

УДК 621.373.826

НЕПРЕРЫВНЫЙ ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ С НАКАЧКОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ДИСКОВЫМ ЛАЗЕРОМ

В. И. Козловский¹, Ю. В. Коростелин¹, О. Г. Охотников²,
Ю. П. Подмарьков^{1,3}, Ю. М. Попов¹, Ю. Раутиайнен²,
Я. К. Скасырский¹, М. П. Фролов^{1,3}

При оптической накачке полупроводниковым дисковым лазером с длиной волны 1.98 мкм в $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазере на длине волны 2.6 мкм была достигнута выходная мощность 0.85 Вт с дифференциальным КПД по поглощенной мощности накачки 55.4%.

Ключевые слова: полупроводниковый дисковый лазер, $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазер, лазеры ИК диапазона, твердотельные лазеры, перестраиваемые лазеры, кристаллы A_2B_6 .

Перестраиваемые лазеры на легированных переходными металлами кристаллах A_2B_6 [1–3] работают в ИК диапазоне 2–6 мкм, представляющем интерес для широкого круга практических применений в спектроскопии, медицине, контроле за состоянием окружающей среды и т.п. Ранее непрерывная лазерная генерация при комнатной температуре была продемонстрирована на легированных хромом кристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{CdMnTe}$. Лазеры на этих кристаллах имеют широкие области перестройки (~ 1 мкм) в диапазоне 1.9–3.6 мкм [4–11]. Среди них наиболее длинноволновым спектром генерации и наибольшей шириной области перестройки обладает лазер на кристалле $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ (2.26–3.61 мкм в импульсном [8] и 2.35–3.45 мкм в непрерывном режимах [9]). К настоящему времени на кристалле $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ в максимуме полосы усиления (2.6 мкм) получена непрерывная лазерная генерация мощностью до 1.7 Вт и достигнут дифференциальный КПД по поглощенной мощности накачки свыше 50% [12]. Однако в отличие от $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазеров, широко исследовавшихся

¹ ФИАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53, frolovmp@x4u.lebedev.ru.

² Optoelectronics Research Centre, Tampere University of Technology, P.O. Box 692 FIN-333101, Tampere, Finland.

³ Московский физико-технический институт, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

с применением различных источников накачки, для непрерывного $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера использовалась только накачка волоконным тулиевым лазером.

Для расширения возможностей применения непрерывного $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера в настоящей работе исследуются его энергетические характеристики в условиях оптической накачки полупроводниковым дисковым лазером (ПДЛ) [13, 14], излучающим на длине волны 1.98 мкм. Отличительная черта ПДЛ – большая выходная мощность в сочетании с высоким качеством пучка. В дополнение ко многим преимуществам, связанным с дисковой геометрией, например, значительно подавленному эффекту тепловой линзы, ПДЛ обладают дополнительным достоинством, присущим всем полупроводниковым лазерам – возможностью изменять в значительных пределах длину волны генерации при изменении состава активной среды. В частности, использование полупроводников на основе многокомпонентных соединений, содержащих сурьму, позволяет получать генерацию на длинах волн 2–4 мкм, идеально подходящих для накачки лазеров, работающих в среднем ИК диапазоне.

Используемый в данной работе ПДЛ хорошо подходит для накачки $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера. Сечение поглощения кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ на длине волны 1.98 мкм всего лишь на 5% меньше его максимального сечения поглощения, что обеспечивает близкое к максимально возможному поглощение накачки. Дифракционная расходимость пучка ПДЛ обеспечивает качественную фокусировку и позволяет работать с длинными кристаллами, что особенно важно для кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$, в котором существенную роль играют тепловые процессы, связанные с повышением температуры и возникновением тепловой линзы. Ранее в работе [15] была продемонстрирована перспективность применения ПДЛ в качестве источника накачки ИК лазеров. ПДЛ на основе $(\text{AlGaIn})(\text{AsSb})$ структуры использовался для накачки непрерывного $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера, в котором был достигнут дифференциальный КПД по поглощенной мощности накачки 48%.

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Близкий к полуконцентрическому резонатор $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера был образован плоским зеркалом \mathcal{Z}_1 , пропускавшим 93% излучения накачки и имевшим близкое к 100% отражение в диапазоне 2.4–3.4 мкм, и выходным сферическим ($R = 5$ см) зеркалом \mathcal{Z}_2 с пропусканием 14% на длине волны генерации (2.6 мкм) и 90% на длине волны накачки. Перемещение зеркала \mathcal{Z}_2 вдоль оси лазерного резонатора позволяло изменять длину резонатора для лучшего согласования областей накачки и генерации.

