

## ЛАЗЕРЫ

# Лазер на монокристалле $ZnS:Fe^{2+}$ , возбуждаемый при комнатной температуре электроразрядным HF-лазером

С.Д.Великанов, А.Е.Дормидонов, Н.А.Зарецкий, С.Ю.Казанцев, В.И.Козловский, И.Г.Кононов, Ю.В.Коростелин, А.А.Манешкин, Ю.П.Подмарьков, Я.К.Скасырский, К.Н.Фирсов, М.П.Фролов, И.М.Юткин

*Исследован лазер на монокристалле  $ZnS:Fe^{2+}$  при комнатной температуре активного элемента. Накачка кристалла осуществлялась нецелным электроразрядным HF-лазером с длительностью светового импульса на полувысоте  $\sim 140$  нс. Диаметр пятна излучения накачки на поверхности кристалла ( $d$ ) варьировался в пределах 3.9 – 11.6 мм. Значения дифференциальной эффективности лазера при этих  $d$  составили 37%–39% соответственно. Получена максимальная энергия генерации 380 мДж (при  $d = 11.6$  мм) с полной эффективностью по поглощенной в кристалле энергии накачки  $\sim 19\%$ . Дальнейшему увеличению энергии генерации препятствовало разрушение кристалла при энергии и мощности падающей на его поверхность накачки 3.4 Дж и  $\sim 24$  МВт соответственно. Разрушение имело вид длинного узкого канала, смещенного от входной поверхности в глубь активного элемента.*

**Ключевые слова:**  $ZnS:Fe^{2+}$ -лазер, монокристалл, электроразрядный HF-лазер, оптическая накачка, комнатная температура.

## 1. Введение

Источники мощного когерентного излучения в спектральном диапазоне 3.5–5 мкм представляют значительный интерес для научных исследований и ряда практических приложений. Это стимулирует изучение и разработку лазеров на кристаллах  $ZnSe:Fe^{2+}$  и  $ZnS:Fe^{2+}$  с оптической накачкой с целью увеличения их выходных характеристик (энергии и мощности в отдельном импульсе, а также средней мощности излучения) [1–25].

При охлаждении кристаллов до температуры жидкого азота максимальные энергии генерации в импульсе  $ZnSe:Fe^{2+}$ - и  $ZnS:Fe^{2+}$ -лазеров, достигнутые к настоящему времени, составляют 4.9 [14] и 3.25 Дж [18] соответственно. В качестве активных элементов использовались монокристаллы  $ZnSe:Fe^{2+}$  и  $ZnS:Fe^{2+}$ , возбуждаемые излучением  $Er:YAG$ -лазера в режиме свободной генерации. Максимальная средняя мощность  $ZnSe:Fe^{2+}$ -лазера с поликристаллическим активным элементом (температура жидкого азота) составила 35 Вт [23] при накачке его  $Er:YAG$ -лазером, работавшим в режиме свободной генерации с частотой следования импульсов 100 Гц.

При комнатной температуре из-за относительно малых времен жизни верхних лазерных состояний в  $ZnSe:Fe^{2+}$  и  $ZnS:Fe^{2+}$  ( $\sim 360$  нс [8, 19] и  $\sim 50$  нс [17, 19] со-

ответственно) кристаллы необходимо возбуждать короткими импульсами излучения. Удобными и эффективными источниками накачки в таких условиях являются мощные электроразрядные HF-лазеры, способные функционировать как в импульсном (длительность импульса 100–200 нс), так и в импульсно-периодическом режиме [26–29]. При их использовании получены самые высокие на настоящий момент значения энергии и средней мощности  $ZnSe:Fe^{2+}$ -лазера и энергии в импульсе  $ZnS:Fe^{2+}$ -лазера при комнатной температуре. Максимальные энергии генерации  $ZnSe:Fe^{2+}$ -лазера в импульсе составили 253 мДж [24] и  $\sim 1.2$  Дж [21, 25] на поликристаллических образцах и монокристалле соответственно. В импульсно-периодическом режиме работы  $ZnSe:Fe^{2+}$ -лазера, возбуждаемого HF-лазером, получена средняя мощность 2.4 Вт [14].

