

Исследование $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с модуляцией усиления, накачиваемого излучением $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазера с акустооптической модуляцией добротности*

Джинь-Хе Юань, Ю Чен, Хонг-Ю Янг, Бао-Куань Яо,
Ксяо-Минг Дуан, Тонг-Ю Дай, Ю-Лун Джу

Демонстрируется $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер с модуляцией усиления, накачиваемый излучением $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазера высокой энергии. Получена максимальная выходная мощность 5.5 Вт в спектральном диапазоне 2.45–2.57 мкм при частоте следования импульсов 2 кГц, что соответствует энергии импульса 2.75 мДж. С использованием объемной решетки Брэгга для сужения линии получена выходная мощность излучения 2.4 Вт на длине волны 2570.5 нм при ширине линии менее 1 нм. Исследованы также параметры импульсов, полученных при различных энергиях накачки. Достигнута минимальная длительность импульса ~ 28.5 нс при энергии импульса накачки 14.6 мДж, что соответствует пиковой мощности излучения ~ 96.5 кВт.

Ключевые слова: инфракрасные источники, модуляция усиления, халькогениды.

Лазеры среднего ИК диапазона ($\lambda = 2-3$ мкм) весьма востребованы для множества приложений, включая лазерные радары, дистанционное зондирование атмосферы, медицинскую диагностику и оптическую связь. Мощные импульсные лазеры, работающие в этом диапазоне длин волн, могут также использоваться для накачки оптических параметрических генераторов (ОПГ) и/или для генерации разностной частоты (ГРЧ) с целью получения более длинноволнового ИК излучения [1]. Все это стимулирует поиск и исследование новых усиливающих сред для источников среднего ИК диапазона. Халькогениды типа II–VI (т. е. состоящие из элементов II и VI групп периодической системы элементов), легированные ионами переходных металлов (ПМ), были впервые предложены в качестве эффективных усиливающих сред среднего ИК диапазона в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (США), поскольку они обладают благоприятными спектроскопическими характеристиками, такими как предельно широкие полосы поглощения и испускания [2–4]. Широкие полосы поглощения позволяют осуществлять накачку легированных ПМ халькогенидов типа II–VI с помощью разнообразных источников, а широкая полоса испускания способствует работе лазера в режиме перестройки частоты. Среди указанных соединений наибольшее внимание было сосредоточено на $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, поскольку $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ обладает наиболее благоприятным сочетанием спектроскопических, оптических и тепловых свойств [4].

На сегодня $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ широко исследован в качестве активной среды лазеров, работающих в непрерывном режиме [5–9], режиме синхронизации мод [10–14] и в режиме модуляции усиления [15–18]. В 1999 г. был продемонстрирован перестраиваемый $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер непрерывного действия с дифференциальной эффективностью 63% [8]. В 2015 г. рекордная выходная мощность в непрерывном режиме составила 13.9 Вт на $\lambda = 2.94$ мкм и 27.5 Вт на $\lambda = 2.45$ мкм [9]. Что касается режима синхронизации мод, то с момента первого сообщения [10] неоднократно демонстрировались пикосекундные [10, 12] и фемтосекундные [11, 13, 14] импульсные лазеры. Другим эффективным подходом к получению наносекундных лазерных импульсов, которые можно использовать для накачки ОПГ и ГРЧ, является технология модуляции усиления.

Основные результаты исследования $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеров с модуляцией усиления можно суммировать следующим образом. В 2001 г. поступило сообщение о накачиваемом с помощью $\text{Tm}:\text{YALO}$ -лазера $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазере с модуляцией усиления, который использовался для накачки ОПГ на ZnGeP_2 [1]. В 2004 г. был продемонстрирован $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер с модуляцией усиления и накачкой излучением $\text{Tm}:\text{YALO}$ -лазера с модуляцией добротности. Была достигнута максимальная выходная мощность 18.5 Вт при энергии 2.64 мДж, частоте следования импульсов $f = 7$ кГц и длительности импульса примерно 100 нс [15]. В 2006 г. удалось создать $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер с модуляцией усиления с энергией импульса 2 мДж, но с дифференциальной эффективностью лишь 5% [16]. В 2013 г. был продемонстрирован работающий на $\lambda = 1.907$ мкм $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер с модуляцией усиления и накачкой излучением $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера с модуляцией добротности и с комбинационным сдвигом частоты в молекулярном водороде [17]. Максимальная энергия импульса составила 20 мДж при $f = 10$ Гц. С использованием $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазера с модуляцией добротности в качестве источника накачки на $\lambda = 2.09$ мкм для $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с модуляцией усиления в работе [17] были также получены импульсы с энергией 3.7 мДж (при $f = 100$ Гц) и длительностью 2.5–5 нс. В