Лазерный активный элемент (АЭ) длиной 4.9 мм с поперечными размерами 1.5×5 мм был изготовлен из монокристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$, выращенного на монокристал-

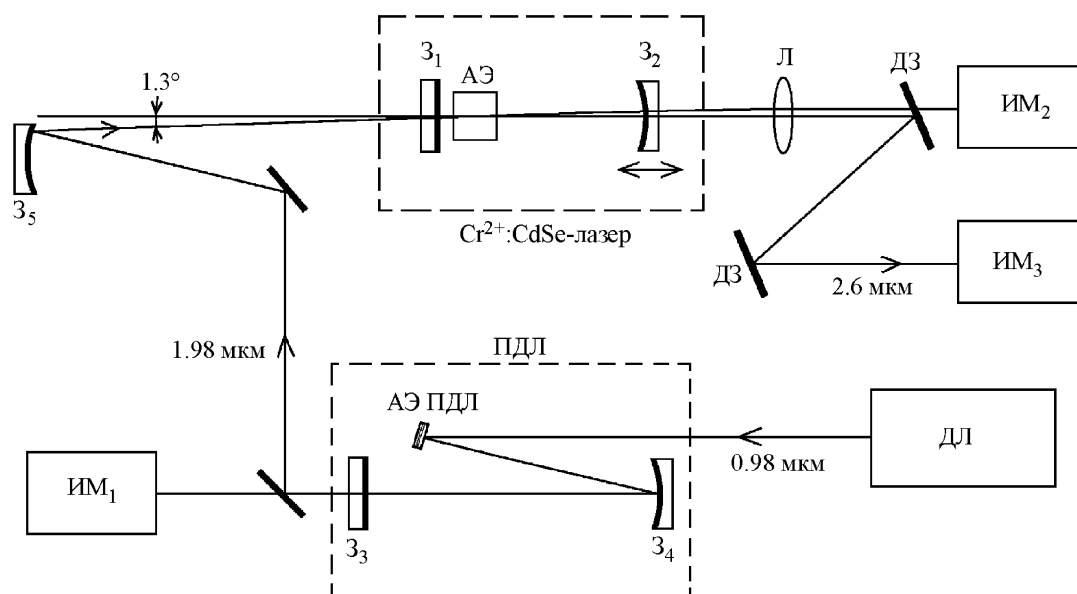


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: АЭ – активный элемент $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера; Z_1, Z_2 – зеркала резонатора $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера; АЭ ПДЛ – активный элемент полупроводникового дискового лазера; Z_3, Z_4 – выходное и поворотное зеркала резонатора ПДЛ, Z_5 – сферическое (30 см) фокусирующее зеркало; ДЗ – дихроичные зеркала с пропусканием 93% на длине волны накачки и отражением 99.7% на длине волны генерации, Л – коллимирующая линза, ДЛ – диодный лазер; ИМ₁, ИМ₂, – измерители мощности падающего и прошедшего излучения накачки, ИМ₃ – измеритель мощности излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера.

лической затравке физическим транспортом в гелии из паровой фазы с одновременным легированием в процессе роста по технологии, разработанной для выращивания монокристаллов твердых растворов [16, 17]. Для экспериментов был выбран кристалл $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ с концентрацией ионов Cr^{2+} , равной $1.1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, лазерные характеристики которого исследовались ранее в условиях накачки тулиевым волоконным лазером [12]. Рабочие поверхности АЭ не просветлялись, но были качественно отполированы и с хорошей точностью параллельны (клин $< 30''$). Кристалл имел гексагональную структуру. Направление оптической оси кристалла составляло угол 4° с нормалью к рабочим поверхностям АЭ. АЭ был закреплен на медном теплоотводе, охлаждаемым проточной водой с температурой 15°C . АЭ размещался вблизи зеркала Z_1 таким образом, чтобы расстояние между зеркалом Z_1 и ближайшей к нему гранью кристалла было 0.5 мм. Рабочие поверхности АЭ выставлялись перпендикулярно к оптической оси резонатора.

Активный элемент ПДЛ (АЭ ПДЛ), использованный в этой работе, был выращен на подложке из GaSb методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Активная среда, состоящая из 15 квантовых ям состава InGaAsSb, была сформирована на поверхности брэгговского зеркала, выращенного предварительно на подложке. Полупроводниковый брэгговский рефлектор состоял из 18 пар слоёв GaSb/AlAsSb и имел отражение $> 99.8\%$. Квантовые ямы активной среды были объединены в 5 групп из 3 ям, каждая из которых была локализована в соответствующей пучности стоячей волны поля моды для обеспечения максимального усиления. Наконец два прозрачных для лазерного излучения верхних слоя из AlAsSb и GaSb, выращенные последними, выполняют функции подстройки общей толщины структуры для позиционирования стоячей волны и защиты от окисления, соответственно. Алмазный теплоотвод толщиной 0.3 мм и размером 3×3 мм посажен на АЭ ПДЛ размером 2.5×2.5 мм с помощью деионизованной воды, технологией, известной как “water bonding”. Алмазный теплоотвод, используемый внутрирезонаторно для увеличения эффективности отвода тепла из АЭ ПДЛ, имел просветляющее диэлектрическое покрытие на длине волны генерации 1.98 мкм. Резонатор ПДЛ имел V-конфигурацию, сформированную АЭ ПДЛ, выходным плоским зеркалом Z_3 с пропусканием 2% и поворотным сферическим “глухим” зеркалом Z_4 с радиусом кривизны 20 см. Оптическая накачка осуществлялась на длине волны 0.980 мкм диодным лазером. Максимальная выходная мощность ПДЛ достигала 3.2 Вт с параметром качества пучка $M^2 < 1.2$.

