Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0408

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2014. № 12. С. 878–888.

DOI: **10.7463/1214.0738649**

Представлена в редакцию: 21.12.2014

УДК 621.373.826

Непрерывный твердотельный Cr^{2+}:CdSe лазер среднего ИК-диапазона с накачкой линейкой лазерных диодов

Тарабрин М. К.[1,2], Лазарев В. А.[1,*], Ковтун А. А.[1], Леонов С. О.[1], Карасик В. Е.[1], Подмарьков Ю. П.[2,3], Фролов М. П.[2,3], Киреев А. Н.[2], Губин М. А.[2,4]

[*] vladimir.al.lazarev@gmail.com

[1] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[2] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
[3] Московский физико-технический институт, Москва, Россия
[4] НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

В данной работе сообщается о непрерывной лазерной генерации в среднем ИК-диапазоне на кристалле Cr^{2+}:CdSe с линейкой лазерных диодов в качестве источника накачки. Проведен анализ существующих твердотельных лазеров среднего ИК-диапазона, отмечена актуальность создания лазера на кристалле Cr^{2+}:CdSe с диодной накачкой. Представлены основные данные о способе изготовления кристалла Cr^{2+}:CdSe, приведены его основные характеристики. Описан источник накачки на основе линейки лазерных диодов. Создана экспериментальная установка, позволяющая проводить измерения выходных характеристик лазера. Проведена оптимизация схемы лазера за счет использования набора фокусирующих линз и выходных сферических зеркал. Представлены характеристики лазера при оптимальных параметрах фокусирующей линзы и выходного сферического зеркала.

Ключевые слова: твердотельный лазер, средний ИК-диапазон, линейка лазерных диодов, кристалл Cr^{2+}:CdSe

Введение

Лазеры среднего ИК-диапазона на основе широкополосных твердотельных активных сред представляют большой интерес для обширного круга научных и практических задач. Перспективными областями применения таких лазеров являются дистанционное зондирование атмосферы, спектроскопия высокого разрешения [1–3] и высокочувствительные методы спектрального анализа [4, 5].

Кристаллы халькогенидов группы A_2B_6, легированные ионами Cr^{2+}, интенсивно исследуются с целью разработки на их основе перестраиваемых лазеров среднего ИК-диапазона (2-5 мкм) [6–8]. В настоящее время получена непрерывная генерация на этих кристаллах как с накачкой волоконными лазерами (Cr^{2+}:ZnSe [9], Cr^{2+}:CdSe [10, 11], и Cr^{2+}:CdS [12] – с накачкой тулиевым волоконным лазером и Cr^{2+}:ZnS [13] – с накачкой эрбиевым волоконным лазером), так и с InP лазерным диодом (Cr^{2+}:ZnSe и Cr^{2+}:ZnS [14]). Преимуществом использования в качестве источника накачки волоконных лазеров является качество пучка, характеризующееся высокой направленностью излучения. В то же время, когда необходимо получить компактную систему, которая при этом будет обладать высокими значениями выходной мощности и КПД, наиболее подходящим является вариант использования лазерных диодов.

В данной работе сообщается о непрерывной лазерной генерации на кристалле Cr^{2+}:CdSe с линейкой лазерных диодов в качестве источника накачки, а также об оптимизации схемы лазера за счет использования набора фокусирующих линз и выходных сферических зеркал, приводятся характеристики лазера при оптимальных параметрах.

Экспериментальная установка

Схема установки, включающей лазер на кристалле Cr^{2+}:CdSe и измеритель мощности, представлена на рисунке 1. Близкий к полуконцентрическому резонатор состоял из плоского и сферического зеркал. Плоское зеркало пропускало 96 % излучения накачки (длина волны 1940 нм) и имело близкое к 100 % отражение на длинах волн 2,4-3,4 мкм. В качестве источника накачки использовалась линейка лазерных диодов с длиной волны 1940 нм и максимальной выходной мощностью 3,5 Вт. Излучение линейки лазерных диодов проходило по волоконному световоду и преобразовывалось коллиматором в параллельный пучок, который затем фокусировался объективом в кристалл Cr^{2+}:CdSe.

