

# Непрерывный $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазер

**В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, Я.К.Скасыйский, М.П.Фролов**

*Впервые получена непрерывная генерация на кристалле  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  при оптической накачке тулиевым волоконным лазером с длиной волны 1908 нм. Достигнута выходная мощность 0.81 Вт с дифференциальным КПД по поглощенной мощности накачки 52.3 % на длине волны 2534 нм. Проведено сравнение характеристик лазеров на кристаллах  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  и  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ . На кристалле  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  получена непрерывная лазерная генерация мощностью 1.7 Вт на длине волны 2638 нм с дифференциальным КПД по поглощенной мощности накачки 53.4 %.*

**Ключевые слова:**  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазер,  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазер, лазеры ИК диапазона, твердотельные лазеры, перестраиваемые лазеры, кристаллы  $\text{A}_2\text{B}_6$ .

## 1. Введение

Кристаллы  $\text{A}_2\text{B}_6$ , легированные двухвалентными ионами переходных металлов, интенсивно исследуются с целью их использования при разработке перестраиваемых лазеров ИК диапазона 2–5 мкм [1–6]. Интерес к лазерам на таких кристаллах обусловлен широким кругом их применений в науке и технике, например в спектроскопии, фотохимии, медицине, в устройствах контроля окружающей среды и др. Эти лазеры имеют высокую эффективность, большие области непрерывной перестройки спектра генерации и могут работать в импульсном и непрерывном режимах при комнатной температуре с использованием удобных источников накачки, в том числе полупроводниковых лазеров. К настоящему времени перестраиваемая лазерная генерация получена на целом ряде кристаллов: на  $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnS}$  (максимальный достигнутый диапазон перестройки 1.94–2.84 мкм [7, 8]),  $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$  (1.88–3.10 мкм [9]),  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  (2.26–3.61 мкм [10]),  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdMnTe}$  (2.17–3.01 мкм [11, 12]),  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdTe}$  (2.54 мкм [13]) и  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  (3.77–5.05 мкм [14–16]). Недавно запущен лазер на кристалле  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  (2.18–3.32 мкм [17, 18]).

В отличие от близкого по полосе люминесценции кристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ , кристалл  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  обладает значительно лучшими механическими и термооптическими характеристиками. Время жизни верхнего лазерного уровня в этих материалах существенно зависит от температуры, снижаясь с 6 мкс при температуре жидкого азота до 4 мкс при комнатной температуре в  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  и соот-

ветственно с 7.3 мкс до 0.93 мкс в  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ . Хотя при комнатной температуре кристалл  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  имеет меньше время жизни, в ряде применений, особенно при мощной непрерывной накачке, его использование может оказаться предпочтительным, т. к. благодаря более высокой теплопроводности нагрев этого кристалла, а следовательно, и уменьшение времени жизни будут менее значительными, чем в  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ . Кроме того, в лазерах на кристаллах  $\text{A}_2\text{B}_6$  с ионами переходных металлов существенное влияние на параметры генерации оказывает тепловая линза, возникающая при мощной накачке [19]. В кристалле  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  эффект тепловой линзы должен быть меньше, чем в  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ . Ранее кристалл  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  исследовался только при импульсной накачке [17, 18]. Запуск  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера в режиме непрерывной генерации, осуществленный в настоящей работе, значительно расширяет диапазон его применений.

В настоящей работе впервые получена непрерывная генерация  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера и исследованы его характеристики. Для сравнения на той же экспериментальной установке был исследован непрерывный  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазер, в котором удалось получить более высокие значения выходной мощности и дифференциального КПД, чем опубликованные ранее в [20].

## 2. Экспериментальная установка

На рис.1 представлена оптическая схема установки. Близкий к полуконцентрическому резонатор  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера образован плоским зеркалом 31, пропускавшим 96 % излучения накачки (1.908 мкм) и имевшим близкое к 100 % отражение на длинах волн в диапазоне 2.4–3.4 мкм, и выходным сферическим ( $R = 50$  мм) зеркалом 32. В экспериментах использовались два выходных зеркала, 32(I) и 32(II), спектры пропускания которых в области максимального усиления кристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  представлены на рис.2. Пропускание обоих выходных зеркал на длине волны накачки составляло 90 %. В ходе юстировки лазера зеркало 32 перемещалось вдоль оси лазерного резонатора, что позволяло изменять его длину для лучшего согласования моды резонатора с областью накачки.

