УДК 621.373.826

ЭФФЕКТИВНЫЙ И КОМПАКТНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ Cr^{2+}:CdSe-ЛАЗЕР, ИЗЛУЧАЮЩИЙ В ОБЛАСТИ ДЛИН ВОЛН 2.8 МКМ И 3.3 МКМ

Н. Г. Захаров[1], К. В. Воронцов[1], Ю. Н. Фролов[1], С. Д. Великанов[1], А. В. Мухин[1], А. В. Ларионов[1], В. И. Козловский[2], Ю. В. Коростелин[2], Ю. П. Подмарьков[2], Я. К. Скасырский[2], М. П. Фролов[2]

В лазере на монокристалле Cr^{2+}:CdSe получен импульсно-периодический режим генерации на длинах волн в области 2.8 *и* 3.3 *мкм. В области* 2.8 *мкм эффективность преобразования накачки в лазерное излучение составила* ∼28% *(более* 50% *от поглощённой энергии). В области* 3.3 *мкм получена генерация на нескольких перестраиваемых узких линиях, подходящих для использования в дистанционных лидарах. Эффективность преобразования накачки в лазерное излучение в этой спектральной области составила более* 17% *(более* 30% *от поглощённой энергии).*

Ключевые слова: Cr^{2+}:CdSe-лазер, лазеры ИК диапазона, лидары, твердотельные лазеры, перестраиваемые лазеры, кристаллы A_2B_6.

Лазерные источники, работающие в среднем ИК диапазоне спектра, представляют интерес для широкого круга практических применений в медицине и спектроскопии, в том числе при мониторинге атмосферы и дистанционном зондировании утечек углеводородов из магистральных газопроводов [1]. Для дистанционной регистрации углеводородов оптическим методом дифференциального поглощения большое внимание привлекает спектральная область в районе 3.3 мкм из-за сильных линий поглощения метана и этана и наличия окон прозрачности атмосферы. Излучение с длиной волны

[1] Институт лазерно-физических исследований ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 607190 Россия, Нижегородская обл., Саров, пр. Мира, 37; e-mail: nikitagz@rambler.ru.

[2] ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр., 53; e-mail: frolovmp@x4u.lebedev.ru.

$\sim$2.8 мкм может быть с успехом использовано в медицинских целях (в том числе для косметических операций) или для накачки перспективных кристаллов Fe^{2+}:ZnSe, позволяющих получать генерацию в диапазоне 4–5 мкм.

Разработка эффективных дифференциальных лидаров, работающих в области 3.3 мкм, ограничивается отсутствием узкополосных перестраиваемых лазерных источников с высокой энергетикой, частотой следования и приемлемыми эксплуатационными характеристиками. Низкие мощностные параметры существующих He-Ne и перестраиваемых полупроводниковых лазеров не позволяют лидарам на их основе одновременно достигать высокой чувствительности и достаточного для авиационного применения быстродействия, определяющего пространственное разрешение всей системы. Эксплуатационные характеристики (сложность и громоздкость) параметрических генераторов среднего ИК диапазона, генераторов разностной частоты и химических лазеров ограничивают их практическое использование в лидарах. При отсутствии возможности генерации одновременно опорной и аналитической длин волн в одном дистанционном анализаторе необходимо применение сразу двух лазерных источников, что увеличивает энергопотребление и массогабаритные характеристики системы в целом.

Зондирование углеводородов практически во всех российских лазерных лидарах реализовано только по поглощению метана, присутствующего как фоновая составляющая в воздухе (особенно в заболоченных участках местности), что приводит к ложным срабатываниям. В результате существующие отечественные дистанционные лидарные системы обладают либо низкими диагностическими характеристиками, либо плохими эксплуатационными параметрами. Возможность осуществления зондирования одним лазерным источником с достаточной частотой следования импульсов и их энергетикой, а также анализ наличия углеводородов по двум газам (этана и метана) позволит достичь высоких эксплуатационных характеристик лидара и его помехозащищенности [1, 2].