В данной работе схема накачки $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера была аналогична схеме, использованной в работе [12]. Пучок ПДЛ через зеркало Z_1 фокусировался в АЭ сферическим ($R = 30$ см) зеркалом Z_5 в пятно диаметром 0.15 мм. Направление пучка накачки составляло небольшой угол (1.3°) с оптической осью резонатора $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера. При этом внутри кристалла пучок накачки имел угол с осью резонатора $< 30'$, что обеспечивало хорошее согласование объемов накачки и лазерной моды. В [12] использование такой схемы позволило исключить оптическую связь резонаторов лазера накачки и $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера и работать без оптической развязки.

В условиях наших экспериментов максимальная поглощенная АЭ мощность накачки не превышала 1.64 Вт при входной мощности источника накачки 3.05 Вт. Основные потери излучения накачки были связаны с отражением от входной грани непросветленного кристалла (18%), а также неполным поглощением излучения накачки (поглощение в условиях генерации составляло 71% и определялось из данных измерений мощности накачки, прошедшей через АЭ во время лазерной генерации).

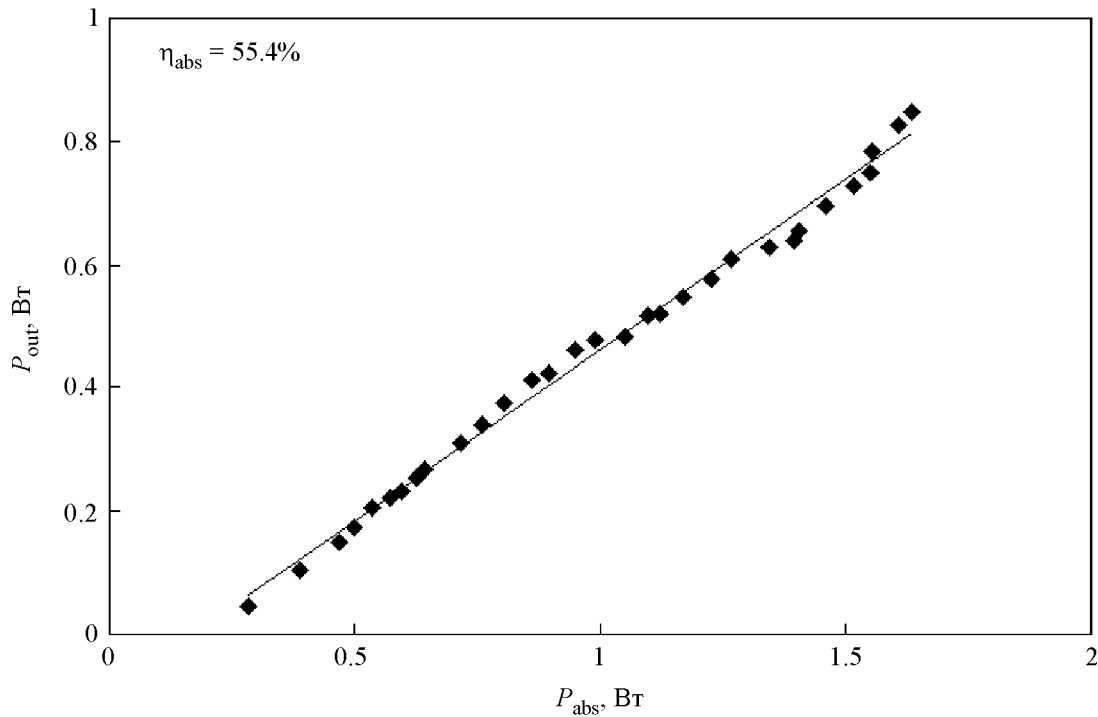


Рис. 2: Зависимость выходной мощности $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера от поглощенной мощности накачки P_{abs} .