**В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Я.К.Скасыйский.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53;

e-mail: frolovmp@x4u.lebedev.ru, yans@sci.lebedev.ru

**Ю.П.Подмарьков, М.П.Фролов.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, 141700 Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9

Поступила в редакцию 20 июля 2009 г., после доработки – 25 сентября 2009 г.

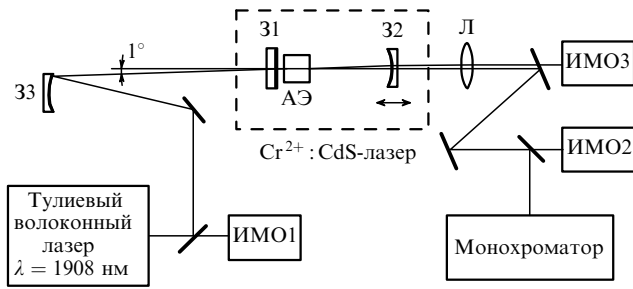


Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки: АЭ – активный элемент; 31,32 – зеркала лазерного резонатора; 33 – сферическое ( $R = 50$  см) фокусирующее зеркало; Л – коллимирующая линза; ИМО1–3 – измерители мощности.

Активный элемент (АЭ) лазера был изготовлен из монокристалла  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$ , 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 [21, 22]. Концентрация ионов  $\text{Cr}^{2+}$ , определенная с помощью атомно-эмиссионного анализа, составляла  $1.1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Спектральные и лазерные характеристики этого кристалла исследовались ранее при импульсной накачке [17, 18].

Активный элемент имел рабочую длину  $l_a = 5.1$  мм, поперечные размеры  $1.5 \times 5$  мм и размещался на расстоянии 0.3–0.6 мм от зеркала 31. Рабочие поверхности АЭ не просветлялись, но были качественно отполированы и с хорошей точностью параллельны (клин менее  $30''$ ). Угол между оптической осью кристалла и нормалью к полированным рабочим поверхностям АЭ составлял  $\sim 4^\circ$ . Для обеспечения эффективного теплоотвода АЭ был зажат через прослойки из индия между двумя медными пластинами, охлаждаемыми проточной водой с температурой  $14^\circ\text{C}$ . С целью минимизации потерь, обусловленных френелевским отражением излучения на гранях кристалла, АЭ устанавливался таким образом, чтобы его рабочие поверхности были перпендикулярны оптической оси резонатора.

Для оптической накачки  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$  лазера использовалось излучение модернизированной модели TLM-05LP непрерывного тулиевого волоконного лазера (НТО «ИРЭ – Полус») с длиной волны 1.908 мкм и максимальной выходной мощностью 5.9 Вт. Пучок излучения накачки через зеркало 31 фокусировался на ближнюю грань АЭ сферическим ( $R = 50$  см) зеркалом 33 в пятно диаметром 0.24 мм и был направлен под небольшим ( $\sim 1^\circ$ ) уг-

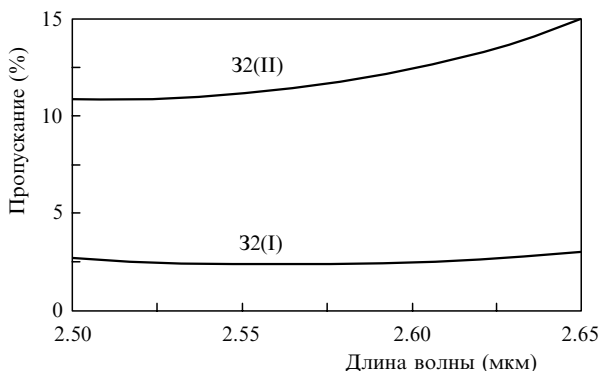


Рис.2. Спектр пропускания выходных зеркал.