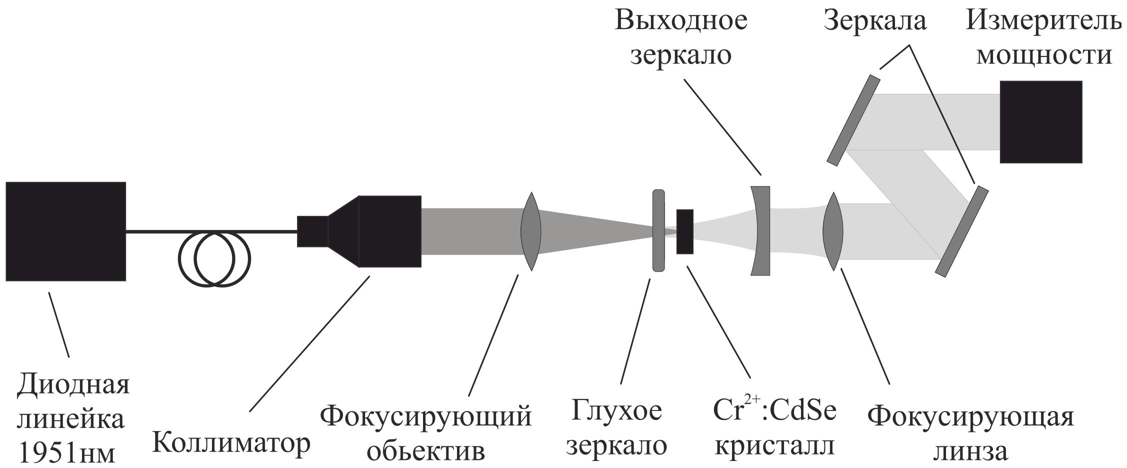

Рис. 1. Структурно-функциональная схема установки

Активный элемент (АЭ) лазера был изготовлен из монокристалла Cr^{2+}:CdSe, выращенного из паровой фазы на монокристаллической затравке с использованием физического транспорта в гелии. Легирование проводилось непосредственно в процессе роста по технологии, разработанной для выращивания монокристаллов твердых растворов [15]. Концентрация ионов Cr^{2+}, определенная из спектров поглощения, составляла $1{,}1\times10^{18}$ см$^{-3}$. Основные спектроскопические свойства кристалла приведены в табл.1, в которой представлены параметры сечения поглощения и излучения, длины волн максимума спектральной характеристики поглощения и излучения, а также их ширины.

Таблица 1. Спектроскопические характеристики кристалла Cr^{2+}:CdSe [16]

Люминесценция		**Поглощение**	
$\sigma_{люм}$, см^2	$2\cdot10^{-18}$	$\sigma_{пог}$, см^2	$1{,}94\cdot10^{-18}$
$\lambda_{люм}$, нм	2650	$\lambda_{пог}$, нм	1890
$\Delta\lambda_{люм}$, нм	940	$\Delta\lambda_{пог}$, нм	440

Спектральные характеристики поглощения и излучения кристалла Cr^{2+}:CdSe приведены на рисунке 2. Исходя из спектра поглощения, был выбран источник накачки, представляющий собой линейку лазерных диодов с длиной волны излучения λ = 1940 нм, находящейся вблизи максимума спектральной характеристики поглощения кристалла Cr^{2+}:CdSe. Спектральная характеристика излучения линейки лазерных диодов приведена на рисунке 3.

