

## ПИСЬМА

## Лазер на $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ с энергией излучения 1.2 Дж при комнатной температуре

С.Д.Великанов, Н.А.Зарецкий, Е.А.Зотов, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, Ю.В.Коростелин, А.А.Манешкин, К.Н.Фирсов, М.П.Фролов, И.М.Юткин

*Исследованы характеристики лазера на монокристалле  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ , возбуждаемом при комнатной температуре электроразрядным HF-лазером. Диаметр пятна излучения HF-лазера на входной поверхности кристалла составлял 17 мм. Получена энергия генерации 1.2 Дж при эффективности по энергии накачки  $\sim 25\%$ .*

**Ключевые слова:**  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазер, электроразрядный HF-лазер, оптическая накачка.

К  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазерам ( $\lambda = 4\text{--}5$  мкм) с оптической накачкой проявляется многолетний интерес [1–15]. Максимальная в настоящее время энергия генерации, 4.9 Дж, достигнута в [14] при накачке кристалла, охлажденного до температуры жидкого азота, излучением  $\text{Er:YAG}$ -лазера, работавшего в режиме свободной генерации. При комнатной температуре время жизни верхнего состояния  $^5\text{T}_2$  иона  $\text{Fe}^{2+}$  в матрице  $\text{ZnSe}$  составляет примерно 360 нс [8], и для эффективной накачки необходимы источники с коротким импульсом излучения. Для этих целей идеально подходят электроразрядные HF-лазеры, имеющие длительность импульса 100–200 нс и практически неограниченные энергетические возможности [16–18]. Их применение позволило значительно увеличить энергию излучения  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазера при комнатной температуре [10–14] по сравнению с энергиями, получаемыми в случае накачки кристаллов твердотельными лазерами [6, 8, 14, 15]. С использованием поликристалла  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ , легированного с двух сторон методом диффузии, достигнута энергия 192 мДж [12] (в [19] получено 253 мДж за счет оптимизации резонатора). Однако возможности дальнейшего улучшения генерационных характеристик на кристаллах данного типа (обладающих высокой,  $\sim 10^{19}$  см $^{-3}$ , концентрацией  $\text{Fe}^{2+}$  в поверхностном слое при относительно малой длине активной среды), ограничиваются паразитной генерацией при больших размерах пятна накачки, присущей лазерным средам с дисковой геометрией. Очевидным

выходом из сложившейся ситуации является увеличение длины активной среды при одновременном уменьшении концентрации  $\text{Fe}^{2+}$  [11, 12, 19]. Такими свойствами обладают монокристаллы  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ , выращенные из паровой фазы химическим транспортом в водороде на монокристаллической затравке с одновременным легированием в процессе роста (концентрация  $\text{Fe}^{2+}$  равна  $(1.5\text{--}2.5)\times 10^{18}$  см $^{-3}$ ) [3, 8, 14]. Целью настоящей работы являлось исследование возможности дальнейшего увеличения энергии генерации  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазера (по сравнению с [12, 19]) посредством увеличения размера пятна накачки при использовании подобного кристалла.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Кристалл диаметром 27 мм и толщиной 15 мм устанавливался в резонаторе длиной 60 мм, образованном плоскими зеркалами 31, 32. Коэффициент пропускания 31 на длинах волн накачки составлял 84.2%, коэффициент отражения в спектральном диапазоне 4–5 мкм превышал 99%. Коэффициенты отражения 32 на генерируемых длинах волн и длинах волн накачки составляли 80% и 95.8% соответственно. Излучение HF-лазера [10–12], ослабляемое фильтром Ф1, фокусировалось на поверхность кристалла в пятно диаметром 17 мм ( $\sim 90\%$  энергии) линзой Л. Фильтр Ф2 служил для отсеки излучения накачки, прошедшего через резонатор. Энергии импульсов HF-лазера и генерации  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазера измерялись калориметрами К1 («Molelectron») и К2 («Gentec-EO») соответственно. Пропускание кристалла на длинах волн накачки в присутствии генерации измерялось в отдельном эксперименте. Использовалась оптическая схема с наклонным падением излучения накачки на поверхность кристалла, ана-

С.Д.Великанов, Н.А.Зарецкий, Е.А.Зотов, А.А.Манешкин, И.М.Юткин. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37  
С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38  
Ю.В.Коростелин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53  
К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31;  
М.П.Фролов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

Поступило в редакцию 22 сентября 2015 г., после доработки – 5 ноября 2015 г.

