

Импульсно- периодический Fe:ZnSe лазер со средней мощностью излучения 20 Вт при комнатной температуре поликристаллического активного элемента

С. Д. Великанов, Е. М. Гаврищук¹,
Н. А. Зарецкий, А. В. Захряпа,
В. Б. Иконников¹, С. Ю. Казанцев²,
И. Г. Кононов², А. А. Манешкин,
Д. А. Машковский², Е. В. Салтыков,
К. Н. Фирсов², Р. С. Чуваткин, И. М. Юткин

Исследованы спектрально-временные и энергетические характеристики Fe:ZnSe лазера в импульсном и импульсно-периодическом режимах работы при комнатной температуре поликристаллического активного элемента. Накачка кристалла осуществлялась нецепным электроразрядным HF лазером. В моноимпульсном режиме достигнута энергия излучения Fe:ZnSe лазера 1,67 Дж при кнд по поглощенной в кристалле и падающей на кристалл энергии ~43 и ~27 % соответственно. В импульсно-периодическом режиме получена средняя мощность излучения лазера ~20 Вт с энергией в отдельном импульсе ~1 Дж при частоте следования импульсов 20 Гц. Кнд по поглощенной в кристалле мощности составил ~40 %.

Введение

Лазеры на кристаллах селенида цинка, легированного двухвалентными ионами железа, активно исследуются уже более 15 лет [1–25]. В основном, усилия исследователей направлены на увеличение энергии в импульсе и средней мощности излучения, что определяется широким спектром возможных применений Fe:ZnSe лазера для спектроскопии молекул, физических экспериментов при высоких плотностях потоков излучения, мониторинга окружающей среды, в медицине и т. п. [6, 7, 17, 24]. Накачка кристаллов осуществляется лазерами, генерирующими в трехмикронном диапазоне длин волн. В настоящее время самые высокие значения энергии генерации

© Квантовая электроника, 2017. Т. 47, № 4. С. 303–307.

1 – ИХВВ РАН, Н. Новгород.

2 – ИОФ РАН, г. Москва.

и средней мощности Fe:ZnSe лазера достигнуты при температуре активных элементов, близкой к температуре жидкого азота. В [22] получена энергия в импульсе 10,6 Дж, в [21] средняя мощность излучения импульсно-периодического лазера составила 35 Вт при частоте следования импульсов 100 Гц. Кристаллы в [21, 22] накачивались Er:YAG лазерами, работавшими в режиме свободной генерации.

Для практических применений привлекательна возможность функционирования лазера при комнатной температуре или при неглубоком охлаждении активного элемента. Из-за малого времени жизни верхнего лазерного состояния в кристалле Fe:ZnSe накачка в этих условиях должна производиться короткими импульсами излучения [7, 25]. Идеальными источниками накачки, по совокупности характеристик не имеющими конкурентов в трехмикронном диапазоне длин волн, в данном случае являются нецепные электроразрядные HF(DF) лазеры, способные функционировать как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режиме генерации [12, 26–29]. При накачке кристаллов HF лазером получены самые высокие в настоящее время значения энергии в импульсе и средней мощности Fe:ZnSe лазера при комнатной температуре. На поликристаллических активных элементах с большими поперечными размерами достигнута энергия генерации 1,43 Дж при полном КПД по поглощенной в кристалле энергии 48 % [23]. Работа Fe:ZnSe лазера, возбуждаемого импульсно-периодическим HF лазером, продемонстрирована в [11, 12]. В [12] получена средняя мощность излучения 2,4 Вт с энергией в отдельном импульсе 14 мДж. Частота следования импульсов в работах [11, 12] достигала 200 Гц. Для некоторых приложений представляет интерес функционирование Fe:ZnSe лазера при более низких частотах следования импульсов (10–20 Гц), но в условиях значительно более высоких значений энергии в отдельном импульсе.

Целью настоящей работы является демонстрация возможности достижения большой средней мощности генерации Fe:ZnSe лазера, возбуждаемого при комнатной температуре излучением импульсно-периодического HF лазера с частотой следования импульсов 10–20 Гц.