Перспективной активной средой для создания эффективного и компактного твердотельного лазерного источника, работающего в спектральной области $\sim$3.3 мкм, является кристалл Cr^{2+}:CdSe. К настоящему времени на кристалле Cr^{2+}:CdSe продемонстрирована лазерная генерация с широкой полосой перестройки (в диапазоне 2.26–3.61 мкм в моноимпульсном [3] и 2.35–3.45 мкм в непрерывном режимах [4]), захватывающей область 3.3 мкм. 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% [5]. Ранее в работе [6] в импульсно-периодическом ре-

жиме генерации (1 кГц) было получено 815 мВт средней мощности на длине волны 2.6 мкм, однако при перестройке спектра в длинноволновую область мощность генерации существенно падала (50 мВт для 2.9 мкм).

Целью настоящей работы было исследование работы Cr^{2+}:CdSe-лазера в импульсно-периодическом режиме на длине волны ∼2.8 мкм и в спектральном диапазоне 3.3 мкм с одновременной генерацией нескольких узких линий, подходящих для эффективного использования в дифференциальных лидарах.

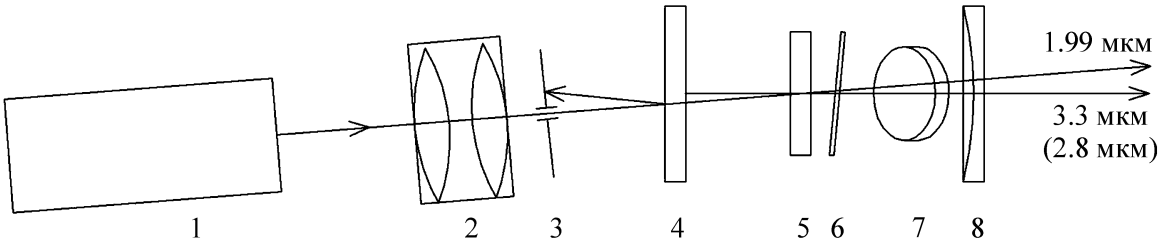


Рис. 1: *Схема экспериментальной установки: 1 – Tm:$YAlO_3$-лазер; 2 – фокусирующая система; 3 – диафрагма; 4 – входное плоское зеркало; 5 – активный элемент из Cr^{2+}:CdSe; 6 – эталон Фабри–Перо; 7 – интерференционно-поляризационный фильтр; 8 – выходное зеркало.*

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Резонатор Cr^{2+}:CdSe-лазера был образован входным дихроичным плоским зеркалом (4), пропускавшим 95% излучения накачки и имевшим отражение на рабочей длине волны 99%, и выходным сферическим ($R = 20$ см) зеркалом (8). Для получения генерации в различных диапазонах длин волн применялись зеркала резонатора с соответствующими спектральными характеристиками. Для генерации в области 2.8 мкм использовалось выходное зеркало с коэффициентом отражения 65% в диапазоне 2.7–2.9 мкм. Генерация в области 3.3 мкм обеспечивалась другим выходным зеркалом, имеющим коэффициент отражения 80% в диапазоне 3.3–3.5 мкм. Кроме того, для исследования возможности управления шириной спектра генерации за счёт параметров резонатора в экспериментах применялся набор более узкополосных входных и выходных зеркал, уровень максимального коэффициента отражения которых оставался практически неизменным (небольшое различие определялось точностью изготовления зеркал). Резонатор имел длину ∼7.5 см.

Для перестройки и сужения спектра генерации применялся интерференционно-поляризационный фильтр (7), представляющий собой плоскопараллельную сапфи-

ровую пластинку толщиной 5 мм, вырезанную параллельно оптической оси. Для функционирования фильтра необходимо, чтобы излучение генерации было линейно-поляризованным, поэтому фильтр устанавливался под углом Брюстера.

Для выделения нескольких отдельных узких линий генерации с необходимыми длинами волн в резонатор дополнительно устанавливался эталон Фабри–Перо (плоскопараллельная пластина из CaF_2 толщиной 1.6 мм), имеющий область свободной дисперсии $\sim$2.45 нм.

