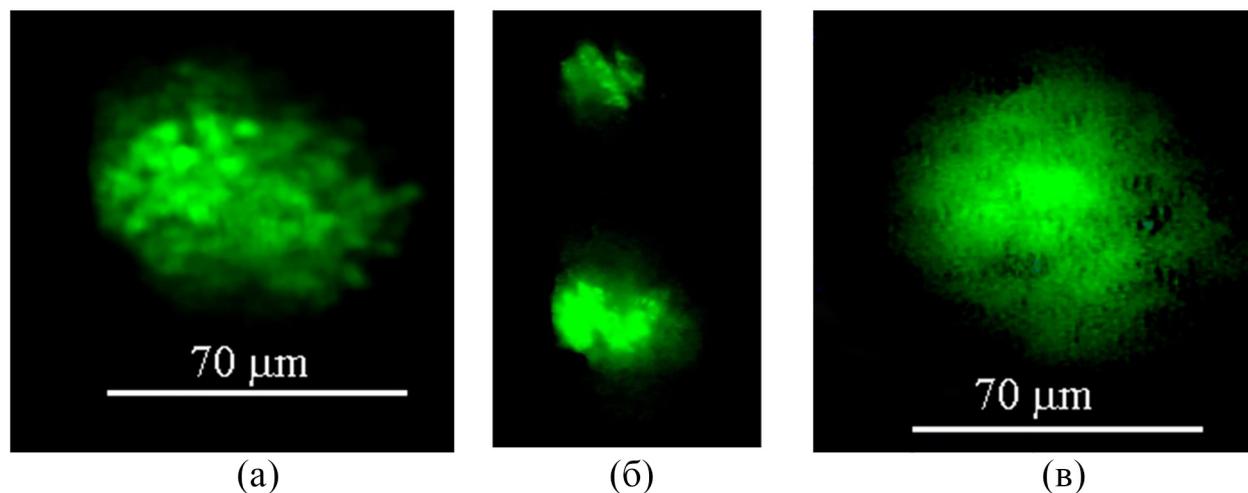


Рис. 2: Картина ближней зоны лазера с полуконцентрическим резонатором ((а), (б)) при совмещении пятен излучения и отражения (а), при разъюстировке резонатора (б), и с полуконфокальным резонатором (в).

3.1. Полуконцентрический резонатор. Сначала мы использовали резонатор, близкий к полуконцентрическому, когда длина резонатора $L_c \approx r$. В этом случае ближняя зона лазера, представленная на рис. 2(а), состоит из множества точек. Это связано с тем, что в полуконцентрическом резонаторе поперечные размеры основной моды существенно меньше пятна возбуждения, в результате чего генерируются много поперечных мод. Генерация наблюдается даже при разъюстировке резонатора, когда пятно излучения и пятно, отраженное от внешнего зеркала, не совпадают на поверхности структуры (см. рис. 2(б)). Структура этих пятен одинакова, поскольку в полуконцентрическом резонаторе они являются изображением друг друга. Тем не менее мощность лазера увеличивается при хорошо съюстированном резонаторе.

На рис. 3(а) показана характерная картина дальней зоны генерации при использовании полуконцентрического резонатора, сфотографированная за один импульс. Полный угол расходимости лазера составлял примерно 10° . Структура дальнего поля также связана с поперечной многомодовостью излучения.

Спектр генерации лазера представлен на рис. 4(а). Максимум линии находится вблизи 521 нм, а ширина линии на полувысоте составляет 1.1 нм, что соответствует разрешению спектрального прибора. На спектре видна также линия рассеянного излучения накачки ЛД.