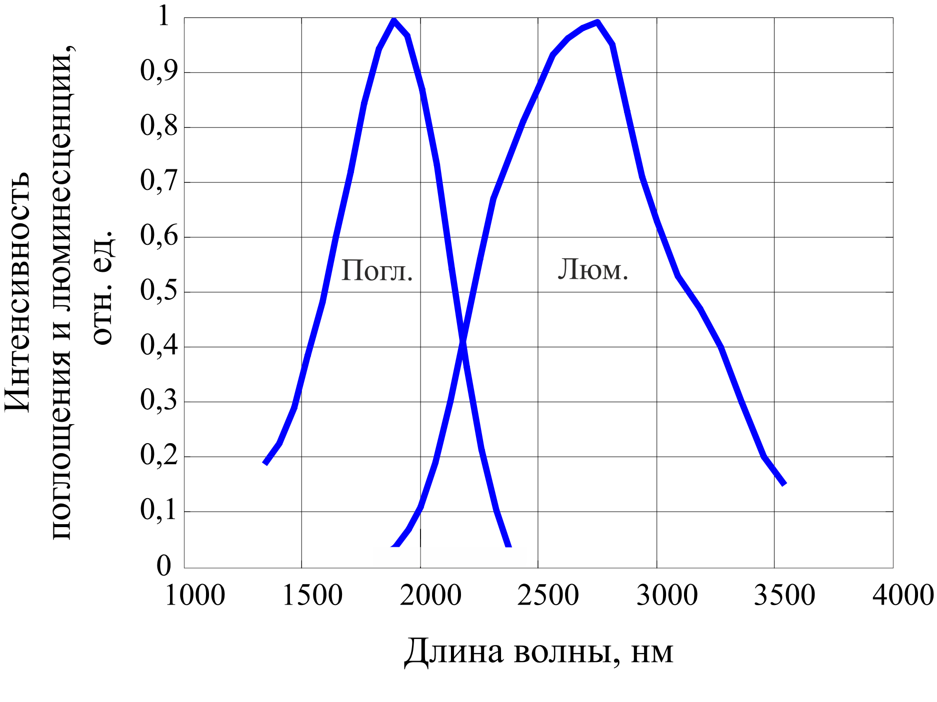

Рис. 2. Спектральная характеристика поглощения и люминесценции кристалла Cr^{2+}:CdSe [16]

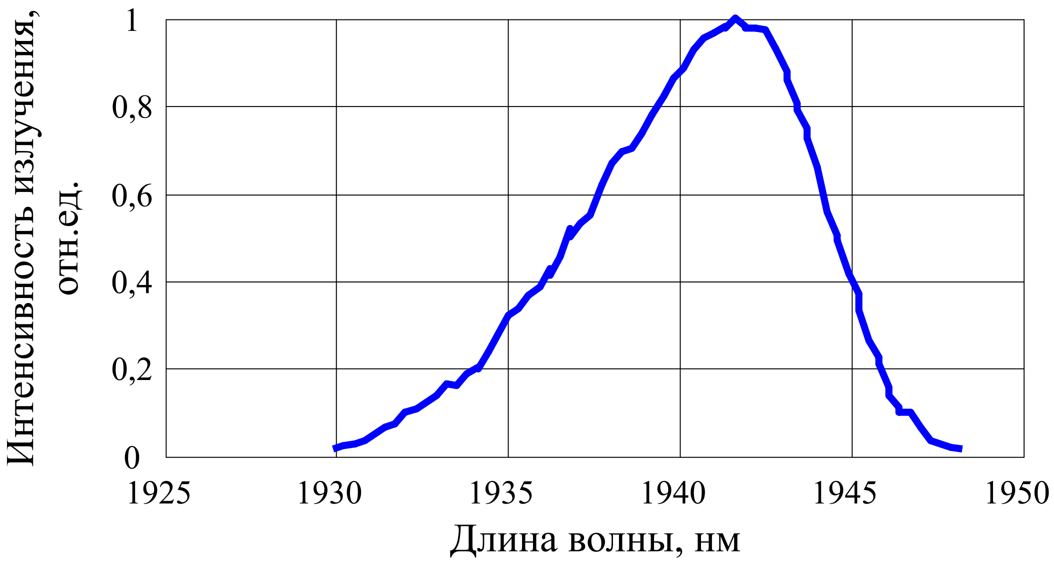

Рис.3 Спектр излучения линейки лазерных диодов

Активный элемент имел рабочую длину 4,9 мм, поперечные размеры 1,5×5 мм. Рабочие поверхности кристалла не просветлялись, но были качественно отполированы и с хорошей точностью параллельны (клиновидность менее 30"). С целью минимизации потерь, обусловленных френелевским отражением излучения на гранях кристалла, кристалл устанавливался таким образом, чтобы его рабочие поверхности были перпендикулярны оптической оси резонатора.