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

J.H.Yuan, Y.Chen, H.Y.Yang, B.Q.Yao, X.M.Duan, T.Y.Dai, Y.L.Ju.
National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin
Institute of Technology, Harbin 150001, China;
email: yaobq08@hit.edu.cn

Поступила в редакцию 14 июня 2016 г., после доработки – 8 июля 2016 г.

2014 г. был продемонстрирован $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер с модуляцией усиления, обладавший ультранизким порогом генерации, с минимальной длительностью импульсов 1.75 нс и энергией 0.5 мДж при $f = 20$ Гц, накачиваемый излучением $\text{Tm}:\text{YLF}$ -лазера с диодной накачкой [18]. Между тем, технология $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазеров на $\lambda = 2.09$ мкм является достаточно развитой для получения высокой выходной мощности и энергии, что делает указанный лазер подходящим кандидатом для использования в качестве источника накачки $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с модуляцией усиления [17].

В настоящей работе мы использовали $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазер с акустооптической модуляцией добротности как источник накачки для $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с модуляцией усиления. При $f = 2$ кГц были одновременно получены относительно высокая выходная мощность и энергия вблизи $\lambda = 2.520$ мкм. С использованием объемной решетки Брэгга (ОРБ) для сужения спектра генерации длина волны излучения на выходе была стабилизирована на $\lambda = 2570.5$ нм при ширине линии менее 1 нм.

Схема установки $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с модуляцией усиления показана на рис.1. Установка состоит из двух частей. Одна из них представляет собой $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазер с активной модуляцией добротности, который служит источником накачки, а другая – $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер с модуляцией усиления, имеющий U-образный резонатор. Накачка кристалла $\text{Ho}:\text{YAG}$ производится с двух сторон ортогонально поляризованными излучениями на $\lambda = 1.908$ мкм двух $\text{Tm}:\text{YLF}$ -лазеров с максимальной выходной мощностью каждого 60 Вт. Оба пучка накачки сфокусированы в центр кристалла $\text{Ho}:\text{YAG}$ с радиусом перетяжки ~ 0.73 мм. Резонатор $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазера состоит из четырех зеркал. Зеркало 31 – вогнутое с радиусом кривизны 200 мм и с покрытием, хорошо отражающим излучение на $\lambda = 2.1$ мкм и не отражающим излучение на $\lambda = 1.91$ мкм. Зеркала 32 и 33 – дихроичные, хорошо отражающие излучение на $\lambda = 2.1$ мкм и не отражающим на $\lambda = 1.91$ мкм. Вогнутое выходное зеркало (ВЗ) В34 имеет

коэффициент пропускания 69% на $\lambda = 2.1$ мкм и радиус кривизны 5 м. В качестве активного модулятора добротности использован акустооптический модулятор (АОМ) типа QS041-10M-Н18. Эталон Фабри–Перо толщиной 0.05 мм расположен под углом Брюстера, обеспечивая вывод s-поляризованного лазерного излучения. Активным элементом служит легированный Ho^{3+} (0.3%) кристалл $\text{Ho}:\text{YAG}$ диаметром 5 мм и длиной 100 мм. Полная длина резонатора $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазера составляет 530 мм.