Экспериментальная установка

Технология изготовления активного элемента Fe:ZnSe лазера в форме диска диаметром 60 мм и толщиной 4 мм не отличалась от технологии изготовления активных элементов с большими поперечными размерами, подробно рассматривавшейся в [23]. Из предварительно выращенной методом химического газофазного осаждения поликристаллической пластины ZnSe по методике, описанной в [30], был вырезан диск с нужными размерами, противоположные торцы диска отполированы, и на них методом электронно-лучевого испарения нанесены тонкие пленки железа. Легирование кристалла ионами железа проводилось в процессе его высокотемпературной газостатической обработки в атмосфере аргона при давлении 100 МПа и температуре 1270 °С в течение 126 ч. С целью уменьшения загрязняющего действия материала аппаратуры и скорости процесса массопереноса за счет сублимации образец при газостатической обработке помещался в контейнер из высокочистого графита. Особенности процессов, протекающих при высокотемпературной газостатической обработке поликристаллов халькогенидов цинка, подробно проанализированы в работе [31]. После легирования кристалл был отполирован, угол между полированными гранями не превышал 30°. Большой диаметр активного элемента позволяет работать с большими размерами пятна излучения накачки на его поверхности (т. е. при больших величинах энергии накачки) без угрозы развития поперечной паразитной генерации [23, 32]. В предварительных экспериментах было установлено, что при использовании в качестве активного элемента

описанного образца паразитная генерация не развивается при размерах пятна накачки на поверхности до 16 мм.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Резонатор Fe:ZnSe лазера длиной 120 мм был образован вогнутым медным зеркалом $З_1$ с радиусом кривизны 1 м и плоским выходным зеркалом $З_2$, имевшим коэффициент отражения 60 % на длинах волн $\lambda = 4,1-4,8$ мкм.

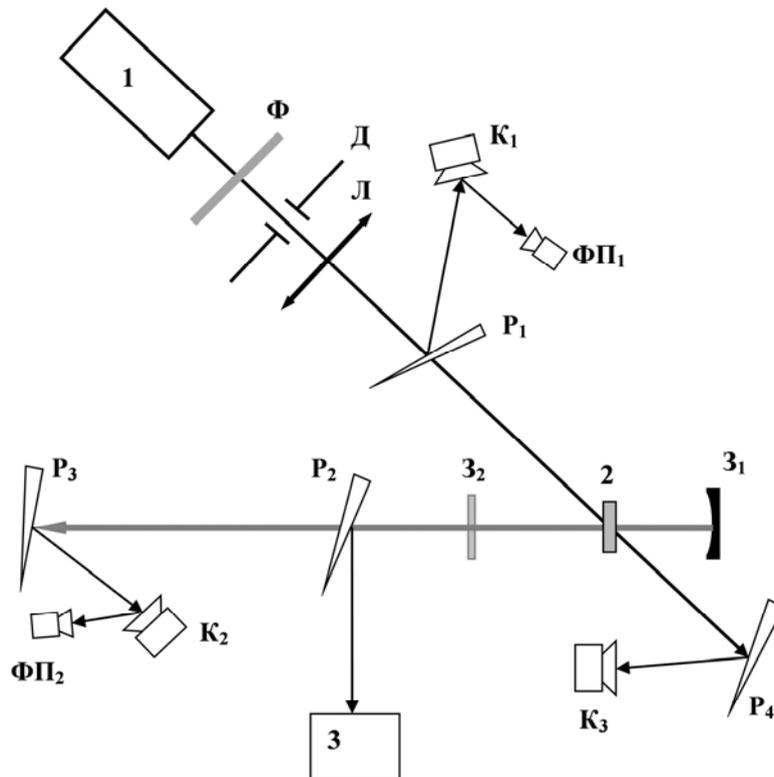


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – HF лазер; Ф – набор светофильтров; Д – диафрагма диаметром 80 мм; Л – линза; P_1-P_4 – светоделительные клинья из CaF_2 ; K_1-K_3 – калориметры; 2 – кристалл Fe:ZnSe; $З_1, З_2$ – зеркала резонатора Fe:ZnSe лазера; 3 – монохроматор с линейкой пироэлектрических приемников на выходе

Активный элемент возбуждался излучением нецепного импульсно-периодического HF лазера с полностью твердотельным генератором накачки, описанного в [28]. Пучок этого лазера, ослабляемый набором светофильтров, обрезался диафрагмой диаметром 80 мм и фокусировался на поверхность активного элемента сферической линзой Л с фокусным расстоянием 1 м в пятно эллиптической формы с размерами осей $a \times b = 14 \times 16$ мм (90 % энергии падающего на поверхность излучения). Угол падения излучения накачки на поверхность кристалла составлял $\sim 20^\circ$. Кристалл устанавливался так, чтобы одна из его полированных граней была перпендикулярна оптической оси резонатора. Величины энергии падающего на образец излучения HF лазера, прошедшего через образец излучения, и излучения Fe:ZnSe лазера измерялись калориметрами K_1-K_3 с пироэлектрическими измерительными головками COHERENT J-50MB-HE. Контроль форм импульсов излучения Fe:ZnSe и HF лазеров осуществлялся фотоприемниками ФП₁ и ФП₂ фирмы «Vigo-system Ltd» с временным разрешением ~ 1 нс. Фотоприемники регистрировали излучение, рассеиваемое приемными площадками соответствующих калориметров. Спектры генерации Fe:ZnSe лазера