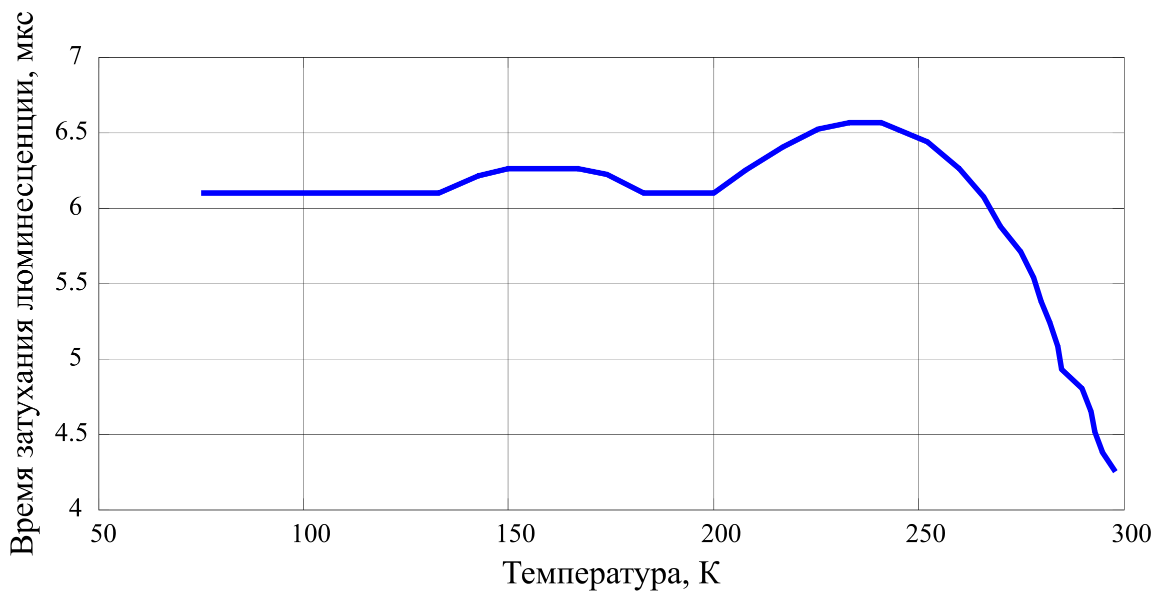

Рис. 4. Зависимость времени жизни верхнего лазерного уровня Cr^{2+} в матрице CdSe от температуры кристалла [16]

Зависимость времени жизни верхнего лазерного уровня Cr^{2+} кристалла Cr^{2+}:CdSe от его температуры представлена на рисунке 4. При комнатной температуре время жизни данного кристалла падает на ~20-30% по сравнению с диапазоном низких температур 77-150 К. Время жизни Cr^{2+} кристалла при переходе $^5E \rightarrow {}^5T_2$ составляет ~ 6 мкс в температурном интервале от 75 до 200 К. От времени жизни напрямую зависит пороговое значение накачки и инверсия населённости верхнего лазерного уровня. В настоящей работе температура кристалла поддерживалась на уровне 11ºС за счет водяного охлаждения.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На описанной установке реализован непрерывный режим генерации Cr^{2+}:CdSe лазера. В ходе эксперимента осуществлялась оптимизация пятна фокусировки излучения накачки путем использования объективов с различными фокусными расстояниями (20, 30, 35 и 40 мм) и изменение диаметра перетяжки генерируемого пучка лазерного излучения путем использования выходных зеркал резонатора с различными радиусами (50; 75 и 100 мм) и коэффициентом пропускания $К_{прп}$ = 2,7 % с целью определения КПД и пороговой мощности накачки. Результаты исследования приведены в табл.2.

