

УДК 621.373.826

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ОДНОЧАСТОТНЫЙ НЕПРЕРЫВНЫЙ ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$

М. А. Губин¹, А. Н. Киреев¹, Ю. В. Коростелин¹, А. И. Ландман¹,
Ю. П. Подмарьков^{1,2}, М. Ю. Филипчук², М. П. Фролов^{1,2},
А. И. Шелковников¹

В непрерывном $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазере продемонстрирован диапазон плавной перестройки длины волны генерации от 2350 до 3450 нм. Показано, что лазер эффективно работает на длине волны 3.28 мкм, перспективной для оптического стандарта частоты на молекуле метана. В этой спектральной области реализован одночастотный режим работы лазера с шириной линии генерации, не превышающей 60 МГц.

Ключевые слова: $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазер, перестраиваемые лазеры, лазеры ИК диапазона, оптические стандарты частоты.

Перестраиваемые непрерывные лазеры ИК диапазона 2–5 мкм находят широкое применение в медицине, различных областях науки и техники. В частности, использование перестраиваемого узкополосного лазера с длиной волны 3.28 мкм открывает потенциальную возможность повышения на 1–2 порядка воспроизводимости частоты лазерных оптических стандартов частоты (ОСЧ) [1, 2], основанных на внутримолекулярных резонансах метана в газовых ячейках низкого давления. Традиционно в ОСЧ на молекуле метана используется линия F2(2) перехода R(7) полосы ν_3 , совпадающая с частотой генерации He-Ne-лазера ($\lambda = 3.39$ мкм). Однако расчеты показывают [3], что ряд других линий, соответствующих колебательно-вращательным переходам метана, в частности линия E(1) перехода R(2) ($\lambda = 3.28$ мкм), могут быть более перспективными для создания ОСЧ с более высокими точностью и воспроизводимостью. Для работы на этих линиях необходима замена He-Ne-лазера на лазер, работающий на требуемой частоте. В

¹ Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр., 53, e-mail: frolovmp@x4u.lebedev.ru.

² Московский физико-технический институт, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

качестве такого источника ранее использовался лазер на центрах окраски (ЦО) в кристалле $\text{RbCl}:\text{Li}$ [3, 4]. Однако перестраиваемый лазер на ЦО обладал рядом недостатков, связанных с необходимостью охлаждения кристаллов до температуры жидкого азота, высокой гигроскопичностью кристаллов, неустойчивостью центров окраски во времени, которые ограничивали его практическое использование.

Недавно начались исследования новой активной лазерной среды для среднего ИК диапазона на основе кристалла CdSe , легированного двухвалентными ионами хрома [5]. По сравнению с лазером на ЦО лазер на кристалле $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ имеет ряд преимуществ. Лазер работает при комнатной температуре в импульсном и непрерывном режиме и имеет широкую полосу усиления (2.2–3.7 мкм). Кристалл $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ не гигроскопичен и не деградирует со временем. Для его оптической накачки могут быть использованы твердотельные и волоконные лазеры, например, тулиевые лазеры и диодные лазеры, работающие в области 1.7–2.2 мкм.

К настоящему времени на кристалле $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ в максимуме полосы усиления получена непрерывная лазерная генерация мощностью до 1.7 Вт и достигнут дифференциальный КПД по поглощенной мощности накачки 57% [6]. Была продемонстрирована плавная перестройка длины волны генерации $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера в спектральном диапазоне 2.26–3.61 мкм [7]. Однако возможности перестройки исследовались только при использовании импульсной накачки.

В настоящей работе исследуются возможности перестройки длины волны непрерывного $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера и сужения его спектра генерации.

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Резонатор $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера был образован плоским “глухим” зеркалом \mathcal{Z}_1 , пропускавшим 95% излучения накачки на длине волны 1.94 мкм и отражавшим $> 99.7\%$ излучения в спектральной области 2.4–3.4 мкм, поворотным сферическим ($R = 100$ мм) зеркалом \mathcal{Z}_2 с золотым покрытием и дифракционной решеткой (360 штр./мм). Вывод излучения из резонатора осуществлялся через нулевой порядок дифракционной решетки. Активный элемент (АЭ) лазера был изготовлен из монокристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$, выращенного на монокристаллической затравке физическим транспортом из паровой фазы с одновременным легированием в процессе роста по технологии, разработанной для выращивания монокристаллов твердых растворов [8, 9]. Использовался кристалл с концентрацией ионов Cr^{2+} , равной $1.1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Коэффициент поглощения АЭ на длине волны накачки составлял 3.3 см^{-1} . Спектральные и лазерные характеристики этого кристалла исследовались ранее в условиях импульсной и непрерывной накачки [6, 7]. АЭ имел фор-