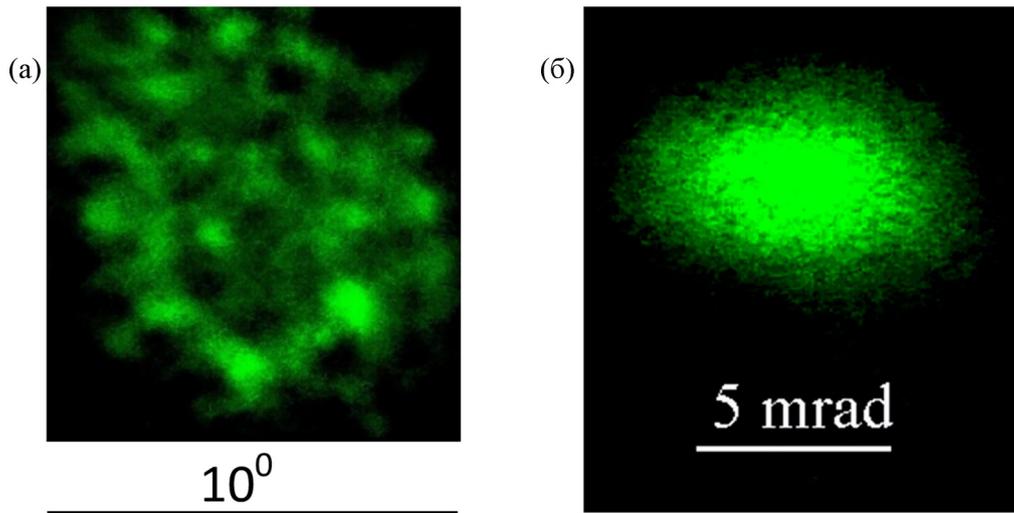


Рис. 3: Картина дальнего поля лазера при использовании полуконцентрического (а) и полуконфокального резонатора (б).

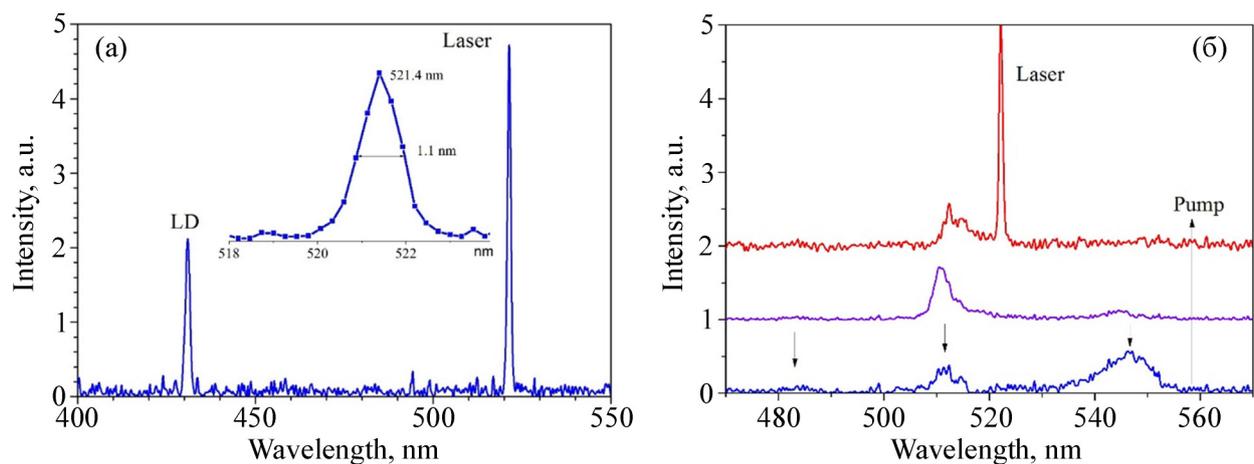


Рис. 4: Спектр излучения лазера с полуконцентрическим резонатором и ЛД (а) (на вставке спектр лазера подробно) и лазера с полуконфокальным резонатором при разных уровнях накачки: 5 кВт/см^2 , 50 кВт/см^2 и 170 кВт/см^2 (б). Стрелками указаны моды микрорезонатора.

Осциллограммы импульса лазера и накачки представлены на рис. 5(а). Длительность лазера по основанию составляет 100 нс. Зависимость пиковой мощности импульса излучения лазера от поглощенной в активном элементе мощности накачки представлена на рис. 6(а). Максимальная пиковая мощность лазера составила 57 мВт. Порог генера-

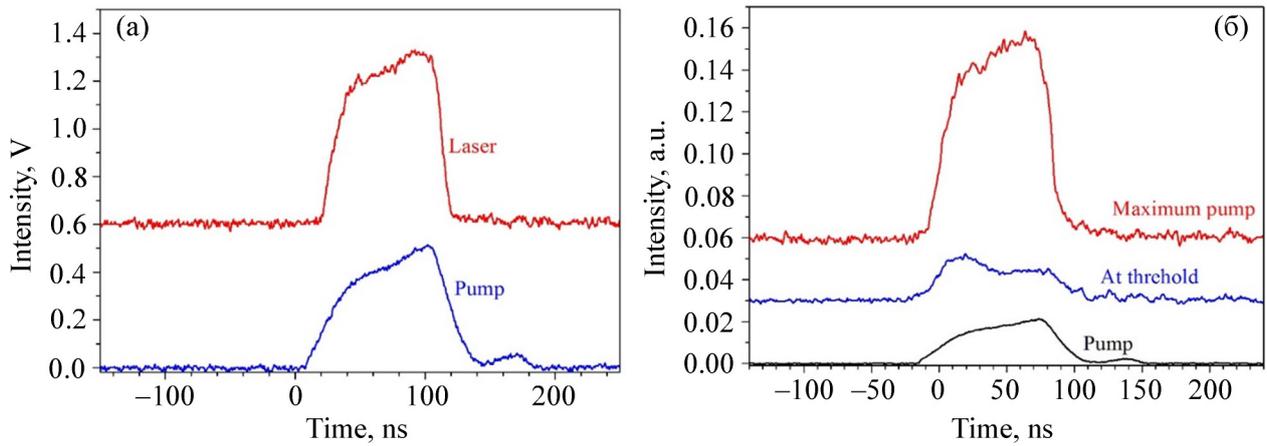


Рис. 5: Осциллограммы импульсов лазера с полуконцентрическим (а) и полуконфокальным (б) резонатором и ЛД-накачки.