Таблица 2. Значения КПД лазера в зависимости от радиуса кривизны зеркала резонатора и фокусного расстояния линзы накачки

Фокусное расстояние линзы накачки $f'_{нак}$, мм	**Радиус сферического зеркала резонатора $R_{рез}$, мм**	**КПД, %**
30	100	10,6
35	100	9,1
20	100	8,8
25	75	8,3
25	100	8,0
30	50	7,9
30	75	7,8
20	75	7,7
25	50	6,8
35	75	6,4
20	50	6,2
35	50	6,0
40	50	4,8
40	100	4,5
40	75	2,2

В ходе работы проведены расчеты диаметра перетяжки, формируемой резонатором, близким к полуконцентрическому. На основании полученных данных выбрано оптимальное сочетание параметров, варьируемых в ходе эксперимента: радиус выходного зеркала R = 100 мм; фокусное расстояние объектива f' = 30 мм. График зависимости мощности генерируемого излучения $P_{вых}$ от мощности излучения накачки $P_{нак}$, вошедшей в кристалл, для этого случая представлен на рисунке 5.

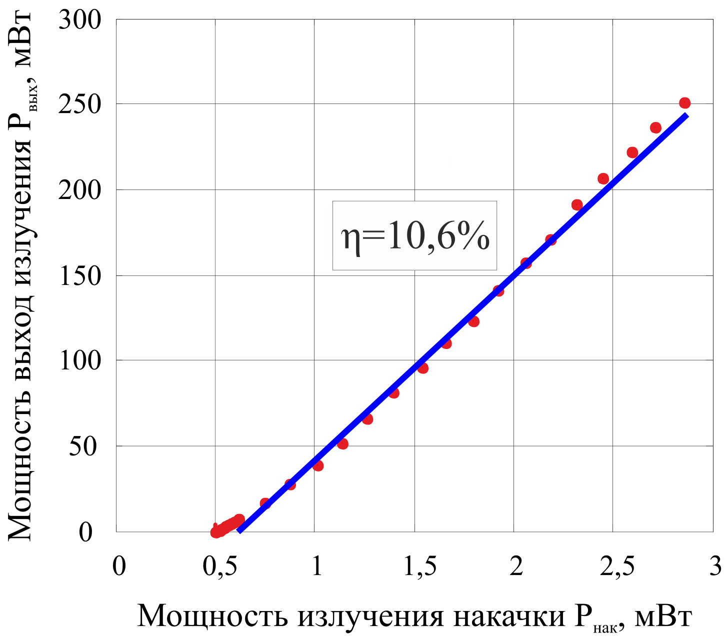

Рис.5. Зависимость мощности генерируемого лазерного излучения от мощности излучения накачки

Максимальное значение $P_{вых} = 0{,}251$ Вт было получено с выходным зеркалом R = 100 мм, $K_{прп}$ = 2,7% при $P_{нак}$ = 3,97 Вт. При этом пороговая мощность накачки $P_{пор}$ составила 0,5 Вт, а КПД был равен 10,6 %.

Заключение

Создан непрерывный твердотельный Cr^{2+}: CdSe лазер среднего ИК-диапазона, на котором впервые получена непрерывная генерация при комнатной температуре с накачкой линейкой лазерных диодов. Произведена оптимизация схемы по параметрам фокусировки накачки и радиуса выходного зеркала, средняя мощность составила 251 мВт при КПД 10,6 % и пороговой мощности накачки 0,5 Вт.