Пучок накачки от $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазера фокусируется в центр кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ в пятно радиусом ~ 0.5 мм. Зеркала 36 и 37 – дихроичные, хорошо отражающие излучение на $\lambda = 2.5\text{--}2.8$ мкм (s-поляризация) и пропускающие излучение на $\lambda = 2.09$ мкм (p-поляризация). Для изменения s-поляризации пучка $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазера на p-поляризацию использовалась полуволновая пластинка. Кристалл $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ с концентрацией 3.96×10^{18} см $^{-3}$ ионов Cr^{2+} имел размеры 5×10.1 мм в поперечном сечении и 11.7 мм в длину. Кристалл $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ был смонтирован в медном радиаторе с водяным охлаждением, температура которого поддерживалась равной 18°C. Оба расстояния между зеркалами 36 и 37 и торцами кристалла составляли 15 мм, а расстояния между зеркалами 35 и 36, 37 и В31 – 30 и 40 мм соответственно. В экспериментах по свободной генерации с модуляцией усиления в качестве 35 бралось вогнутое зеркало с радиусом кривизны 300 мм, хорошо отражающее излучение на $\lambda = 2.3\text{--}2.7$ мкм и хорошо пропускающее его на $\lambda = 2.09$ мкм. А в качестве выходного зеркала использовалось плоское зеркало (В31) с коэффициентом пропускания 30% на $\lambda \sim 2.6$ мкм. В эксперименте с ОРБ, хорошо отражающей на $\lambda \sim 2.57$ мкм, в резонаторе для селекции длины волны 35 заменяли на ОРБ, а на выходе использовалось вогнутое зеркало с радиусом кривизны 200 мм и коэффициентом пропускания 52.8% на $\lambda \sim 2.6$ мкм (В32).

На рис.2 представлены выходные характеристики $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазера с акустооптической модуляцией добротности, излучающего на длине волны $\lambda = 2.09$ мкм. При $f =$

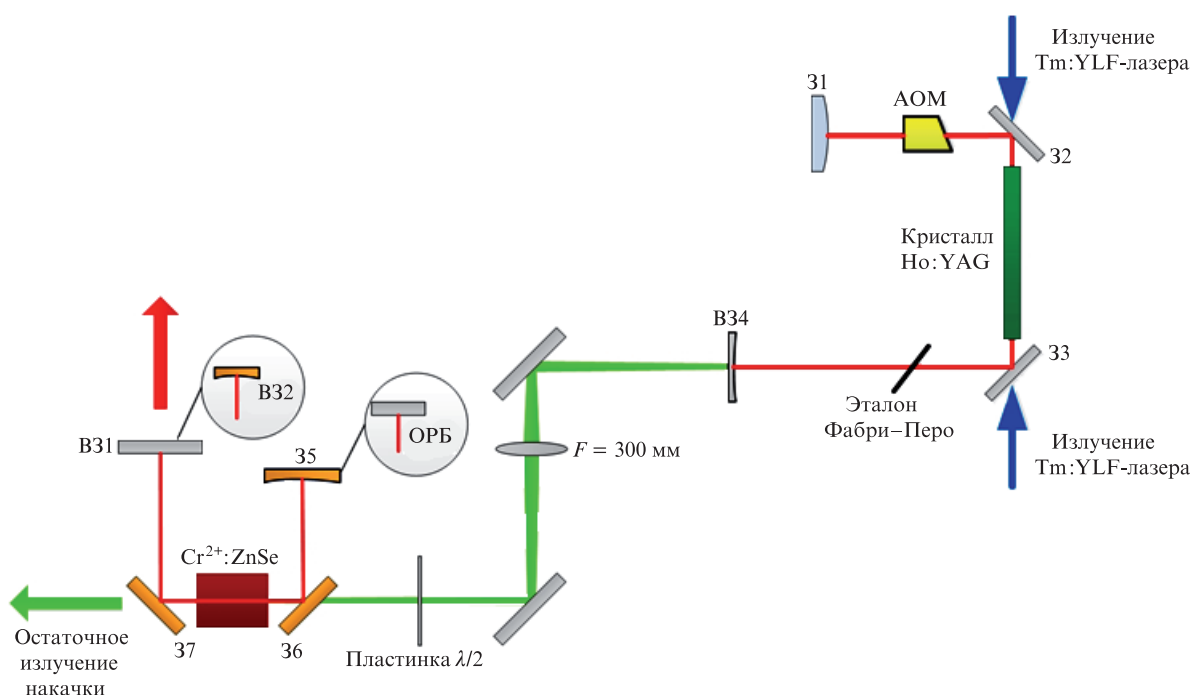


Рис.1. Экспериментальная установка $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с модуляцией усиления.