Накачка  $ZnS:Fe^{2+}$ -лазера HF-лазером позволила также увеличить энергию генерации при комнатной температуре более чем в 7 раз (25.5 мДж [20]) по сравнению с энергией, полученной при накачке  $Er:YAG$ -лазером в режиме модулированной добротности (3.4 мДж [17]). В работе [20] использовался поликристаллический образец  $ZnS:Fe^{2+}$ , легированный ионами железа с двух сторон методом термодиффузии. Глубина легирования образца (с каждой из сторон) по уровню 0.1 не превышала 500 мкм при концентрации ионов железа в поверхностном слое  $\sim 5 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Сочетание малой глубины легирования, что эквивалентно малой длине активной среды, с высокой концентрацией легирующего компонента в поверхностном слое при относительно малых поперечных размерах образца (диаметр 10 мм) не позволяло в полной мере реализовать энергетические возможности HF-лазера из-за развития паразитной генерации при больших размерах пятна излучения накачки на поверхности активного элемента. Подобное ограничение имело место и в случае  $ZnSe:Fe^{2+}$ -лазера на поликристалле с двухсторонним диффузионным легированием [24] (диаметр образца 20 мм) при попытках увеличения энергии генерации посредством уве-

С.Д.Великанов, Н.А.Зарецкий, А.А.Манешкин, И.М.Юткин. «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: velikanov@otd13.vniief.ru

А.Е.Дормидонов, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: k\_firsov@rambler.ru

В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, Ю.П.Подмарьков, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: vikoza@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 15 апреля 2016 г., после доработки – 28 июня 2016 г.

личения размеров пятна накачки (при плотности энергии накачки, ограниченной порогом разрушения поверхности). Естественным выходом из данной ситуации является уменьшение концентрации ионов железа в образце при одновременном увеличении длины активной среды. Это может быть достигнуто либо разработкой поликристаллических образцов с несколькими слоями легирования [24], либо применением монокристаллов [17, 18] с большой длиной активной среды при однородном легировании ионами железа до меньших концентраций.

В работах [21, 25] использование в качестве активного элемента монокристалла  $\text{ZnS}:\text{Fe}^{2+}$ , возбуждаемого HF-лазером, позволило существенно увеличить размеры пятна накачки и, соответственно, энергию генерации при комнатной температуре по сравнению со значениями аналогичных параметров, которые удавалось реализовать на поликристаллических образцах. Представляет естественный интерес исследование возможности увеличения энергии генерации и  $\text{ZnS}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера, возбуждаемого при комнатной температуре HF-лазером, за счет использования монокристаллического активного элемента с большой длиной усиления. В этом и состоит цель настоящей работы.

## 2. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на монокристалле  $\text{ZnS}:\text{Fe}^{2+}$ , выращенном из паровой фазы химическим транспортом в водороде на монокристаллической заправке [30]. Легирование железом осуществлялось в процессе роста, концентрация  $\text{Fe}^{2+}$  в образце составляла  $\sim 0.7 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Образец имел форму, близкую к цилиндрической. Диаметр и длина цилиндра (длина активной среды) составляли 16 и 17 мм соответственно. Кристалл устанавливался в резонатор таким образом, чтобы один из его полированных торцов был перпендикулярен оптической оси резонатора. Угол между полированными торцами составлял  $\sim 45^\circ$ . Ранее именно на этом кристалле при температуре жидкого азота была получена энергия излучения в импульсе 3.25 Дж [18].