лом к оптической оси резонатора  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$ -лазера. Таким способом предотвращалось попадание на фокусирующее зеркало отраженного от элементов резонатора  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$ -лазера излучения накачки, что исключало влияние последнего на работу лазера накачки. При этом внутри кристалла угол между пучком накачки и осью резонатора не превышал  $25'$ , что обеспечивало хорошее согласование объемов области накачки и основной поперечной моды резонатора. Ненасыщенный коэффициент поглощения кристалла  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$  на длине волны излучения накачки был равен  $1.47 \text{ см}^{-1}$ .

Мощности накачки и генерации регистрировались измерителями мощности ИМО1 и ИМО2. Поскольку в условиях генерации коэффициент поглощения уменьшается, для определения поглощенной АЭ мощности накачки использовались данные измерений мощности излучения накачки, проходящего через кристалл во время лазерной генерации (измеритель мощности ИМО3). При этом учитывались френелевские потери излучения накачки на входе в АЭ, а также вклад излучения накачки, прошедшего через АЭ и отраженного в обратном направлении обращенной к выходному зеркалу гранью АЭ. Для измерения спектра генерации использовался дифракционный монохроматор.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На представленной установке впервые был реализован непрерывный режим генерации  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$ -лазера. В большинстве экспериментов центр спектра генерации находился на длине волны 2534 нм. Наблюдалось незначительное (не более чем на 10 нм) смещение спектра в зависимости от используемого зеркала и юстировки резонатора. Ширина спектра не превышала 6 нм (при спектральном разрешении монохроматора 3 нм).

На рис.3 приведена зависимость выходной мощности  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$ -лазера  $P_{\text{out}}$  от поглощенной мощности накачки  $P_{\text{abs}}$  для двух выходных зеркал. Максимальное значение  $P_{\text{out}} = 0.81$  Вт было получено с выходным зеркалом 32(II) при  $P_{\text{abs}} = 2$  Вт. При этом пороговая поглощенная мощность накачки  $P_{\text{th}}$  составила 0.538 Вт, а дифференциальный КПД  $\eta_{\text{abs}}$  был равен 52.3%. Результатом замены выходного зеркала на 32(I) с меньшим пропусканием стало снижение  $P_{\text{th}}$  до 0.433 Вт и уменьшение при этом  $\eta_{\text{abs}}$  до 30.9%. Следует отметить, что из-за потерь

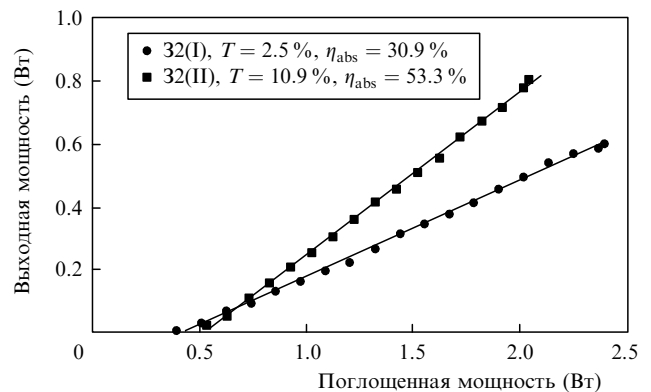


Рис.3. Зависимости выходной мощности  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$ -лазера от поглощенной мощности накачки, полученные при использовании выходных зеркал 32(I) и 32(II).

на подводящей оптике и входной грани кристалла (коэффициент френелевского отражения 15.2%), а также вследствие малого поглощения излучения накачки кристаллом (в режиме генерации – менее 50%) мощность излучения лазера накачки использовалась неполностью. В результате полный оптический КПД  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера составил 14%.