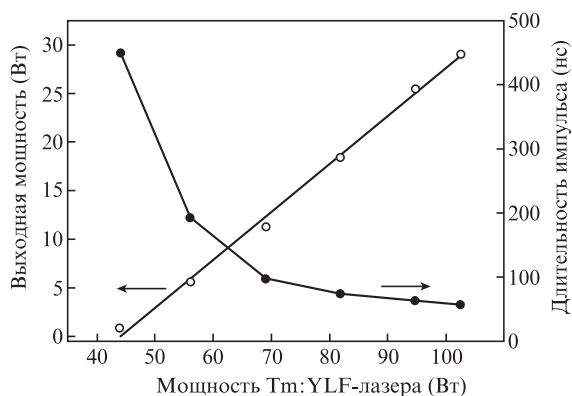
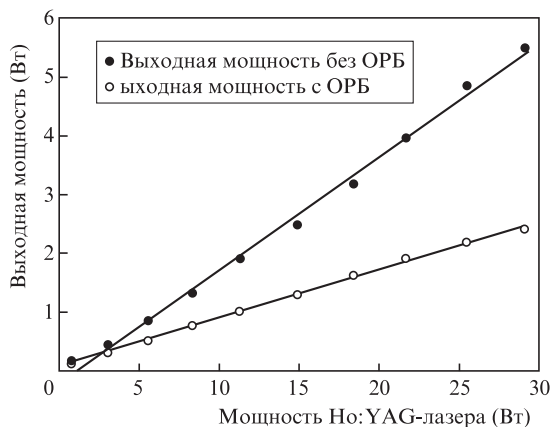
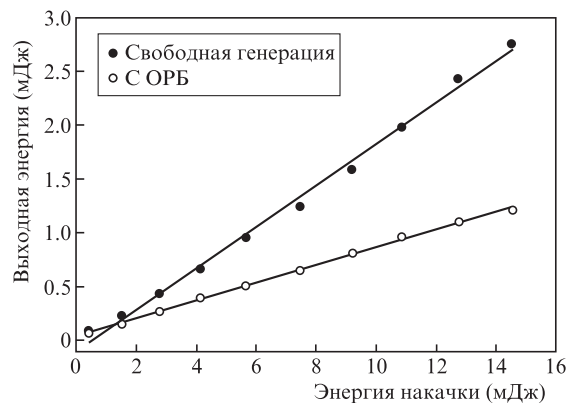


Рис.2. Выходные характеристики Ho:YAG-лазера.

2 кГц лазер мог генерировать выходную мощность около 29.2 Вт при мощности излучения накачки около 102.5 Вт, что соответствует дифференциальной эффективности 49.4% по отношению к мощности излучения накачки, падающего на кристалл. С увеличением мощности накачки от 43 до 102.5 Вт длительность импульсов Ho:YAG-лазера уменьшалась от 450 до 57 нс. Фактор качества пучка M^2 для Ho:YAG-лазера был менее 1.2.

Зависимости выходной мощности $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от мощности накачки при $f = 2$ кГц представлены на рис.3. Максимальная выходная мощность $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с модуляцией усиления в режиме свободной генерации составила 5.5 Вт, а с использованием ОРБ – 2.4 Вт. Соответствующие дифференциальные эффективности относительно мощности падающего на кристалл излучения накачки равны 19.0% и 8.3%. По отношению к поглощенной мощности накачки дифференциальные эффективности возросли бы до 44.8% и 26% соответственно. При этом в обоих режимах пороги лазерной генерации очень малы (~ 0.6 Вт). На рис.4 представлены зависимости выходной энергии $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от энергии накачки. Выходная энергия растет линейно с увеличением энергии накачки. Максимальные энергии импульсов на выходе в режиме свободной генерации и при наличии ОРБ в резонаторе составляли 2.75 и 1.2 мДж соответственно.

На рис.5 показаны профили импульсов излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при различных энергиях накачки, зарегистрированные с помощью цифрового осциллографа Лесгоу (600 МГц) и HgCdTe-детектора. На рис.6 показаны соответствующие профили импульсов накачки. Как

Рис.3. Выходная мощность $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера.Рис.4. Выходная энергия $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в зависимости от энергии накачки.