На рис. 2 приведена зависимость выходной мощности $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера P_{out} от поглощенной мощности накачки P_{abs} . Дифференциальный КПД лазера η_{abs} , определенный по наклону проведенной через экспериментальные точки прямой, составил 55.4%, что слегка превышает КПД, полученный на этом образце с накачкой от волоконного лазера (53.4%) [12]. Пороговая поглощенная мощность накачки составила 0.17 Вт и была меньше значения пороговой мощности (0.27 Вт), полученного при накачке волоконным лазером [12], что объясняется меньшим размером пятна накачки. Максимальное значение $P_{out} = 0.85$ Вт, достигнутое при $P_{abs} = 1.64$ Вт, ограничивалось максимальной выходной мощностью ПДЛ.

Одним из достоинств ПДЛ являются сравнительно низкие релаксационные шумы и возможность работы без оптической развязки. В данной работе была испытана схема накачки с соосным расположением лазера накачки и $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера. В этом случае более 20% излучения накачки отражалось назад в направлении ПДЛ. Несмотря на это, ни модуляции излучения ПДЛ, ни увеличения шумов выходного излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера не наблюдалось. Для сравнения, при использовании в качестве источника накач-

ки тулиевого волоконного лазера наличие обратной связи менее 1% приводило к переходу волоконного лазера в режим модулированной добротности. Работа с ПДЛ без схем развязки ранее демонстрировалась также при накачке $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в [15], где также были оценены шумы выходного излучения (интенсивность шума была менее 0.14% от интенсивности сигнала в диапазоне частот 0.1–100 кГц). Важным преимуществом ПДЛ перед тулиевым лазером является также возможность модуляции интенсивности его излучения с частотой вплоть до 100 МГц за счет модуляции излучения накачки. В тулиевом лазере частота модуляции ограничена большим временем жизни верхнего лазерного уровня (~ 10 мс).

Таким образом, в данной работе была реализована накачка непрерывного $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера излучением мощного полупроводникового дискового лазера. Был достигнут дифференциальный КПД по поглощенной мощности накачки 55.4%, превышающий дифференциальный КПД, полученный ранее при накачке волоконным тулиевым лазером. Получена выходная мощность 0.85 Вт, которая может быть увеличена за счет снижения потерь в активном элементе, а также более эффективного использования излучения накачки, например, за счет увеличения длины лазерного кристалла или использования схемы с двукратным прохождением излучения накачки через АЭ. Потенциально компактный и недорогой, малошумящий и допускающий большую частоту модуляции ПДЛ может позволить создавать перестраиваемые источники среднего ИК диапазона с требуемыми для различных применений характеристиками.

Авторы выражают свою благодарность Соиле Суомалайнен и Йонне Паайасте за помощь с МЛЭ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] L. D. DeLoach, R. H. Page, G. D. Wilke, et al., *IEEE J. Quantum Electron.* **32**, 885 (1996).
- [2] I. T. Sorokina, *Opt. Mater.* **26**, 395 (2004).
- [3] S. Mirov, V. Fedorov, I. Moskalev, et al., *Laser Photonics Rev.* **4**, 21 (2010).
- [4] I. T. Sorokina, E. Sorokin, S. Mirov, et al., *Opt. Lett.* **27**, 1040 (2002).
- [5] I. Moskalev, S. Mirov, and V. Fedorov, *Optics Express* **17**, 2048 (2009).
- [6] U. Demirbas and A. Sennaroglu, *Opt. Lett.* **31**, 2293 (2006).
- [7] V. A. Akimov, M. P. Frolov, Y. V. Korostelin, et al., *Applied Physics B* **97**, 793 (2009).

- [8] В. А. Акимов, В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин и др., Квантовая электроника **38**, 205 (2008).
- [9] М. А. Губин, А. Н. Киреев, Ю. В. Коростелин и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(7), 34 (2011).
- [10] J. T. Seo, U. Hömmerich, S. B. Trivedi, Opt. Commun. **153**, 267 (1998).
- [11] S. B. Trivedi, S. W. Kutcher, C. C. Wang, et al., Electronic Mater. **30**, 728 (2001).
- [12] В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин, А. И. Ландман и др., Квантовая электроника **40**, 7 (2010).
- [13] O. G. Okhotnikov, (ed.). *Semiconductor disk lasers, physics and technology* (Weinheim, Wiley-VCH, 2010).
- [14] O. G. Okhotnikov, Квантовая электроника **38**, 1083 (2008).
- [15] N. Hempler, J.-M. Hopkins, B. Rosener, et al., Optics Express **17**, 18136 (2009).
- [16] Yu. V. Korostelin, V. I. Kozlovsky, A. S. Nasibov, and P. V. Shapkin, J. Crystal Growth **159**, 181 (1996).
- [17] Yu. V. Korostelin and V. I. Kozlovsky, Alloys Compounds **371**, 25 (2004).

Поступила в редакцию 15 мая 2012 г.