снимались с помощью монохроматора MS 2004 («SOLAR ТП) с дифракционной решеткой 75 штр/мм. На выходе монохроматора была установлена линейка пироэлектрических фотоприемников APD марки HPL-256-500 (HEIMANN Sensor), состоящая из 256 элементов при длине приемной части 12,8 мм.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Моноимпульсный режим генерации

На рис. 2 приведена зависимость энергии генерации Fe:ZnSe лазера от падающей на кристалл энергии накачки, снятая в моноимпульсном режиме работы HF лазера. Коэффициент пропускания кристалла на длинах волн накачки в условиях генерации Fe:ZnSe лазера при энергии накачки более 1,8 Дж (плотность падающей на кристалл энергии более 1 Дж/см²) составлял ~19 %. Как видно из рисунка, максимальная энергия генерации достигает 1,67 Дж (при КПД по падающей на кристалл и поглощенной в кристалле энергии накачки 27 и 43 % соответственно), что превышает максимальную величину энергии 1,43 Дж, полученную ранее в [23] при комнатной температуре активных элементов с большими поперечными размерами. Однако в процессе экспериментов было обнаружено, что при величинах энергии накачки более 4,5 Дж после нескольких импульсов (пять и более) выходная поверхность кристалла (по отношению к падающему пучку) заметно повреждалась. Разрушение поверхности фиксировалось лишь при наличии генерации Fe:ZnSe лазера, при перекрытии резонатора непрозрачным экраном поверхность не разрушалась даже при максимальной в настоящих экспериментах энергии накачки 6,2 Дж (плотность энергии накачки ~3,5 Дж/см²).

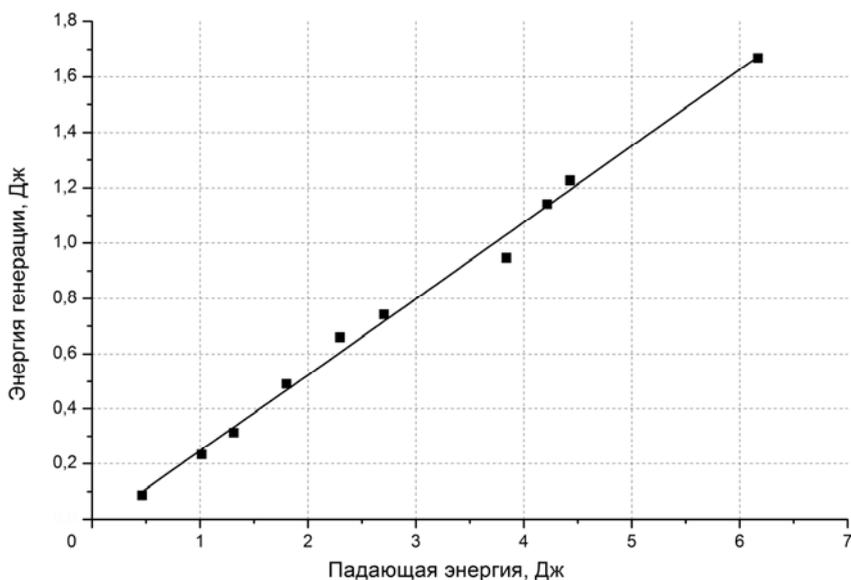


Рис. 2. Зависимость энергии генерации Fe:ZnSe лазера от падающей на кристалл энергии накачки

На рис. 3 приведены формы импульсов генерации Fe:ZnSe и HF лазеров, снятые в моноимпульсном режиме накачки при падающей на кристалл энергии ~ 4 Дж. Как видно из рисунка, длительность импульса излучения HF лазера по полуамплитуде составляет ≈ 210 нс. Импульс Fe:ZnSe лазера имеет выраженный короткий и мощный передний пик, характерный для условий высоких плотностей энергии накачки [18], на импульсе также видны релаксационные колебания [11]. При работе в частотном режиме формы импульсов хорошо воспроизводились.