Лазерный активный элемент (АЭ) (длиной 4.5 мм, толщиной 1.5 мм и шириной 9 мм) был изготовлен из монокристалла Cr^{2+}:CdSe, выращенного на монокристаллической затравке физическим транспортом в инертном газе из паровой фазы с одновременным легированием в процессе роста по технологии, разработанной для выращивания легированных монокристаллов соединений A_2B_6 [7]. Определенная по спектру поглощения концентрация ионов Cr^{2+} в исследуемом кристалле составляла $1.1 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Коэффициент поглощения на длине волны накачки составлял 3 см$^{-1}$.

На рабочие поверхности АЭ были нанесены просветляющие покрытия для излучения накачки и генерации с остаточным отражением не более 1.5% от одной грани. Направление оптической оси кристалла (кристалл имел гексагональную структуру) с точностью 4° совпадало с осью резонатора. АЭ через индиевую фольгу был закреплен в медном радиаторе, без принудительного охлаждения.

Накачка Cr^{2+}:CdSe-лазера осуществлялась излучением с длиной волны $\sim$1.99 мкм импульсно-периодического Tm:$YAlO_3$-лазера с диодной накачкой. Частота следования импульсов варьировалась от 2 до 5 кГц, а падающая на кристалл Cr^{2+}:CdSe энергия импульса накачки достигала 2.4 мДж. Характерная длительность импульсов накачки составляла 150 нс при частоте следования импульсов накачки 2 кГц. Пучок Tm:$YAlO_3$-лазера через входное зеркало фокусировался в АЭ в пятно диаметром $\sim$0.7 мм. Направление пучка накачки составляло небольшой угол ($\sim$1.5°) с оптической осью резонатора Cr^{2+}:CdSe-лазера. При этом внутри кристалла пучок накачки имел угол с осью резонатора $< 40'$, что обеспечивало хорошее согласование объемов накачки и лазерной моды. В то же время использование такой схемы позволило исключить оптическую связь резонаторов лазера накачки и Cr^{2+}:CdSe-лазера.

В условиях наших экспериментов поглощенная кристаллом энергия накачки составляла $\sim$50% от источника накачки.

На рис. 2 приведена зависимость энергии генерации Cr^{2+}:CdSe-лазера E_{out} от энергии накачки, падающей на кристалл. Дифференциальный КПД лазера η, определен-

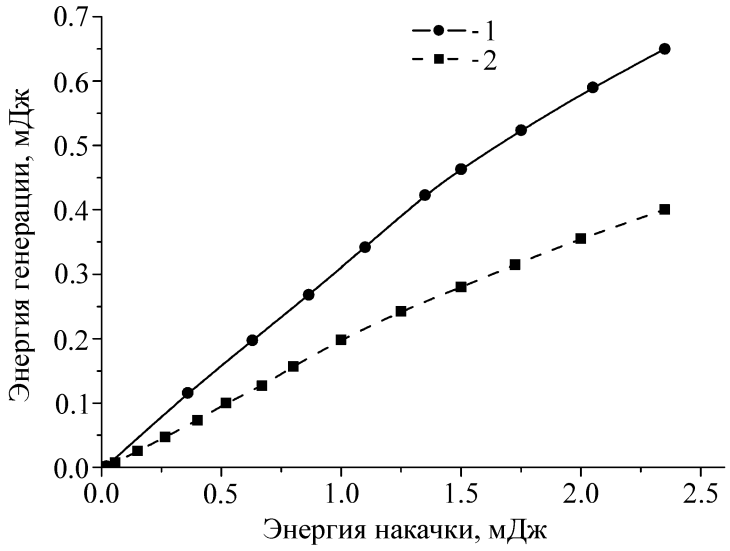


Рис. 2: *Зависимости энергии генерации Cr^{2+}:CdSe-лазера от энергии накачки для диапазонов длин волн* 2.8 *мкм (1) и* 3.3 *мкм (2).*