Список литературы

1. Vodopyanov K.L. Mid-infrared optical parametric generator with extra-wide (3-19-μm) tunability: applications for spectroscopy of two-dimensional electrons in quantum wells // Journal of the Optical Society of America B. Optical Physics. 1999. Vol. 16, no. 9. P. 1579-1586. DOI: 10.1364/JOSAB.16.001579

2. Губин М.А., Киреев А.Н., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Лазарев В.А., Пнев А.Б., Подмарьков Ю.П., Тюриков Д.А., Фролов М.П., Шелковников А.С. Наблюдение резонансов насыщенной дисперсии метана в двухмодовом Cr2+:ZnSe/CH4-лазере // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 7. С. 565-566.
3. Губин М.А., Киреев А.Н., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Пнев А.Б., Подмарьков Ю.П., Тюриков Д.А., Фролов М.П., Шелестов Д.А., Шелковников А.С. Перестраиваемый двухмодовый Cr2+:ZnSe-лазер со спектральной плотностью частотных шумов 0,03 Гц/Гц½ // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 6. С. 509-513.
4. Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. Спектральная динамика внутрирезонаторного поглощения в импульсном Cr2+:ZnSe-лазере // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 5. С. 425-428.
5. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. Внутрирезонаторная лазерная спектроскопия с использованием Fe2+:ZnSe-лазера // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, № 11. С. 1071-1075.
6. McKay J., Schepler K.L., Catella G.C. Efficient grating-tuned mid-infrared Cr2+:CdSe laser // Optics Letters. 1999. Vol. 24, no. 22. P. 1575-1577. DOI: 10.1364/OL.24.001575
7. Sorokina I.T. Cr2+-doped II–VI materials for lasers and nonlinear optics // Optical Materials. 2004. Vol. 26, no. 4. P. 395-412. DOI: 10.1016/j.optmat.2003.12.025
8. Page R.H., Schaffers K.I., DeLoach L.D., Wilke G.D., Patel F.D., Tassano Jr. J.B., Payne S.A., Krupke W.F., Chen K.-T., Burger A. Cr2+-doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1997. Vol. 33, no. 4. P. 609-619. DOI: 10.1109/3.563390
9. Berry P.A., Schepler K.L. High-power, widely-tunable Cr2+:ZnSe master oscillator power amplifier systems // Optics Express. 2010. Vol. 18. P. 15062-15072. DOI: 10.1364/OE.18.015062
10. Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фролов М.П. Эффективная генерация Cr2+:CdSe-лазера в непрерывном режиме // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, № 11. С. 991-992.
11. Kozlovsky V.I., Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Martovitsky V.P., Mislavskii V.V., Podmar’kov Yu.P., Skasyrsky Ya.K., Voronov A.A. Room-temperature tunable mid-infrared lasers on transition-metal doped II–VI compound crystals grown from vapor phase // Physica Status Solidi B. Basic Solid State Physics. 2010. Vol. 247, no. 6. P. 1553-1556. DOI: 10.1002/pssb.200983165
12. Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фролов М.П. Непрерывный Cr2+:CdS-лазер // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 1. С. 7-10.
13. Moskalev I., Fedorov V., Mirov S. 10-Watt, pure continuous-wave, polycrystalline Cr2+:ZnS laser // Optics Express. 2009. Vol. 17, is. 4. P. 2048-2056. DOI: 10.1364/OE.17.002048

14. Moskalev I.S., Fedorov V.V., Mirov S.B. InP diode-pumped Cr:ZnS and Cr:ZnSe highly efficient, widely tunable, mid-IR lasers // Proc. SPIE 7578, Solid State Lasers XIX: Technology and Devices, 2010. 75781K. DOI: 10.1117/12.841377
15. Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Voronov A.A. Vapour growth of II-VI single crystals doped by transition metals for mid-infrared lasers // Physica Status Solidi (C). 2006. Vol. 3, no. 4. P. 1213-1216. DOI: 10.1002/pssc.200564723
16. Mirov S., Fedorov V., Moskalev I., Mirov M., Martyshkin D. Frontiers of mid-infrared lasers based on transition metal doped II–VI semiconductors // Journal of Luminescence. 2011. Vol. 133. P. 268-275. DOI: 10.1016/j.jlumin.2011.09.040

Science&Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0408

Science and Education of the Bauman MSTU, 2014, no. 12, pp. 878–888.