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Резонатор  $\text{ZnS}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера длиной 155 мм был образован вогнутым зеркалом 31 (зеркало с золотым покрытием на подложке из кварца) с радиусом кривизны 1 м и плоским выходным зеркалом 32. В качестве выходного использовалось зеркало с интерференционным покрытием на подложке из  $\text{CaF}_2$ , имевшее коэффициент отражения 80% на длинах волн  $\lambda = 3.6 - 4.1 \text{ мкм}$ . Диаметр пятна излучения накачки  $d$  (90% энергии) на поверхности кристалла в процессе экспериментов изменялся в преде-

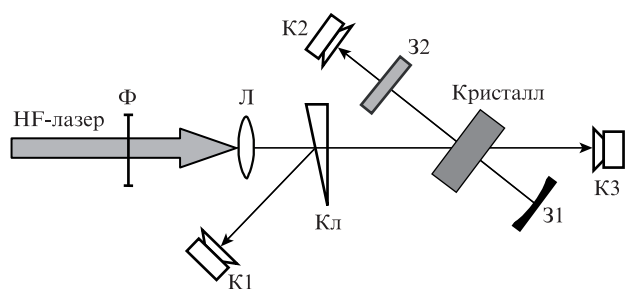


Рис.1. Схема эксперимента: 31, 32 – зеркала резонатора; Ф – набор калиброванных фильтров; Л – сферическая линза; Кл – оптический клин; К1, К2, К3 – калориметры.

лах 3.9 – 11.6 мм. Излучение нецепного электроразрядного HF-лазера с длительностью импульса на полувывсоте  $\sim 140 \text{ нс}$ , ослабляемое набором калиброванных светофильтров Ф, фокусировалось на поверхность образца сферической линзой Л с фокусным расстоянием 45 см. HF-лазер работал в моноимпульсном режиме, его характеристики подробно описаны в [31, 32]. Угол падения излучения накачки на поверхность кристалла составлял  $\sim 20^\circ$ . Значения энергий падающего на образец излучения HF-лазера, прошедшего через образец излучения и генерации  $\text{ZnS}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера измерялись калориметрами К1, К3 (Molelectron) и К2 (Gentec-EO) соответственно.

## 3. Результаты экспериментов и обсуждение

На рис.2 представлена зависимость пропускания исследуемого монокристалла от плотности падающей на поверхность энергии HF-лазера, полученная в условиях генерации  $\text{ZnS}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера при диаметре пятна излучения накачки на поверхности образца  $d = 3.9 \text{ мм}$ . В экспериментах накачка кристалла осуществляется на множестве линий в спектральном интервале 2.7–3.1 мкм [13, 31], генерируемых в одном импульсе. Пропускание кристалла нелинейно зависит от плотности падающей на поверхность энергии [21, 24]. Поэтому график, приведенный на рис.2, представляется более информативным, чем обычные спектры пропускания, снимаемые при низкой плотности энергии. Как видно из рисунка, пропускание кристалла изменяется примерно от 27% до 30% в диапазоне изменения плотности энергии накачки 0.8–3.2 Дж/см<sup>2</sup>.

На рис.3 приведены зависимости энергии генерации  $\text{ZnS}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера от поглощенной в образце энергии, полученные при разных диаметрах пятна излучения HF-лазера на поверхности кристалла. Как следует из рисунка, при  $d = 3.9 - 9.6 \text{ мм}$  достигнуты достаточно большие значения дифференциальной эффективности лазера:  $\eta_{\text{slope}} = 37\% - 39\%$ . При  $d = 9.6 \text{ мм}$  максимальная энергия генерации составляет  $\sim 250 \text{ мДж}$  с полной эффективностью по поглощенной энергии  $\eta = 24\%$ . Увеличение диаметра пятна до 11.6 мм приводит к уменьшению  $\eta_{\text{slope}}$  до 28%, однако максимальная энергия генерации в этом случае составляет 380 мДж при  $\eta = 19\%$ .

Из рис.3 также видно, что для  $d = 11.6 \text{ мм}$  точка, отвечающая максимальной поглощенной энергии (20 Дж), заметно смещена относительно линейной зависимости, поскольку при ее регистрации кристалл был поврежден. При этом энергия и пиковая мощность HF-лазера на входной поверхности кристалла составляли 3.4 Дж и

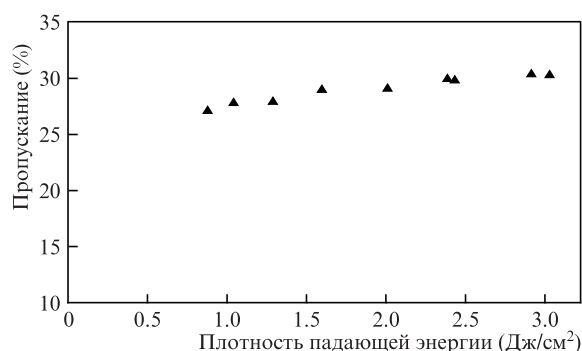


Рис.2. Зависимость пропускания кристалла от плотности падающей на поверхность энергии в условиях генерации  $\text{ZnS}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера.