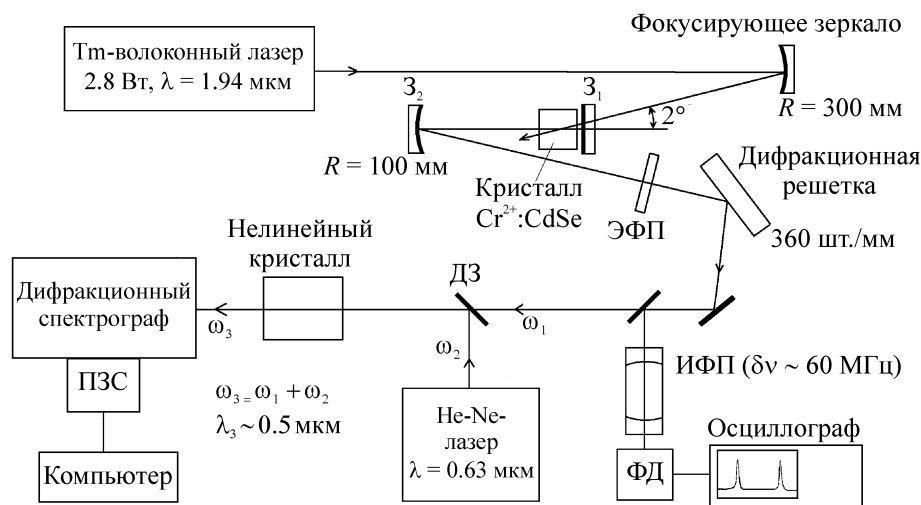


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: Z_1 , Z_2 – “глухое” и поворотное зеркала резонатора, ДЗ – дихроичное зеркало, ИФП – конфокальный сканирующий интерферометр (область свободной дисперсии ≈ 1.4 ГГц, разрешение ≈ 60 МГц), ЭФП – эталон Фабри-Перо, ФД – фотодиод.

му “слэба” с активной длиной $l_a = 4.9$ мм и поперечными размерами 1.5×5 мм. Оптическая ось кристалла составляла небольшой угол $\approx 4^\circ$ с нормалью к рабочим поверхностям АЭ. Рабочие поверхности АЭ не просветлялись, но были качественно отполированы и с хорошей точностью параллельны (клин $< 30''$). Для обеспечения эффективного теплоотвода АЭ был зажат через прослойки из индия между двумя медными пластинами, охлаждаемыми проточной водой с температурой 17°C . АЭ размещался вблизи зеркала Z_1 , так что расстояние между зеркалом Z_1 и ближайшей к нему гранью кристалла было 0.5 мм. Рабочие поверхности АЭ были перпендикулярны к оптической оси резонатора. Расстояние между зеркалом Z_2 и АЭ было близко к 50 мм, а полная длина резонатора составляла 210 мм. Для реализации одночастотного режима генерации $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ лазера в резонаторе устанавливался эталон Фабри-Перо (ЭФП) (плоскопараллельная пластина из CaF_2 толщиной 2.4 мм).

Оптическая накачка $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера осуществлялась излучением непрерывного тулиевого волоконного лазера (ТЛМ-3 производства НТО ИРЭ-Полус) с длиной волны 1.94 мкм и максимальной выходной мощностью 2.8 Вт. Пучок накачки через зеркало Z_1 фокусировался в АЭ сферическим ($R = 300$ мм) зеркалом в пятно диаметром ≈ 0.15 мм. Направление пучка накачки составляло небольшой угол ($\approx 2^\circ$) с оптической осью резо-

натора $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера. Таким способом предотвращалось попадание на фокусирующее зеркало отраженного от элементов резонатора $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера излучения накачки и исключалось его влияние на работу тулиевого волоконного лазера. В условиях наших экспериментов максимальная поглощенная АЭ мощность накачки не превышала 1.6 Вт при максимальной мощности источника накачки 2.8 Вт.