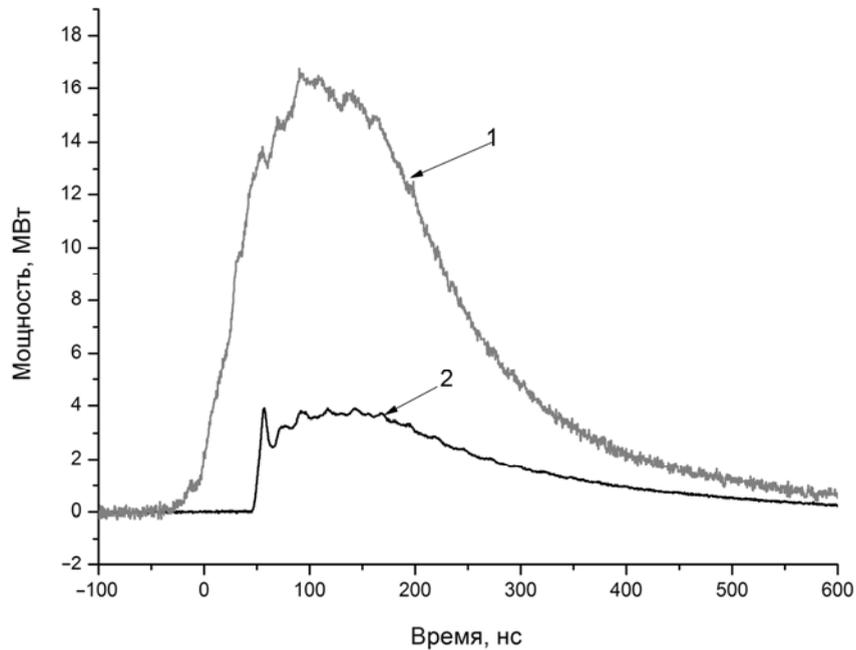


Рис. 3. Импульсы генерации HF (1) и Fe:ZnSe (2) лазеров. Падающая на кристалл энергия накачки 4 Дж

На рис. 4 приведен спектр излучения Fe:ZnSe лазера, усредненный по 10 импульсам. Из рисунка видно, что лазер генерирует в области длин волн $\lambda > 4300$ нм. В области $\lambda < 4200$ нм генерацию можно было обнаружить лишь чувствительным фотоприемником, устанавливаемым за выходной щелью монохроматора. Такая же ситуация наблюдалась ранее в работе [11] при регистрации спектров Fe:ZnSe лазера линейкой пироэлектрических приемников. Анализ осциллограмм импульсов излучения лазера, снятых с помощью фотоприемника (за выходной щелью монохроматора устанавливался фотоприемник ФП₂) на разных длинах волн также подтвердил отмеченные ранее в работе [11] общие закономерности. Импульс Fe:ZnSe лазера в области $\lambda < 4200$ нм имеет форму короткого пика (длительность импульса по полуамплитуде ~ 7 нс) с низкой в целом энергией, поэтому его регистрация пироэлектрическими приемниками и затруднена. При длинах волн $\lambda \geq 4350$ нм к пику добавляется «хвост», длительность и амплитуда которого растут относительно пика с увеличением длины волны. На рис. 5 приведены для сравнения формы импульсов излучения Fe:ZnSe лазера, снятые на длинах волн $\lambda = 4175$ и 4500 нм.