видно из рис.5, импульс генерации не может полностью сформироваться при низкой энергии накачки, но по мере ее роста он становится более регулярным и симметричным. При наибольшей энергии накачки $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер выдает чистый и короткий импульс излучения. Разумным объяснением экспериментально наблюдаемых явлений могло бы быть то, что накачка в виде длинного импульса при малой энергии не используется полностью в течение первого импульса релаксационных колебаний, так что оставшаяся часть импульса накачки производит длинный хвост импульса генерации после основного импульса. Однако по мере роста энергии и сокращения длительности импульса накачки хвост импульса генерации становится интенсивнее и короче. Когда импульс накачки достаточно мощный и короткий, остается только основной лазерный импульс, который становится чистым и коротким, как и показано на рис.5,з. Самый короткий, полностью сформировавшийся импульс имел длительность ~ 28.5 нс, а соответствующая пиковая мощность равнялась 96.5 кВт.

На рис.7 показаны спектры излучения $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. В режиме свободной генерации выходной спектр очень широкий, простирается от 2450 до 2570 нм с максимумом на длине волны ~ 2520 нм. Можно связать широкий выходной спектр лазера с широким спектром испускания $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$. При использовании ОРБ в резонаторе для селекции длины волны спектр генерации резко сужается и трансформируется в линию шириной менее 1 нм на $\lambda = 2570.5$ нм. Это говорит об эффективности ОРБ для селекции длины волны и сужения линии излучения лазера. Рисунок 8 иллюстрирует изменение сечения пучка $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с ОРБ на различных расстояниях от фокусирующей линзы. Пучок фокусируется линзой с фокусным расстоянием 100 мм. Оценка фактора качества M^2 с помощью теневого метода Фуко 90/10 дала 2.83.

В заключение формулируем основные результаты работы. Нами продемонстрирован $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер с модуляцией усиления, для накачки которого использован мощный Ho:YAG-лазер, излучающий на длине волны 2.09 мкм. При частоте следования импульсов 2 кГц была получена максимальная выходная мощность 5.5 Вт при энергии импульса 2.75 мДж. Изучена и проанализирована форма импульса генерации при различных энергиях накачки и достигнута минимальная длительность импульса ~ 28.5 нс, соответствующая пиковой мощности ~ 96.5 кВт. В режиме свободной генерации выходной спектр простирался от 2450 до 2570 нм. При использова-

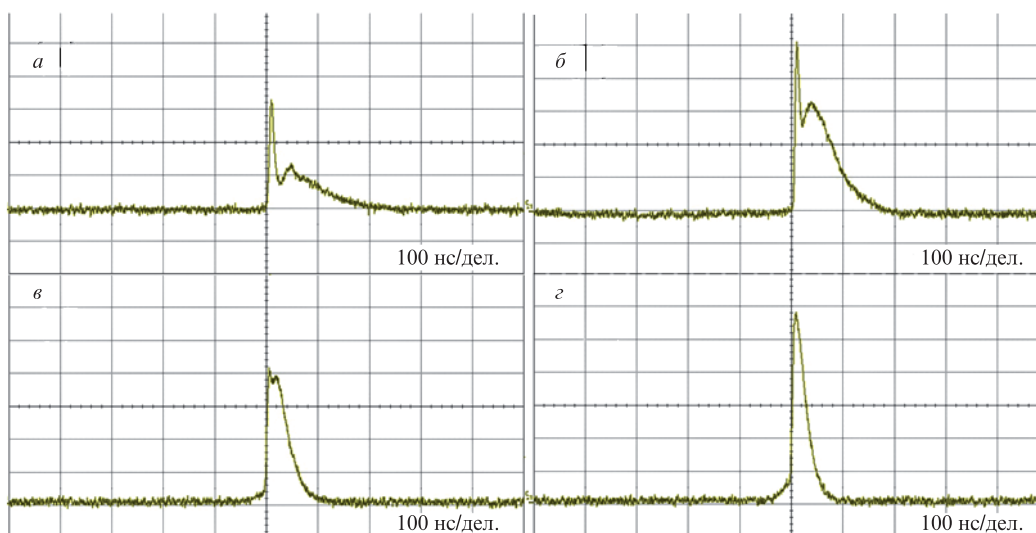


Рис.5. Профили импульсов излучения Cr²⁺:ZnSe-лазера при энергиях накачки 0.4 (а), 4.2 (б), 10.9 (в) и 14.6 мДж (з).