Измерение длины волны излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера и предварительный анализ его спектра осуществлялись с помощью дифракционного спектрографа с разрешением 0.04 см^{-1} . Для этой цели ИК-излучение $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера (частота ω_1) преобразовывалось в видимую область спектра $\sim 0.5 \text{ мкм}$ в процессе генерации суммарной частоты ($\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$) при его смешении в нелинейном кристалле LiNbO_3 (90° синхронизм с температурной настройкой) с монохроматическим излучением He-Ne-лазера с длиной волны 632.8 нм (частота ω_2). Преобразованное в видимый диапазон излучение регистрировалось в спектрографе с помощью многоканального оптического анализатора на основе ПЗС-линейки. Такой способ регистрации ИК-спектров в диапазоне 2–4 мкм, позволяющий в реальном времени следить за лазерным спектром, хорошо зарекомендовал себя ранее во внутррезонаторной лазерной спектроскопии на основе $\text{Co}^{2+}:\text{MgF}_2$ -, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ - и $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеров с использованием в качестве дополнительного лазера узкополосного импульсного Nd:YAG-лазера (1064 нм) [10–12].

Тонкая структура спектра анализировалась с помощью конфокального сканирующего интерферометра Фабри–Перо (ИФП) с областью свободной дисперсии $\approx 1.4 \text{ ГГц}$ и разрешением $\approx 60 \text{ МГц}$.

Перестройка длины волны выходного излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера осуществлялась поворотом дифракционной решетки. При этом использовался только один набор зеркал лазерного резонатора. На рис. 2 показана полученная кривая перестройки лазера и спектр пропускания зеркала \mathcal{Z}_1 . Экспериментальные данные были получены при поглощенной мощности накачки 1.4 Вт. В максимуме перестроечной кривой (интервал длин волн 2.5–2.7 мкм) значение выходной мощности составило 210 мВт. В крайних точках перестроечной кривой (2.35 мкм и 3.45 мкм) выходная мощность составила 5 мВт. Перестройка в областях спектра короче 2.4 мкм и длиннее 3.4 мкм, по-видимому, ограничивалась пропусканием используемого зеркала. Увеличение мощности накачки и уменьшение потерь резонатора, вероятно, позволит расширить диапазон перестройки лазера.

Из рис. 2 видно, что лазер может эффективно работать на длине волны вблизи 3.28 мкм, необходимой для ОСЧ. При этом измерения показали, что в условиях наших

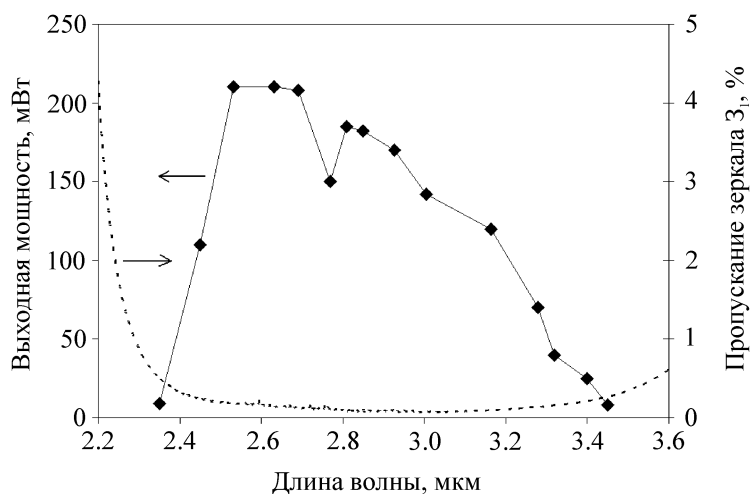


Рис. 2: Перестроечная кривая длины волны генерации $Cr^{2+}:CdSe$ -лазера при поглощенной мощности накачки 1.4 Вт (ромбики) и спектр пропускания зеркала Z_1 (пунктир).

экспериментов пороговая поглощенная мощность накачки для работы лазера на этой длине волны составила 0.43 Вт. Используемый источник накачки обеспечивал примерно 4-кратное превышение порога.