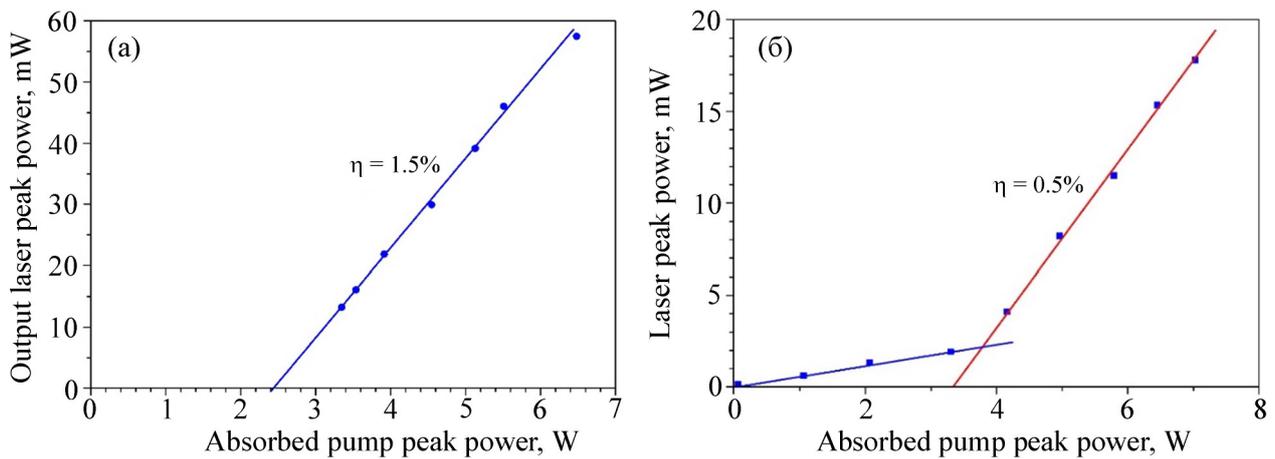


Рис. 6: Зависимость пиковой мощности импульса излучения лазера от падающей мощности накачки при использовании полуконцентрического (а) и полуконфокального резонатора (б).

ции по спрямлению полученных данных в зависимости мощности лазера от мощности накачки был равен 2.4 Вт. Дифференциальная эффективность преобразования мощности накачки в мощность лазера составила примерно 1.5%. Пороговая интенсивность накачки оценивается величиной 68 кВт/см².

3.2. Полуконфокальный резонатор. Картина ближней зоны в данном случае (см. рис. 2(в)) имеет в основном одно крупное пятно. На картине видны также спеклы, связанные с интерференцией выходного пучка с отражениями на поверхностях саффи-

ра. Расчетное значение диаметра основной моды по уровню интенсивности e^{-1} равно примерно 40 мкм, что по-прежнему меньше диаметра области возбуждения. Поэтому могут возбуждаться несколько поперечных мод. Угол расходимости в конфокальном резонаторе существенно уменьшается (см. рис. 3(б)) и составляет примерно 5 мрад, что сравнимо с дифракционным пределом.

На рис. 5(б) представлены осциллограммы импульсов генерации вблизи порога и при максимальном превышении над порогом. Генерация возникает на переднем фронте импульса накачки, а при высоком превышении порога заполняет весь импульс накачки. Отметим, что уровень спонтанного излучения лишь примерно в 10 раз меньше, чем мощность лазера при максимальной накачке. Это связано с тем, что большая доля излучения ниже порога, выходящего из полуконфокального резонатора, имеет хорошую направленность и захватывается входной апертурой фотоэлемента. В случае полуконцентрического резонатора фотоэлемент захватывает лишь небольшую часть спонтанного излучения, которое не имеет выраженной направленности.