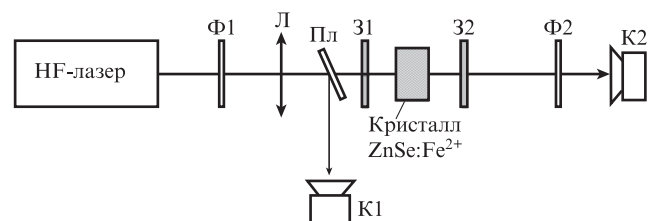


Рис.1. Схема эксперимента: 31, 32 – зеркала резонатора; Ф1, Ф2 – светофильтры; Л – линза из  $\text{BaF}_2$ ; Пл – светоделительная пластина из  $\text{MgF}_2$ ; К1, К2 – калориметры.

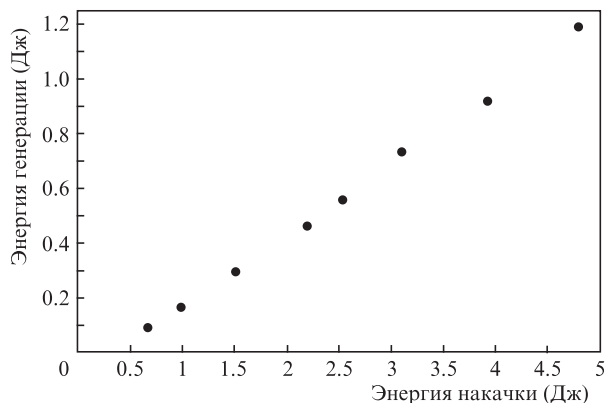


Рис.2. Зависимость энергии генерации ZnSe:Fe<sup>2+</sup>-лазера от энергии излучения, падающего на поверхность кристалла HF-лазера.

логичная применявшаяся в [12]. Пропускание растёт с ростом плотности энергии накачки  $W$  и при  $W \approx 1$  Дж/см<sup>2</sup> достигает насыщения. При  $W > 1$  Дж/см<sup>2</sup> пропускание в условиях настоящих экспериментов составляло  $\sim 21\%$  (концентрация Fe<sup>2+</sup> равна  $1.5 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>).

На рис.2. приведена зависимость энергии генерации от энергии падающего на образец излучения HF-лазера. Максимальная энергия генерации в условиях настоящего эксперимента составила 1.2 Дж при эффективности по энергии падающего излучения  $\sim 25\%$ .

Таким образом, уменьшение концентрации легирующего элемента с одновременным увеличением длины активной среды, реализованное в исследованном в настоящей работе кристалле, по сравнению с кристаллами, легируемыми методом диффузии, действительно позволило значительно поднять энергию излучения ZnSe:Fe<sup>2+</sup>-лазера посредством увеличения размеров пятна и, следовательно, энергии накачки.

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

1. Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., et al. *Opt. Lett.*, **24** (23), 1720 (1999).
2. Kernal J., Fedorov V.V., Gallian A., et al. *Opt. Express*, **13** (26), 10608 (2005).
3. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **36** (4), 299 (2006).
4. Ильичев Н.Н., Данилов В.П., Калинушкин В.П. и др. *Квантовая электроника*, **38** (2), 95 (2008).
5. Doroshenko M.E., Jelinkova H., Koranda P., et al. *Laser Phys. Lett.*, **7** (1), 39 (2010).
6. Myoung NoSoung, Martyskhin D.V., Fedorov V.V., et al. *Opt. Lett.*, **36** (1), 94 (2011).
7. Doroshenko M.E., Jelinkova H., Sulc J., et al. *Laser Phys. Lett.*, **9** (4), 301 (2012).
8. Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., et al. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 125001 (2013).
9. Mirov S.B., Fedorov V.V., Martyskhin D.V., et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21** (1), 1601719 (2015).
10. Великанов С.Д., Данилов В.П., Захаров Н.Г. и др. *Квантовая электроника*, **44** (2), 141 (2014).
11. Гавришук Е.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г. и др. *Квантовая электроника*, **44** (6), 505 (2014).
12. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., et al. *Laser Phys. Lett.*, **11** (8), 085001, (2014).
13. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., et al. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 125004 (2014).
14. Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Зотов Е.А. и др. *Квантовая электроника*, **45** (1), 1 (2015).
15. Kozlovsky V.I., Akimov V.A., Frolov M.P., et al. *Phys. Status Solidi B*, **247** (6), 1553 (2010).
16. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **24** (3), 213 (1997).
17. Великанов С.Д., Гаранин С.Г., Домажиров А.П. и др. *Квантовая электроника*, **40** (5), 393 (2010).
18. Булаев В.Д., Гусев В.С., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **40** (7), 615 (2010).
19. Гавришук Е.М., Иконников В.Б., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **45** (9), 823 (2015).