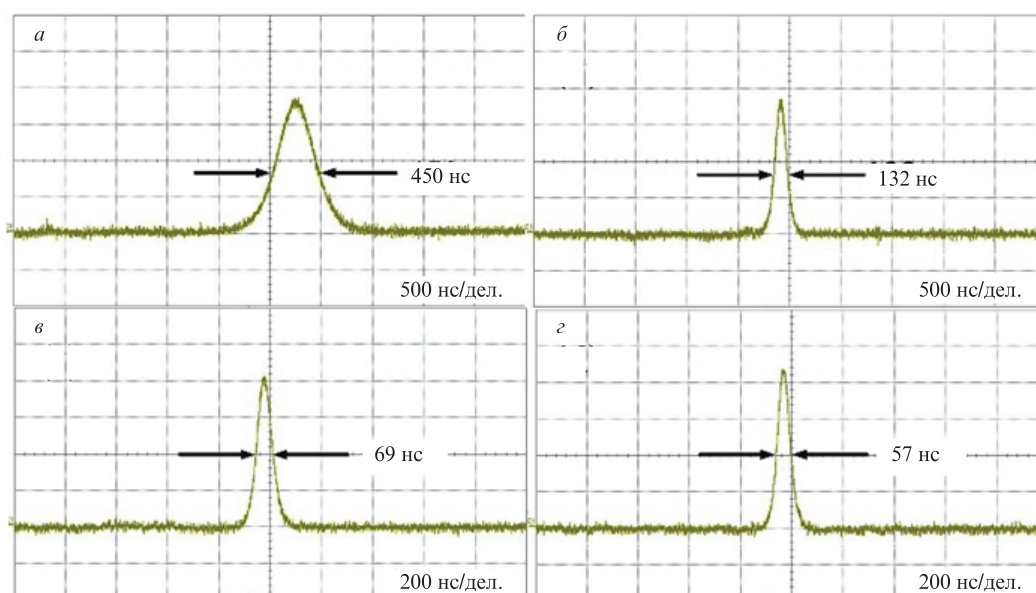


Рис.6. Профили импульсов излучения Ho:YAG-лазера при энергиях 0.4 (а), 4.2 (б), 10.9 (в) и 14.6 мДж (з).

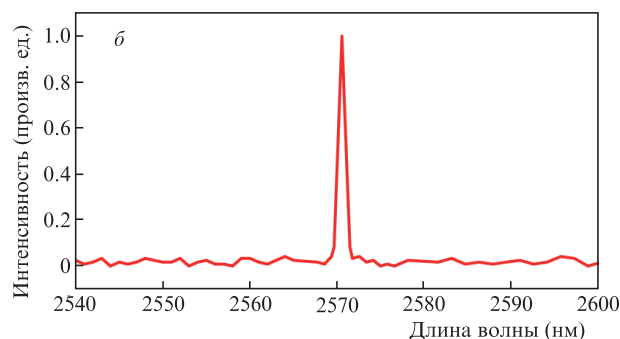
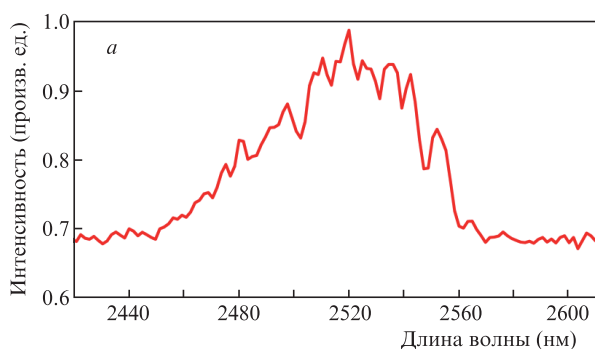


Рис.7. Спектры лазерного излучения в режиме свободной генерации (а) и при использовании ОРБ (б).