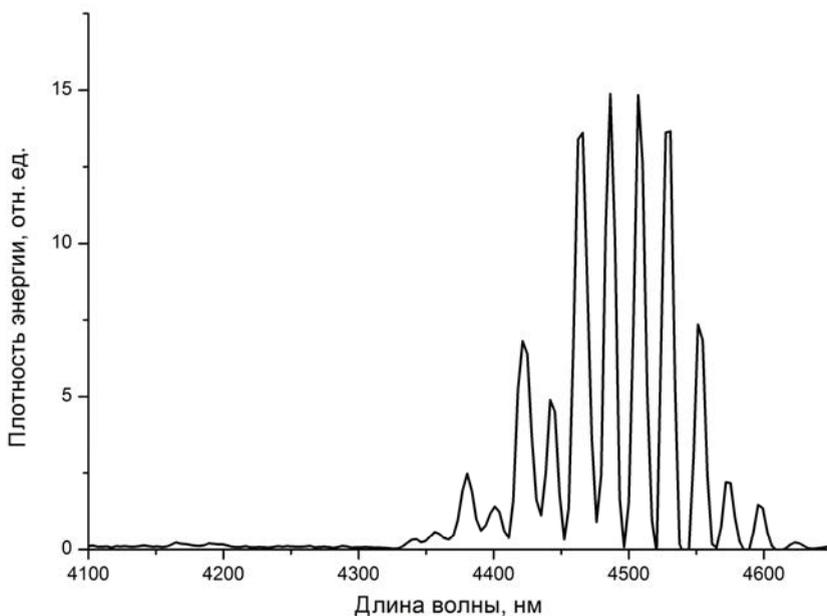


Рис. 4. Спектр генерации Fe:ZnSe лазера. Усреднение по 10 импульсам

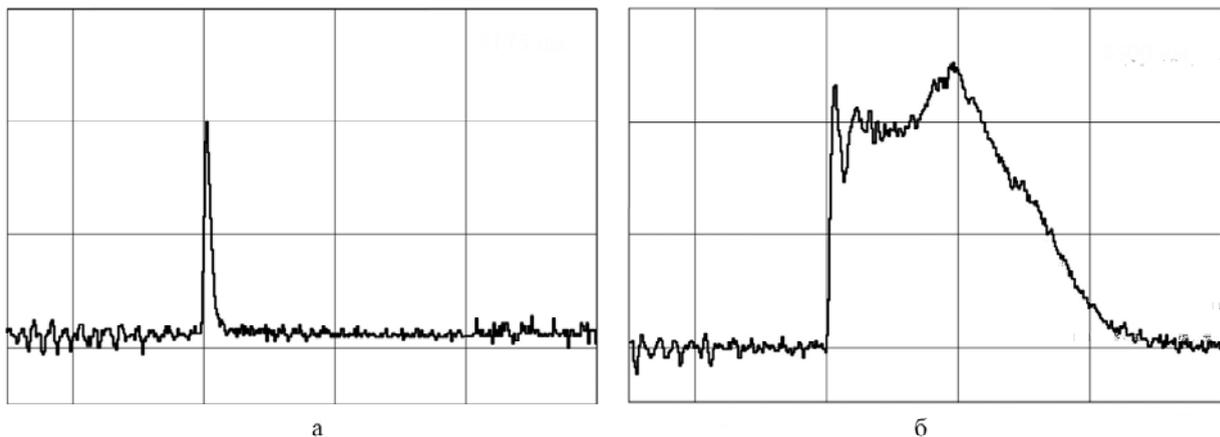


Рис. 5. Осциллограммы импульсов излучения Fe:ZnSe лазера на разных длинах волн: а – $\lambda = 4175$ нм; б – $\lambda = 4500$ нм. Развертка 100 нс/дел

На рис. 6 приведена фотография отпечатка пучка Fe:ZnSe лазера на термобумаге. Отпечаток был получен на расстоянии 30 см от выходного зеркала резонатора. Как и пучок накачки, пучок генерации в сечении имеет эллиптическую форму. На отпечатке видна заметная неоднородность распределения плотности энергии генерации по пятну. Очевидно, что при больших размерах пятна накачки (геометрия дискового лазера) для получения более качественных пучков необходима разработка специальных неустойчивых резонаторов.

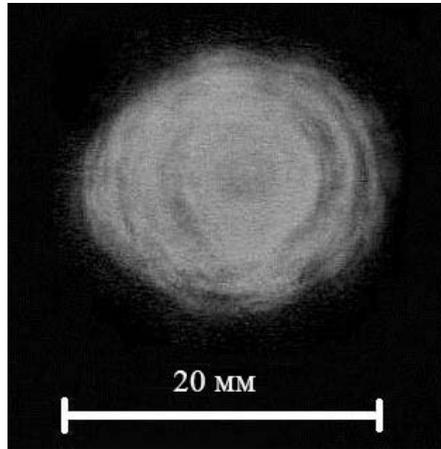


Рис. 6. Отпечаток пучка Fe:ZnSe лазера на термобумаге

Импульсно-периодический режим генерации Fe:ZnSe лазера

В импульсно-периодическом режиме исследования характеристик Fe:ZnSe лазера проводились при энергии накачки в импульсе не более 4,2 Дж с целью предотвращения разрушения поверхности активного элемента. HF лазер работал в коротких сериях продолжительностью 1–2 с при частоте следования импульсов 10–20 Гц. На рис. 7 приведены зависимости падающей на кристалл энергии HF лазера, прошедшей через кристалл энергии и энергии генерации Fe:ZnSe лазера от времени при частоте следования импульсов 20 Гц (серия продолжительностью 1 с). На рис. 8 представлена зависимость КПД Fe:ZnSe лазера по поглощенной энергии от времени для