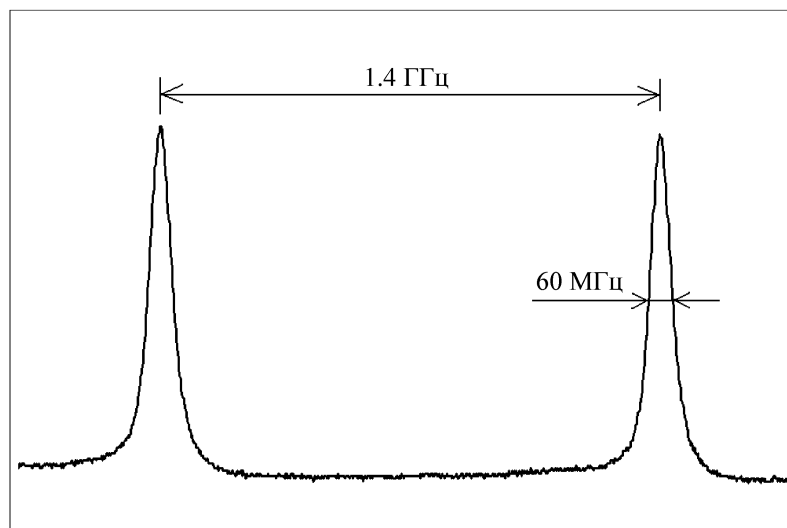


Рис. 3: Сигнал пропускания сканирующего ИФП, демонстрирующий узкополосную одностороннюю лазерную генерацию на длине волны 3.28 мкм.

В отсутствие ЭФП в резонаторе спектр лазера представлял две либо три линии с интервалом $\approx 0.4 \text{ см}^{-1}$, соответствующим собственной частоте пропускания интерфе-

рометра, образованного гранями АЭ. Установленный в резонатор ЭФП позволил выделить одну узкую линию. Измеренная с помощью конфокального сканирующего интерферометра спектральная ширина этой линии не превышала 60 МГц (разрешение сканирующего ИФП). На рис. 3 показан сигнал пропускания сканирующего ИФП, демонстрирующий узкополосную одночастотную лазерную генерацию.

Таким образом, в данной работе впервые реализована перестройка непрерывного $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера в диапазоне 2.35–3.45 мкм. Показано, что лазер может эффективно работать в окрестности длины волны 3.28 мкм, необходимой для использования в ОСЧ. Реализована генерация в одночастотном режиме с узкой линией, ширина которой не превышала 60 МГц. Полученные результаты показывают перспективность использования $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера для создания ОСЧ на метане.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 09-02-00864-а, 09-02-00877-а), Программы Министерства образования и науки РФ “Развитие научного потенциала высшей школы” и Программы “Участник молодежного научно-инновационного конкурса 2009” (“У.М.Н.И.К.”) Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. L. Hall, *Laser Phys.* **4**, 305 (1994).
- [2] С. Н. Багаев, В. П. Чеботаев, *УФН* **148**, 143 (1986).
- [3] А. Н. Киреев, Е. В. Ковальчук, Д. А. Тюриков и др., *Квантовая электроника* **21**, 901 (1994).
- [4] М. А. Губин, А. Н. Киреев, Е. В. Ковальчук и др., *Квантовая электроника* **23**, 951 (1996).
- [5] J. McKay, K. L. Schepler, G. C. Catella, *Optics Letters* **24**, 1575 (1999).
- [6] В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин, А. И. Ландман и др., *Квантовая электроника* **40**, 7 (2010).
- [7] В. А. Акимов, В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин и др., *Квантовая электроника* **38**, 205 (2008).
- [8] Yu. V. Korostelin, V. I. Kozlovsky, A. S. Nasibov, P. V. Shapkin, *J. Crystal Growth* **159**, 181 (1996).
- [9] Yu. V. Korostelin and V. I. Kozlovsky, *J. Alloy Compounds* **371**, 25 (2004).

- [10] M. P. Frolov, Yu. P. Podmar'kov, *Optics Commun.* **155**, 313 (1998).
- [11] В. А. Акимов, В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин и др., *Квантовая электроника* **35**, 425 (2005).
- [12] В. А. Акимов, А. А. Воронов, В. И. Козловский и др., *Квантовая электроника* **37**, 1071 (2007).

Поступила в редакцию 1 сентября 2010 г.