На рис. 6(б) представлена зависимость выходной мощности лазера от мощности накачки. Порог генерации соответствует примерно 3.8 Вт. Дифференциальный КПД составил 0.5%. На рис. 4(б) представлены спектры излучения лазера ниже и выше порога генерации. Интенсивность накачки в данном случае уменьшалась путем увеличения пятна возбуждения. Короткими стрелками показаны спектральные максимумы, которые мы связываем с модами микрорезонатора. С увеличением уровня накачки спектр излучения гетероструктуры смещается в коротковолновую сторону [5, 10]. Поэтому при малом уровне накачки излучение выходит в основном через моду микрорезонатора с максимумом при 547 нм. С увеличением уровня накачки возрастает интенсивность следующей более коротковолновой моды с максимумом при 512 нм. Линия генерации возникает на длине волны 522 нм, на длинноволновом спаде моды с $\lambda = 512$ нм. Мы предполагаем, это связано с тем, что период структуры, определяющий длину волны (522 нм), на которой достигается резонансно-периодическое усиление на одной из мод составного резонатора, не совпадает с модой микрорезонатора. При резонансно-периодическом усилении ширина линии примерно обратно пропорциональна числу КЯ. Поэтому коэффициент усиления на моде микрорезонатора при сильном рассогласовании может быть заметно меньше.

В лазерах с микрорезонатором важным фактором, влияющим на порог генерации, является фактор связи спонтанного излучения с лазерной модой β [11]. Случай, когда $\beta = 1$ соответствует беспороговому лазеру. В микрорезонаторе β уменьшается с уве-

личением рассогласования спектральных максимумов линии излучения и моды микрорезонатора [11]. В составном резонаторе в допороговом режиме в качестве линии излучения можно рассматривать излучение моды микрорезонатора. Тогда разумно предположить, что при совмещении моды микрорезонатора с длиной волны, при которой достигается резонансно-периодическое усиление, порог генерации должен уменьшаться. Основываясь на данных рассуждениях, мы надеемся существенно улучшить характеристики ПДЛ путем дальнейшей оптимизацией параметров структуры и резонатора.

4. *Заключение.* В данной работе впервые реализован импульсный ПДЛ на основе наноразмерной гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон второго II-типа при продольной накачке излучением ЛД с длиной волны 430 нм. Использовался составной резонатор, включающий микрорезонатор и внешнее зеркало обратной связи. При использовании внешнего резонатора, близкого к полуконцентрическому, достигнута импульсная мощность 57 мВт на длине волны 521 нм при дифференциальном КПД в 1.5%. В случае полуконфокального резонатора полный угол расходимости излучения составлял 5 мрад. Относительно низкие энергетические характеристики лазера связываются с рассогласованием длины волны резонансно-периодического усиления с модой микрорезонатора. Представленные результаты показывают перспективность использования гетероструктур CdS/ZnSe в ПДЛ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грантом № 20-32-90022.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. E. Hastie, S. Calvez, M. D. Dawson, Woodhead Publishing Limited **9**, 341 (2013). DOI: 10.1533/9780857096401.2.341.
- [2] Shu Qi-Ze, L. Caprara Andrea, Jill D. Berger, et al., Proc. SPIE **7193**, 719319 (2009). DOI: 10.1117/12.816073.
- [3] Rodriguez-Garcia Julio M., Paboeuf David, Hastie Jennifer E. Tunable, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics **23**(6), 5100608 (2017). DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2696882.
- [4] Hoy-My Phung, Hermann Kahle, Jussi-Pekka Penttinen, et al., Optics Letters **45**, 547 (2020). DOI: 10.1364/OL.382377.
- [5] М. Р. Бутаев, В. И. Козловский, Я. К. Скасырский, Квантовая электроника **50**(7), 683 (2020). DOI: 10.1070/QEL17245.

- [6] М. Р. Бутаев, В. И. Козловский, Я. К. Скасырский, *Квантовая электроника* **50**(10), 895 (2020). DOI: 10.1070/QEL17387.
- [7] М. Р. Бутаев, В. И. Козловский, Я. К. Скасырский, *Квантовая электроника* **52**(4), 359 (2022). DOI: 10.1070/QEL18016.
- [8] M. R. Butaev, V. I. Kozlovsky, V. P. Martovitsky, et al., *Journal of Alloys and Compounds* **880**, 160555 (2021). DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.160555.
- [9] S. V. Ivanov, S. V. Sorokin, I. V. Sedova, *Molecular Beam Epitaxy of Wide Gap II-VI Laser Heterostructures*, in “Molecular Beam Epitaxy” (2018 Elsevier Inc.). DOI: 10.1016/B978-0-12-812136-8.00027-X.
- [10] M. R. Butaev, V. I. Kozlovsky, Y. K. Skasyrsky, *Optics and Laser Technology* **158**, 108890 (2023). DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108890.
- [11] P. Kelkar, A. V. Nurmikko, C.-C. Chu, et al., *J. Cryst. Growth* **184/185**, 745 (1998). DOI: 10.1016/S0022-0248(97)00751-3.

Поступила в редакцию 11 ноября 2022 г.

После доработки 10 января 2023 г.

Принята к публикации 11 января 2023 г.