DOI: **10.7463/1214.0751429**

Received: 21.12.2014

CW Solid-State Mid-IR Cr2+:CdSe Laser with Diode Array Pumping

M.K. Tarabrin[1,2], V.A. Lazarev[1,*], A.A. Kovtun[1], S.O. Leonov[1], V. E. Karasik[1], Yu.P. Podmarkov[2,3], M.P. Frolov[2,3], A.N. Kireev[2], M.A. Gubin[2,4]

*vladimir.al.lazarev@gmail.com

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia P.N. Lebedev
[2]Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[3]Moscow Institute of Physics and Technology State University, Moscow, Russia
[4]National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Keywords: solid-state laser, mid-IR region, diode array, Cr^{2+}:CdSe crystal

The paper considers the relevant use of broadband mid-IR laser sources. It presents data on the currently existing continuous wave lasers based on chalcogenide crystals doped with transition metal ions with fiber lasers and InP laser diode pumping. It is noted that existing CW mid-IR solid-state Cr^{2+}:CdSe lasers with fiber lasers as a pump source has disadvantages such as the scaled-up size of the system, low values of efficiency and output power. To make up these shortcomings Cr^{2+}:CdSe laser pumped by laser diode array is developed. A structural-functional diagram of the experimental setup, which consists of Cr^{2+}:CdSe laser and power meter is shown. The description of the basic parameters of the Cr^{2+}:CdSe crystal, its spectral characteristics of the absorption and luminescence, and the temperature dependence of the upper level lifetime are given. The necessity of crystal cooling to increase the output power of the laser radiation is supported. The spectral characteristic of the laser diode array is given, it corresponds to the absorption spectrum of the Cr^{2+}:CdSe crystal. Laser output energy characteristics with different combinations of focusing lenses and spherical output couplers have been studied. Laser efficiency is obtained for the each case. On the basis of the scheme optimization the best configuration was selected (lens focal length – 30 mm, radius of output coupler curvature – 100 mm), which yielded the efficiency of 10.6%, the output power of 0.251 W, and the threshold pump power of 0.5 watts.