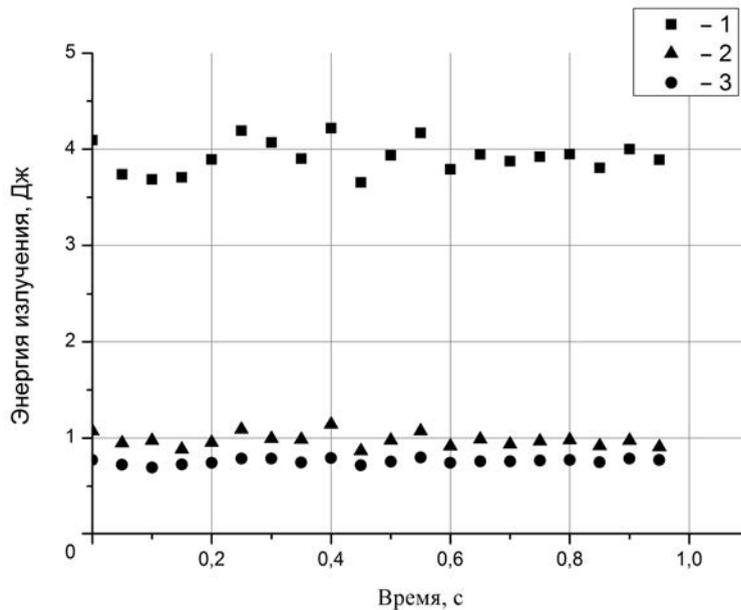


Рис. 7. Зависимости падающей на кристалл энергии HF лазера (1), прошедшей через кристалл, энергии (2) и энергии генерации Fe:ZnSe лазера (3) от времени при частоте следования импульсов 20 Гц

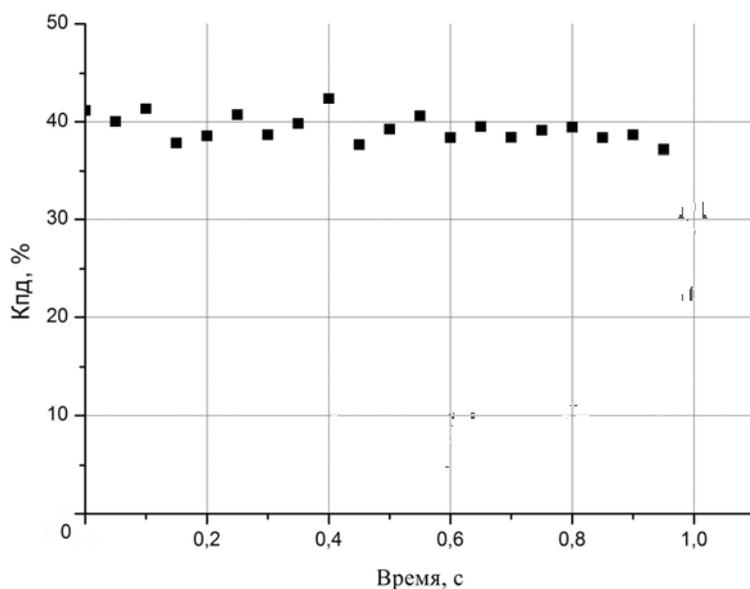


Рис. 8. Зависимость КПД Fe:ZnSe лазера по поглощенной энергии от времени в серии импульсов с частотой следования 20 Гц

этих же условий. Как видно из рис. 7, энергия генерации Fe:ZnSe лазера в импульсе близка к величине 1 Дж на протяжении всей серии, средняя мощность генерации Fe:ZnSe лазера за серию составляет ~20 Вт при КПД по падающей на кристалл мощности ~25 %. КПД по поглощенной в кристалле мощности (см. рис. 8) ~40 %. Дальнейшее увеличение средней мощности Fe:ZnSe лазера может быть достигнуто посредством увеличения частоты следования импульсов. Большие поперечные размеры поликристаллических активных элементов, которые легируются ионами железа по технологии, описанной в [23], позволяют при больших частотах следования применять технику вращающегося диска (см., например, [21]) с целью снижения влияния на характеристики лазера перегревных явлений.

Заключение

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность достижения большой средней мощности излучения Fe:ZnSe лазера с высокой энергией в отдельном импульсе при комнатной температуре активного элемента. Насколько нам известно, полученная величина средней мощности излучения 20 Вт является в настоящее время самой большой величиной для лазеров в спектральном диапазоне $\lambda = 4\text{--}5$ мкм, генерирующих при комнатной температуре. Дальнейшее увеличение средней мощности возможно посредством увеличения частоты следования импульсов и применения техники вращающихся дисков, позволившей авторам [21] получить рекордную мощность излучения лазера на поликристалле Cr:ZnSe.