нии в резонаторе ОРБ длина волны генерации составила 2570.5 нм при ширине линии менее 1 нм, а максимальная мощность – 2,4 Вт, что соответствовало энергии импульса 1.2 мДж.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (гранты № 61308009, 61405047 и

51572053), Китайским фондом исследований, проводимых учеными после защиты докторской диссертации (проект 2015T80339), Фондом фундаментальных исследований Центрального университета (гранты HIT. NSRIF. 2014044, HIT. NSRIF. 2015042), Фондом поддержки выдающихся молодых ученых провинции Хэйлуцзян

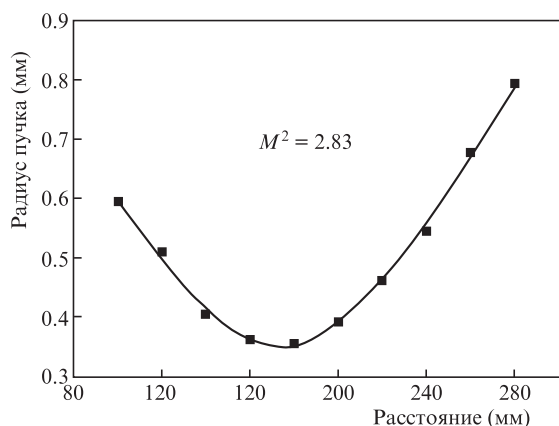


Рис.8. Зависимость радиуса сечения пучка $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от расстояния до фокусирующей линзы.

(JQ201310) и Фондом провинции Хэйлуцзян для поддержки исследований, проводимых учеными после защиты докторской диссертации (проект LBH-Z14085).

1. Pelouch W.S., Wagner G.J., Carrig T.J., Scharpf W.J. *OSA Trends Opt. Photon.*, **50**, 670 (2001).
2. DeLoach L.D., Page R.H., Wilke G.D., Payne S.A., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 885 (1996).
3. Page R.H., Shaffers 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).
4. Mirov S.B., Fedorov V.V., Martyshkin D., Moskalev I.S., Mirov M., Vasilyev S. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21**, 1601719 (2015).
5. Page R.H., Skidmore J.A., Schaffers K.I., Beach R.J., Payne S.A., Krupke W.F. *OSA Trends Opt. Photon.*, **10**, 208 (1997).
6. Sorokin E., Sorokina I.T., Page R.H. *OSA Trends Opt. Photon.*, **46**, 101 (2001).
7. Mond M., Heumann E., Huber G., Kretschmann H., Kuck S., Podlipensky A.V., Shcherbitsky V.G., Kuleshov N.V., Levchenko V.I., Yakimovich V.N. *OSA Trends Opt. Photon.*, **46**, 162 (2001).
8. Wagner G.J., Carrig T.J., Page R.H., Schaffers K.I., Ndap J., Ma X., Burger A. *Opt. Lett.*, **24**, 19 (1999).
9. Mirov S., Fedorov V., Martyshkin D., Moskalev I., Mirov M., Vasilyev S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9467**, 94672K (2015).
10. Carrig T.J., Wagner G.J., Sennaroglu A., Jeong J.Y., Pollock C.R. *Opt. Lett.*, **25**, 168 (2000).
11. Cizmeciyan M.N., Cankaya H., Kurt A., Sennaroglu A. *Opt. Lett.*, **34**, 3056 (2009).
12. Dherbecourt J.B., Denoed A., Melkonian J.M., Raybaut M., Godard A., Lefebvre M., Rosencher E. *Opt. Lett.*, **36**, 751 (2011).
13. Cizmeciyan M.N., Kim J.W., Bae S., Hong B.H., Rotermund F., Sennaroglu A. *Opt. Lett.*, **38**, 341 (2013).
14. Vasilyev S., Mirov M., Gapontsev V. *Opt. Express*, **22**, 5118 (2014).
15. Carrig T.J., Wagner G.J., Alford W.J., Zakel A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5460**, 74 (2004).
16. Gallian A., Fedorov V.V., Mirov S.B. *Opt. Express*, **14**, 11694 (2006).
17. Mirov S.B., Fedorov V.V., Moskalev I.S., Vasilyev S., Martyshkin D.V., Mirov M.S., Gapontsev V. *CLEO:2013 Techn.Digest* (SA, 2013, paper CTu3D.1).
18. Gorajek L., Jabczynski J.K., Kaskow M. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 045803 (2014).