ный по наклону проведенной через экспериментальные точки прямой, для диапазона длин волн 2.8 мкм при энергии накачки до 1.3 мДж составил 31%, а для диапазона длин волн 3.3 мкм – $\eta = 20\%$. При больших энергиях накачки наблюдалось снижение эффективности лазера, по-видимому, связанное с тепловыми эффектами, а также рассогласованием моды резонатора с областью накачки за счёт изменения расходимости пучка генерации Tm:$YAlO_3$-лазера с увеличением энергии. Пороговая энергия накачки составила 9 мкДж, что достигалось благодаря высокой импульсной мощности накачки. Максимальная энергия Tm:$YAlO_3$-лазера была ограничена величиной 2.4 мДж. При этой энергии накачки для диапазонов длин волн 2.8 и 3.3 мкм максимальные значения E_{out} составили 0.65 и 0.4 мДж, а эффективности преобразования накачки – 28% (более 50% от поглощённой энергии) и 17% (более 30% от поглощённой энергии), соответственно.

Длительность импульсов генерации зависела от энергии накачки и, соответственно, длительности импульсов накачки. Характерная длительность импульсов генерации составляла 100 нс. Импульсная мощность в диапазоне генерации 2.8 мкм достигала 6.5 кВт, а в области 3.3 мкм – 4 кВт.

Характерный спектр генерации Cr^{2+}:CdSe-лазера в области 3.3 мкм в отсутствие внутрирезонаторных селектирующих элементов представлен на рис. 3. В зависимости от спектральных характеристик зеркал ширина линии генерации варьировалась от 20

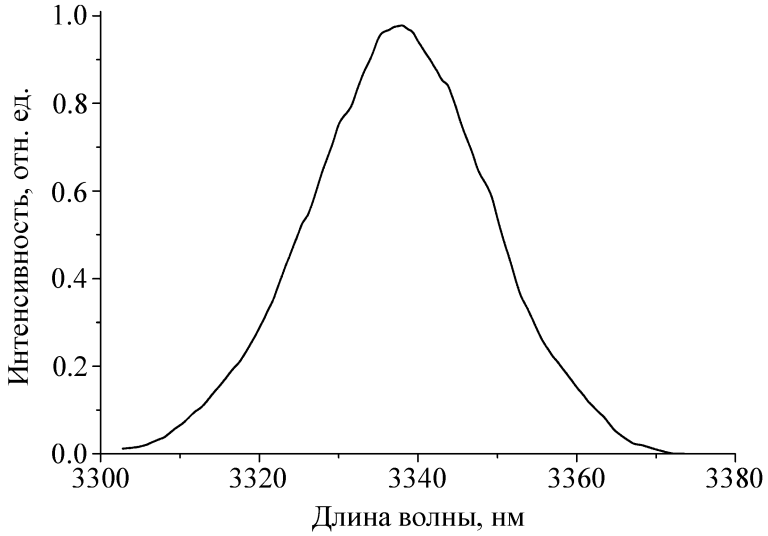


Рис. 3: *Характерный спектр Cr^{2+}:CdSe-лазера в области* 3.3 *мкм в отсутствие внутрирезонаторных селектирующих элементов (спектральное разрешение* 1.5 *нм).*

до 100 нм. Следует отметить высокую чувствительность Cr^{2+}:CdSe-лазера к внутрирезонаторным потерям, связанным с линиями поглощения атмосферных газов (например, паров воды). Для устранения изрезанности спектра генерации была осуществлена продувка азотом полости резонатора, позволившая практически полностью устранить провалы в линии генерации источника.

С помощью интерференционно-поляризационного фильтра и эталона Фабри–Перо была реализована генерация на нескольких перестраиваемых линиях, имеющих полуширину менее 0.5 нм (предельное разрешение спектральной аппаратуры). Все линии находились в области прозрачности атмосферы с минимальным поглощением паров воды. Далее, две из наиболее интенсивных линий были настроены на линии поглощения этана 3336.8 нм и метана 3334.3 нм. В качестве реперной линии была взята интенсивная линия 3331.8 нм, не совпадающая с линиями поглощения указанных углеводородов. Спектр генерации и линии поглощения метана и этана представлены на рис. 4. Этот результат свидетельствует о перспективности использования данного режима в лидарах, настроенных на обнаружение природного газа, основными составляющими которого являются метан и этан.