Настоящая работа поддержана грантом РФФИ № 15-13-10028 в части разработки технологии и изготовления образцов Fe:ZnSe, а также грантами РФФИ № 15-02-06005 и 15-08-02562 в части разработки экспериментальных методик и проведения лазерных исследований.

Список литературы

1. Adams J. J., Bibeau C., Page R. H. et al. 4,0–4,5 μm lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material // *Opt. Lett.* 1999. Vol. 24, N 23. P. 1720–1722.
2. Kernal J., Fedorov V. V., Gallian A. et al. 3,9–4,8 μm gain-switched lasing of Fe:ZnSe at room temperature // *Optics Express*. 2005. Vol. 13, N 26. P. 10608–10612.
3. Акимов В. А., Воронов А. А., Козловский В. И. и др. Эффективная лазерная генерация кристалла Fe^{2+} :ZnSe при комнатной температуре // *Квантовая электроника*. 2006. Т. 36, № 4. С. 299–301.
4. Ильичев Н. Н., Данилов В. П., Калинушкин В. П. и др. Суперлюминесцентный ИК излучатель на кристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$, работающий при комнатной температуре // *Там же*. 2008. Т. 38, № 2. С. 95–96.
5. Doroshenko M. E., Jelinkova H., Koranda P. et al. Tunable mid-infrared laser properties of $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnMgSe}$ and $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ crystals // *Laser Physics Letters*. 2010. Vol. 7, N 1. P. 39–45.
6. Myoung NoSoung, Martyshkin Dmitri V., Fedorov Vladimir V. et al. Energy scaling of 4,3 μm room temperature Fe:ZnSe laser // *Opt. Lett.* 2011. Vol. 36, N 1. P. 94–96.
7. Mirov S. B., Fedorov V. V., Martyshkin D. V. et al. Progress in Mid-IR Lasers Based on Cr and Fe-Doped II–VI Chalcogenides // *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*. 2015. Vol. 21, N 1. P. 1601719.
8. Великанов С. Д., Данилов В. П., Захаров Н. Г. и др. Лазер на кристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ с накачкой излучением нецепного электроразрядного HF-лазера при комнатной температуре // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44, № 2. С. 141–144.
9. Гаврищук Е. М., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г. и др. Лазер на $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ с большой энергией излучения, работающий при комнатной температуре // *Там же*. 2014. Т. 44, № 6. С. 505–506.
10. Firsov K. N., Gavrishchuk E. M., Kazantsev S. Yu. et al. Increasing the radiation energy of $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ laser at room temperature // *Laser Physics Letters*. 2014. Vol. 11, N 8. P. 085001.
11. Firsov K. N., Gavrishchuk E. M., Kazantsev S. Yu. et al. Spectral and temporal characteristics of $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ laser pumped by non-chain HF(DF) laser at room temperature // *Ibid.* P. 125004.
12. Великанов С. Д., Зарецкий Н. А., Зотов Е. А. и др. Исследование работы Fe:ZnSe-лазера в импульсном и импульсно-периодическом режимах // *Квантовая электроника*. 2015. Т. 45, № 1. С. 1–7.
13. Kozlovsky V. I., Akimov V. A., Frolov M. P. et al. Room-temperature tunable mid-infrared lasers on transition-metal doped II–VI compound crystals grown from vapor phase // *Phys. Status Sol. B*. 2010. Vol. 247, N 6. P. 1553–1556.
14. Evans Jonathan W., Berry Patrick A., Schepler Kenneth L. 840 mW continuous-wave Fe:ZnSe laser operating at 4140 nm // *Opt. Lett.* 2012. Vol. 37, N 23. P. 5021–5023.
15. Myoung NoSoung, Fedorov V. V., Mirov S. B. et al. Temperature and concentration quenching of mid-IR photoluminescence in iron doped ZnSe and ZnS laser crystals // *Journal of Luminescence*. 2012. Vol. 123, N 3. P. 600–606.
16. Firsov K. N., Frolov M. P., Gavrishchuk E. M. et al. Laser on single-crystal $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ with high pulse radiation energy at room temperature // *Laser Physics Letters*. 2016. Vol. 13, N 1. P. 015002.
17. Акимов В. А., Воронов А. А., Козловский В. И. и др. Внутррезонаторная лазерная спектроскопия с использованием Fe^{2+} :ZnSe-лазера // *Квантовая электроника*. 2007. Т. 37, № 11. С. 1071–1075.
18. Гаврищук Е. М., Иконников В. Б., Казанцев С. Ю. и др. Масштабирование энергетических характеристик лазера на поликристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при комнатной температуре // *Квантовая электроника*. 2015. Т. 45, № 9. С. 823–827.
19. Великанов С. Д., Зарецкий Н. А., Зотов Е. А. и др. Лазер на $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ с энергией излучения 1,2 Дж при комнатной температуре // *Там же*. 2016. Т. 46, № 1. С. 11–12.