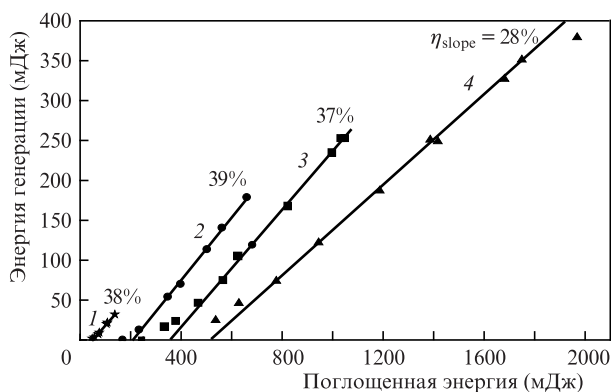


Рис.3. Зависимости энергии генерации ZnS:Fe<sup>2+</sup>-лазера от энергии HF-лазера, поглощенной в кристалле, при диаметрах пятна накачки  $d = 3.9$  (1), 8.1 (2), 9.6 (3) и 11.6 мм (4).

24 МВт. Поврежденная область представляла собой длинный узкий канал, смещенный от входной поверхности в глубь образца. Подобные повреждения кристаллов обычно наблюдаются при филаментации и самофокусировке мощных пучков, однако в настоящее время мы не имеем достаточного экспериментального материала, который позволил бы точно идентифицировать механизм разрушения.

Таким образом, в настоящей работе на монокристалле ZnS:Fe<sup>2+</sup> при комнатной температуре достигнута энергия генерации 380 мДж. Для дальнейшего увеличения энергии генерации необходимы меры, препятствующие разрушению кристалла при больших размерах пятна и, соответственно, большой мощности излучения накачки. Целесообразно также дальнейшее совершенствование технологии легирования поликристаллических образцов ZnS в процессе горячего изостатического прессования, позволяющем получать активные элементы с высоким оптическим качеством [20, 33].

Работа поддержана РФФИ (гранты №15-02-06005 и №15-08-02562).

- Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24**, 1720 (1999).
- Kernal J., Fedorov V.V., Gallian A., Mirov S.B., Badikov V.V. *Opt. Express*, **13**, 10608 (2005).
- 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).
- Ильичев Н.Н., Данилов В.П., Калинушкин В.П., Студеникин М.И., Шапкин П.В., Насибов А.С. *Квантовая электроника*, **38**, 95 (2008).
- Doroshenko M.E., Jelinkova H., Koranda P., Sulc J., Basiev T.T., Osiko V.V., Komar V.K., Gerasimenko A.S., Puzikov V.M., Badikov V.V., Badikov D.V. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 38 (2010).
- Myoung NoSoung, Martyshkin Dmitri V., Fedorov Vladimir V., Mirov Sergey B. *Opt. Lett.*, **36**, 94 (2011).
- Doroshenko M.E., Jelinkova H., Sulc J., Jelinek M., Nemes M., Basiev T.T., Zagoruiko Y.A., Kovalenko N.O., Gerasimenko A.S., Puzikov V.M. *Laser Phys. Lett.*, **9** (4), 301 (2012).
- Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Mislavskii V.V., Podmar'kov Yu.P., Savinova S.A., Skasyrsky Ya.K. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 125001 (2013).
- Mirov S.B., Fedorov V.V., Martyshkin D.V., Moskalev I.S., Mirov M.S., Vasilyev S.V. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21**, 1601719 (2015).