References

1. Vodopyanov K.L. Mid-infrared optical parametric generator with extra-wide (3-19-μm) tunability: applications for spectroscopy of two-dimensional electrons in quantum wells. *Journal of the Optical Society of America B. Optical Physics*, 1999, vol. 16, no. 9, pp. 1579-1586. DOI: 10.1364/JOSAB.16.001579
2. Gubin M.A., Kireev A.N., Kozlovskiy V.I., Korostelin Yu.V., Lazarev V.A., Pnev A.B., Podmar'kov Yu.P., Tyurikov D.A., Frolov M.P., Shelkovnikov A.S. Observation of saturated dispersion resonances of methane in a two-mode Cr2+ : ZnSe/CH4 laser. *Kvantovaya elektronika*, 2012, vol. 42, no. 7, pp. 565-566. (English translation: *Quantum Electronics*, 2012, vol. 42, no. 7, pp. 565-566. DOI: 10.1070/QE2012v042n07ABEH014907).
3. Gubin M.A., Kireev A.N., Kozlovskiy V.I., Korostelin Yu.V., Pnev A.B., Podmar'kov Yu.P., Tyurikov D.A., Frolov M.P., Shelestov D.A., Shelkovnikov A.S. Tunable two-mode Cr^{2+} : ZnSe laser with a frequency-noise spectral density of 0.03 Hz $Hz^{-1/2}$. *Kvantovaya elektronika*, 2012, vol. 42, no. 6, pp. 509-513. (English translation: *Quantum Electronics*, 2012, vol. 42, no. 6, pp. 509-513. DOI: 10.1070/QE2012v042n06ABEH014838).
4. Akimov V.A., Kozlovskiy V.I., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Frolov M.P. Spectral dynamics of intracavity absorption in a pulsed Cr2+:ZnSe laser. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 5, pp. 425-428. (English translation: *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 5, pp. 425-428. DOI: 10.1070/QE2005v035n05ABEH006589).
5. Akimov V.A., Voronov A.A., Kozlovskiy V.I., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Frolov M.P. Intracavity laser spectroscopy by using a Fe^{2+}:ZnSe laser. *Kvantovaya elektronika*, 2007, vol. 37, no. 11, pp. 1071-1075. (English translation: *Quantum Electronics*, 2007, vol. 37, no. 11, pp. 1071-1075. DOI: 10.1070/QE2007v037n11ABEH013497).
6. McKay J., Schepler K.L., Catella G.C. Efficient grating-tuned mid-infrared Cr2+:CdSe laser. *Optics Letters*, 1999, vol. 24, no. 22, pp. 1575-1577. DOI: 10.1364/OL.24.001575
7. Sorokina I.T. Cr2+-doped II–VI materials for lasers and nonlinear optics. *Optical Materials*, 2004, vol. 26, no. 4, pp. 395-412. DOI: 10.1016/j.optmat.2003.12.025
8. Page R.H., Schaffers K.I., DeLoach L.D., Wilke G.D., Patel F.D., Tassano Jr. J.B., Payne S.A., Krupke W.F., Chen K.-T., Burger A. Cr2+-doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, vol. 33, no. 4, pp. 609-619. DOI: 10.1109/3.563390
9. Berry P.A., Schepler K.L. High-power, widely-tunable Cr2+:ZnSe master oscillator power amplifier systems. *Optics Express*, 2010, vol. 18, pp. 15062-15072. DOI: 10.1364/OE.18.015062
10. Akimov V.A., Kozlovskiy V.I., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Skasyrskiy Ya.K., Frolov M.P. Efficient cw lasing in a Cr^{2+}:CdSe crystal. *Kvantovaya elektronika*, 2007, vol. 37, no. 11, pp. 991-992. (English translation: *Quantum Electronics*, 2007, vol. 37, no. 11, pp. 991-992. DOI: 10.1070/QE2007v037n11ABEH013715).

11. Kozlovsky V.I., Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Martovitsky V.P., Mislavskii V.V., Podmar'kov Yu.P., Skasyrsky Ya.K., Voronov A.A. Room-temperature tunable mid-infrared lasers on transition-metal doped II–VI compound crystals grown from vapor phase. *Physica Status Solidi B. Basic Solid State Physics*, 2010, vol. 247, no. 6, pp. 1553-1556. DOI: 10.1002/pssb.200983165
12. Kozlovskiy V.I., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Skasyrskiy Ya.K., Frolov M.P. Continuous-wave Cr^{2+}:CdS laser. *Kvantovaya elektronika*, 2010, vol. 40, no. 1, pp. 7-10. (English translation: *Quantum Electronics*, 2010, vol. 40, no. 1, pp. 7-10. DOI: 10.1070/QE2010v040n01ABEH014189).
13. Moskalev I., Fedorov V., Mirov S. 10-Watt, pure continuous-wave, polycrystalline Cr2+:ZnS laser. *Optics Express*, 2009, vol. 17, is. 4, pp. 2048-2056. DOI: 10.1364/OE.17.002048
14. Moskalev I.S., Fedorov V.V., Mirov S.B. InP diode-pumped Cr:ZnS and Cr:ZnSe highly efficient, widely tunable, mid-IR lasers. *Proc. SPIE 7578, Solid State Lasers XIX: Technology and Devices*, 2010, 75781K. DOI: 10.1117/12.841377
15. Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Voronov A.A. Vapour growth of II-VI single crystals doped by transition metals for mid-infrared lasers. *Physica Status Solidi (C)*, 2006, vol. 3, no. 4, pp. 1213-1216. DOI: 10.1002/pssc.200564723
16. Mirov S., Fedorov V., Moskalev I., Mirov M., Martyshkin D. Frontiers of mid-infrared lasers based on transition metal doped II–VI semiconductors. *Journal of Luminescence*, 2011, vol. 133, pp. 268-275. DOI: 10.1016/j.jlumin.2011.09.040