Зависимость  $\eta_{\text{abs}}$  от пропускания выходного зеркала  $T$  была использована для оценки пассивных потерь  $L$  в резонаторе  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера с помощью выражения [23]

$$\frac{1}{\eta_{\text{abs}}} = \frac{1}{\eta'_0} + \frac{L}{\eta'_0 T}, \quad (1)$$

где  $\eta'_0 = \eta_p(\lambda_p/\lambda_{\text{las}})(1 - \sigma_{\text{ESA}}/\sigma)$  – предельный КПД;  $\eta_p$  – эффективность использования излучения накачки;  $\lambda_p$  – длина волны излучения накачки;  $\lambda_{\text{las}}$  – длина волны излучения генерации;  $\sigma_{\text{ESA}}$  – сечение поглощения с верхнего лазерного уровня;  $\sigma$  – сечение лазерного перехода. Из экспериментальных данных нами было получено значение  $L = 2.7\%$ . Если приписать эти потери внутренним потерям в АЭ, то по оценке сверху коэффициент потерь в кристалле  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  на длине волны генерации составляет  $0.026 \text{ см}^{-1}$ .

Для сравнения характеристик  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ - и  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазеров в одинаковых экспериментальных условиях кристалл  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  был заменен кристаллом  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  с теми же размерами (небольшое различие в значениях  $l_a$ ). Мы использовали два кристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ : кристалл №1 ( $l_a = 4.9 \text{ мм}$ ) с такой же, как и у кристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  концентрацией ионов  $\text{Cr}^{2+}$  ( $1.1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), и кристалл №2 ( $l_a = 5.2 \text{ мм}$ ) с меньшей концентрацией  $\text{Cr}^{2+}$  ( $0.81 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Концентрации  $\text{Cr}^{2+}$  в кристаллах  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  были определены по спектрам поглощения с учетом взятого из [3] сечения поглощения. Ненасыщенный коэффициент поглощения на длине волны излучения накачки составлял  $3.3$  и  $2.43 \text{ см}^{-1}$  для кристаллов №1 и 2 соответственно.

На обоих кристаллах  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  была получена непрерывная лазерная генерация; положение центра спектра генерации для этих кристаллов (2638 нм (№1) и 2598 нм (№2)) было сдвинуто в длинноволновую область относительно центра спектра генерации  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера. Ширина спектра не превышала 6 нм.

На рис.4 приведены зависимости от поглощенной мощности накачки выходной мощности  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазера на кристаллах №1 и 2 и  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера, получен-

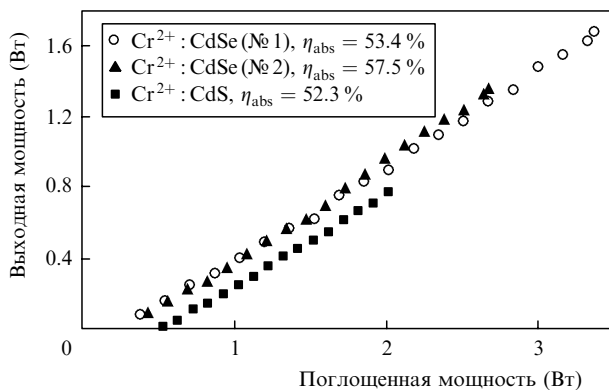


Рис.4. Зависимости выходной мощности лазера на кристаллах  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ ,  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  (№1) и  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  (№2) от поглощенной мощности накачки, полученные при использовании зеркала 32(II).

ные с использованием выходного зеркала 32(II). Существенное различие в значениях максимальной поглощенной мощности накачки для трех исследованных кристаллов обусловлено различием их поглощений в условиях непрерывной генерации.

Максимальное значение  $P_{\text{out}} = 1.7 \text{ Вт}$  было получено в лазере на кристалле №1 при  $P_{\text{abs}} = 3.37 \text{ Вт}$  и  $P_{\text{th}} = 0.273 \text{ Вт}$ . Достигнутая мощность превышает мощность  $1.1 \text{ Вт}$ , полученную нами ранее в непрерывном  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазере [20]. Это можно объяснить более эффективным использованием излучения накачки за счет уменьшения угла между направлением пучка накачки и осью резонатора лазера и лучшим согласованием объемов накачки и генерации в кристалле. Кроме того, рабочие грани кристалла были более качественно отполированы, что позволило снизить потери на рассеяние. Достигнутый дифференциальный КПД  $\eta_{\text{abs}} = 53.4\%$  также превышал полученный в [20] (44%). Еще большее значение  $\eta_{\text{abs}}$  (57.5%), рекордное для  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазера, было получено в лазере на кристалле №2.