20. Firsov K. N., Gavrishchuk E. M., Ikonnikov V. B. et al. Room-temperature laser on a ZnSe:Fe²⁺ polycrystal with undoped faces, excited by an electrodischarge HF laser // Laser Physics Letters. 2016. Vol. 13, N 5. P. 055002.

21. Mirov S. B., Fedorov V., Martyshkin D. et al. High Average Power Fe:ZnSe and Cr:ZnSe Mid-IR Solid State Lasers // Advanced Solid State Lasers Conference. Berlin, 2015. AW4A.1.

22. Kozlovsky V. I., Korostelin Y. V., Podmar'kov Y. P. et al. Middle infrared Fe²⁺:ZnS, Fe²⁺:ZnSe and Cr²⁺:CdSe lasers: new results // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 740. P. 012006.

23. Dormidonov A. E., Firsov K. N., Gavrishchuk E. M. et al. High-efficiency room-temperature ZnSe:Fe²⁺ laser with a high pulsed radiation energy // Appl. Phys. B. 2016. Vol. 122. P. 211.

24. Potemkin F. V., Migal E. A., Pushkin A. V. et al. Mid-IR (4–5 μm) femtosecond multipass amplification of optical parametric seed pulse up to gigawatt level in Fe²⁺:ZnSe with optical pumping by a solid-state 3 μm laser // Laser Physics Letters. 2016. Vol. 13, N 12. P. 125403.

25. Frolov M. P., Korostelin Yu. V., Kozlovsky V. I. et al. Study of a 2 – J pulsed Fe:ZnSe 4-μm laser // Ibid. 2013. Vol. 10. P. 125001.

26. Великанов С. Д., Гаранин С. Г., Домажиров А. П. и др. Мощный электроразрядный HF-лазер с твердотельным генератором накачки // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 5. С. 393–396.

27. Булаев В. Д., Гусев В. С., Казанцев С. Ю. и др. Электроразрядный импульсно-периодический HF-лазер с большой энергией излучения // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 7. С. 615–618.

28. Великанов С. Д., Домажиров А. П., Зарецкий Н. А. и др. Мощный импульсно-периодический HF(DF)-лазер с твердотельным генератором накачки // Там же. 2015. Т. 45, № 11. С. 989–992.

29. Andreev S. N., Il'ichev N. N., Firsov K. N. et al. Generation of an Electrical Signal upon the Interaction of Laser Radiation with Water Surface // Laser Physics, 2007. Vol. 17(8). P. 1041.

30. Gavrishchuk E. M. Polycrystalline Zinc Selenide for IR Optical Application // Inorganic Materials. 2003. Vol. 39. P. 883–899.

31. Gavrishchuk E. M., Ikonnikov V. B., Savin D. V. Recrystallization behavior of zinc chalcogenides during hot isostatic pressing // Ibid. 2014. Vol. 50, N 3. P. 222–227.

32. Firsov K. N., Gavrishchuk E. M., Ikonnikov V. B. et al. Room-temperature laser on a ZnS:Fe²⁺ polycrystal with a pulse radiation energy of 0.6 J // Laser Phys. Lett. 2016. Vol. 13, N 6. P. 065003.

Repetitively Pulsed Fe: ZnSe Laser with an Average Output Power of 20 W at Room Temperature of the Polycrystalline Active Element

S. D. Velikanov, E. M. Gavrishchuk, N. A. Zaretsky, A. V. Zakhryapa, V. B. Ikonnikov, S. Yu. Kazantsev, I. G. Kononov, A. A. Maneshkin, D. A. Mashkovskii, E. V. Saltykov, K. N. Firsov, R. S. Chuvatkin, I. M. Yutkin

The energy and spectral-temporal characteristics of a Fe:ZnSe laser operating in pulsed and repetitively pulsed regimes are studied at room temperature of the polycrystalline active element. The crystal was pumped by a nonchain electric-discharge HF laser. The energy of the Fe:ZnSe laser in a single-pulse regime was 1,67 J at the slope efficiency with respect to the absorbed and incident energy of ~43 and ~27 %, respectively. In a repetitively pulsed regime with a pulse repetition rate of 20 Hz and an efficiency with respect to the absorbed power of ~40 %, the average laser power was ~20 W with an individual pulse energy of ~1 J.