Таким образом, в данной работе в лазере на основе кристалла Cr^{2+}:CdSe с накачкой импульсно-периодическим излучением Tm:$YAlO_3$-лазера получена эффективная генерация в диапазонах длин волн 2.8 и 3.3 мкм. Лазер мог одновременно работать на

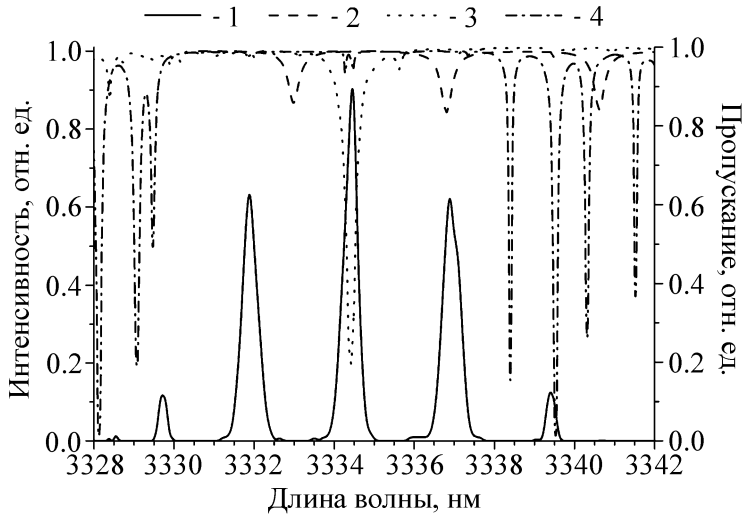


Рис. 4: *(1) – спектр генерации Cr^{2+}:CdSe-лазера с внутрирезонаторной селекцией (спектральное разрешение* 0.5 *нм). (2), (3), (4) – спектры пропускания этана (2), метана (3) и паров воды (4), соответственно.*

линиях поглощения метана, этана и линии, свободной от поглощения в атмосфере. Исследованный лазер, генерирующий в диапазоне 3.3 мкм, обладает высокой эффективностью (относительно потребляемой электрической мощности $\sim$2%), достаточной энергетикой и частотой следования импульсов, компактностью и простотой оптической схемы. Предложенный вариант лазерного источника потенциально превосходит все известные излучатели, применяемые в современных российских лидарах, по ряду параметров, таких как мощностные и весогабаритные и пр., что делает его перспективным источником для систем дистанционной диагностики утечек углеводородов из газопроводов с размещением на легкомоторном летательном аппарате.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-2896.2013.2.

Л И Т Е Р А Т У Р А

[1] В. О. Петухов, В. А. Горобец, Ю. М. Андреев, Г. В. Ланский, Квантовая электроника **40**(2), 173 (2010).

[2] M. V. Kabanov, Yu. M. Andreev, P. P. Geiko, Proc. II Int. Conf. Reduce of Metane Mitigation, Novosibirks, 2000 (Novosibirsk State Techn. Univ., 2000), p. 5.

[3] В. А. Акимов, В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин и др., Квантовая электроника **38**(3), 205 (2008).

[4] М. А. Губин, А. Н. Киреев, Ю. В. Коростелин и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(7), 34 (2011).

[5] В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин, А. И. Ландман и др., Квантовая электроника **40**(1), 7 (2010).

[6] J. McKay, K. L. Schepler, G. C. Catella, Optics Letters **24**, № 22, 1575 (1999).

[7] V. A. Akimov, M. P. Frolov, Yu. V. Korostelin, et al., Phys. Status Solidi C **3**, 1213 (2006).

Поступила в редакцию 11 февраля 2015 г.