Характеристики  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазера измерялись и с выходным зеркалом 32(I). Как и в случае  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера, это позволило приблизительно оценить пассивные потери в резонаторе  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазера, составившие 3.5% и 2.9% для кристаллов №1 и 2, что соответствует коэффициентам поглощения  $0.036$  и  $0.028 \text{ см}^{-1}$ . Основные лазерные характеристики исследованных кристаллов представлены в табл.1.

Приведенные данные говорят о том, что  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ - и  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазеры имеют близкие значения  $\eta_{\text{abs}}$ . Как и следовало ожидать, пороговая мощность накачки для  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  выше, чем для  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ . Для ее оценки можно воспользоваться выражением [24]

$$P_{\text{th}} = (E_{\text{ph}}/\sigma\tau)(S_p + S_{\text{las}})(L + T), \quad (2)$$

где  $E_{\text{ph}}$  – энергия кванта накачки;  $\sigma$  – сечение усиления ( $\sigma_{\text{CdS}} = 1.1 \times 10^{-18} \text{ см}^2$  [18],  $\sigma_{\text{CdSe}} = 1.1 \times 10^{-18} \text{ см}^2$  [25]);  $\tau$  – время жизни верхнего лазерного уровня;  $S_p$  и  $S_{\text{las}}$  – площади накачки и лазерной моды. Из формулы (2) следует, что основной вклад в наблюдаемое различие пороговых мощностей накачки в работе [24] вносит значение  $\tau$ , которое при комнатной температуре, по нашим измерениям, равно  $0.93 \text{ мкс}$  для  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  и  $4.05 \text{ мкс}$  для  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ . Поэтому согласно (2) пороговые мощности для этих двух кристаллов при  $T = 300 \text{ К}$  должны различаться более чем в 4 раза. Между тем, из представленных в табл.1 данных следует, что различие в значениях  $P_{\text{th}}$  меньше. По нашему мнению, это может быть связано с различием в термооптических характеристиках кристаллов.

На качественном уровне преимущество кристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  по сравнению с  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  при высоких плотностях мощности накачки было продемонстрировано в

Табл.1. Основные параметры излучения лазеров на кристаллах  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  и  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ .

Кристалл	$\lambda_{\text{las}}$ (нм)	Выходное зеркало 32(I)		Выходное зеркало 32(II)	
		$P_{\text{th}}$ (Вт)	$\eta_{\text{abs}}$ (%)	$P_{\text{th}}$ (Вт)	$\eta_{\text{abs}}$ (%)
$\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$	2534	0.433	30.9	0.538	52.3
$\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ (№1)	2638	0.194	29.7	0.273	53.4
$\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ (№2)	2598	0.137	33.1	0.310	57.5

проведенных нами дополнительных экспериментах, в которых диаметр пятна накачки на кристалле был уменьшен до 0.15 мм. В этом случае при поглощенной мощности накачки более 1.6 Вт в лазере на кристалле  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  (№ 1) скорость роста выходной мощности замедлялась. В результате максимальная достигнутая выходная мощность не превышала 1.2 Вт, в отличие от  $P_{\text{out}} = 1.7$  Вт, полученной с пятном накачки диаметром 0.24 мм. В лазере на кристалле  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$  такого замедления роста не наблюдалось, а выходная мощность при максимальной поглощенной мощности накачки 2 Вт составляла 0.785 Вт, что близко к 0.81 Вт, полученному с большим пятном накачки. Это позволяет надеяться на получение более высоких значений  $P_{\text{out}}$  при использовании более мощной накачки для возбуждения  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера.

В настоящее время среди чисто непрерывных лазеров на кристаллах  $\text{A}_2\text{B}_6$  наибольшая мощность достигнута на кристаллах  $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnS}$  (10 Вт) и  $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$  (13 Вт) при накачке волоконным лазером с выходной мощностью 30 Вт [8]. Можно предположить, что оптимизация условий накачки и использование источника накачки большей мощности позволит повысить выходную мощность  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ - и  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазеров.