- Великанов С.Д., Данилов В.П., Захаров Н.Г., Ильичев Н.Н., Казанцев С.Ю., Калинушкин В.П., Кононов И.Г., Насибов А.С., Студеникин М.И., Пашинин П.П., Фирсов К.Н., Шапкин П.В., Щуров В.В. *Квантовая электроника*, **44**, 141 (2014).
- Гавришчук Е.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Родин С.А., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **44**, 505 (2014).
- Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Rodin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 085001 (2014).
- Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Maneshkin A.A., Mishchenko G.M., Nefedov S.M., Rodin S.A., Velikanov S.D., Yutkin I.M., Zaretsky N.A., Zotov E.A. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 125004 (2014).
- Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Зотов Е.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Крохин О.Н., Манешкин А.А., Подмарьков Ю.П., Савинова С.А., Скасырский Я.К., Фролов М.П., Чуваткин Р.С., Юткин И.М. *Квантовая электроника*, **45**, 1 (2015).
- Kozlovsky V.I., Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Martovitsky V.P., Mislavskii V.V., Podmar'kov Yu.P., Skasyrsky Ya.K., Voronov A.A. *Phys. Status Sol. B*, **247**, 1553 (2010).
- Evans Jonathan W., Berry Patrick A., Schepler Kenneth L. *Opt. Lett.*, **37**, 5021 (2012).
- Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Миславский В.В., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **41**, 1 (2011).
- Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Podmar'kov Yu.P., Savinova S.A. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 055001 (2015).
- Myoung Nosoung, Fedorov V.V., Mirov S.B., Wenger L.E. *J. Luminescence*, **132**, 600 (2012).
- Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Rodin S.A., Savin D.V., Timofeeva N.A. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 015001 (2016).
- Firsov K.N., Frolov M.P., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Korostelin Yu.V., Maneshkin A.A., Velikanov S.D., Yutkin I.M., Zaretsky N.A., Zotov E.A. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 015002 (2016).
- Lancaster A., Cook G., McDaniel S.A., Evans J., Berry P.A., Shephard J.D., Kar A.K. *Appl. Phys. Lett.*, **107**, 131108 (2015).
- Mirov S.B., Fedorov V., Martyshkin D., Moskalev I., Mirov M., Vasilyev S. *Advanced Solid State Lasers Conf.* (Berlin, Germany, 2015, AW4A.1).
- Гавришчук Е.М., Иконников В.Б., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Родин С.А., Савин Д.В., Тимофеева Н.А., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **45**, 823 (2015).
- Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Зотов Е.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Коростелин Ю.В., Манешкин А.А., Фирсов К.Н., Фролов М.П., Юткин И.М. *Квантовая электроника*, **46**, 11 (2016).
- Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 213 (1997).
- Великанов С.Д., Гаранин С.Г., Домажиров А.П., Ефанов В.М., Ефанов М.В., Казанцев С.Ю., Кодола Б.Е., Комаров Ю.Н., Кононов И.Г., Подлесных С.В., Сивачев А.А., Фирсов К.Н., Щуров В.В., Ярин П.М. *Квантовая электроника*, **40**, 393 (2010).
- Булаев В.Д., Гусев В.С., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Лысенко С.Л., Морозов Ю.Б., Познышев А.Н., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **40**, 615 (2010).
- Великанов С.Д., Домажиров А.П., Зарецкий Н.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Кромин А.А., Подлесных С.В., Сивачев А.А., Фирсов К.Н., Харитонов С.В., Цыкин В.С., Щуров В.В., Юткин И.М. *Квантовая электроника*, **45**, 989 (2015).
- Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I. *J. Alloys, Compounds*, **371** (1-2), 25 (2004).
- Andreev S.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Samokhin A.A. *Laser Phys.*, **17**, 834 (2007).
- Andreev S.N., Il'ichev N.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kulevskii L.A., Pashinin P.P. *Laser Phys.*, **17**, 1041 (2007).
- Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kotereva T.V., Savin D.V., Timofeeva N.A. *Laser Phys. Lett.*, **13** (4), 045004 (2016).