Однородный характер полосы усиления, свойственный кристаллам  $\text{A}_2\text{B}_6$ , легированным ионами переходных металлов, в принципе позволяет значительно сузить линию генерации лазера без существенных потерь мощности, а результаты, полученные нами ранее при импульсной накачке [17, 18], дают основания надеяться на реализацию плавной перестройки излучения непрерывного  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера в пределах 2.2–3.3 мкм. Узкополосные и перестраиваемые лазеры данного типа могут найти применение в спектроскопии высокого разрешения, в частности при разработке малогабаритных оптических стандартов частоты.

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе впервые реализован чисто непрерывный режим генерации  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdS}$ -лазера. Получена выходная мощность 0.81 Вт с дифференциальным КПД по поглощенной мощности накачки 52.3%. По нашему мнению, эффективность лазера может быть повышена за счет дальнейшей оптимизации пропускания выходного зеркала и согласования областей накачки и генерации в активном элементе. Для повышения полного КПД лазера необходимо использовать активный элемент с просветленными поверхностями, обладающий более высоким поглощением на длине волны накачки.

Работа частично поддержана Программой Министерства образования и науки РФ «Развитие научного

потенциала высшей школы» и РФФИ (гранты № 09-02-00864-а, 09-02-00877-а).

1. DeLoach L.D., Page R.H., Wilke G.D., Payne S.A., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 885 (1996).
2. Page R.H., Schaffers K.I., DeLoach L.D., Wilke G.D., Patel F.D., Tassano J.B., Payne S.A., Krupke W.F., Chen K.-T., Burger A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 609 (1997).
3. McKay J., Schepler K.L., Catella G.C. *Opt. Lett.*, **24**, 1575 (1999).
4. Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24**, 1720 (1999).
5. Kuck S. *J. Alloys Compounds*, **341**, 28 (2002).
6. Sorokina I.T. *Opt. Mater.*, **26**, 395 (2004).
7. Sorokina I.T., Sorokin E., Mirov S., Fedorov V., Badikov V.V., Panyutin V., Schaffers K.I. *Opt. Lett.*, **27**, 1040 (2002).
8. Moskalev I.S., Mirov S.B., Fedorov V.V. *Opt. Express*, **17**, 2048 (2009).
9. Demirbas U., Sennaroglu A. *Opt. Lett.*, **31**, 2293 (2006).
10. Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **38**, 205 (2008).
11. Seo J.T., Hömmerich U., Trivedi S.B., Chen R.J., Kutcher S. *Opt. Commun.*, **153**, 267 (1998).
12. Trivedi S.B., Kutcher S.W., Wang C.C., Jagannathan G.V., Hömmerich U., Bluiett A., Turner M., Seo J.T., Schepler K.L., Schumm B., Boyd P.R., Green G. *J. Electron. Mater.*, **30**, 728 (2001).
13. Bluiett A., Hömmerich U., Shah R.T., Trivedi S.B., Kutcher S.W., Wang C.C. *J. Electron. Mater.*, **31**, 806 (2002).
14. Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **35**, 809 (2005).
15. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **36**, 299 (2006).
16. Fedorov V.V., Mirov S.B., Gallian A., Badikov V.V., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Akimov V.A., Voronov A.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42**, 907 (2006).
17. Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **38**, 803 (2008).
18. Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Voronov A.A. *Appl. Phys. B*, in print (2009).
19. Schepler K.L., Peterson R.D., Berry P.A., McKay J.B. *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, **11**, 713 (2005).
20. Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **37**, 991 (2007).
21. Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Nasibov A.S., Shapkin P.V. *J. Crystal Growth*, **159**, 181 (1996).
22. Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I. *J. Alloys Compounds*, **371**, 25 (2004).
23. Caird J.A., Pane S.A., Staver P.R., Ramponi A.J., Chase L.L., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 1077 (1988).
24. Moulton P.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **21**, 1582 (1985).
25. McKay J.B. *PhD Dissertation* (Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 2003).