

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

Е.М.Гаврищук, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, С.А.Родин, К.Н.Фирсов

*Исследованы характеристики лазера на поликристаллическом образце  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ , работающего при комнатной температуре, с накачкой излучением нецепного HF-лазера. Получена энергия генерации  $E = 175$  мДж при эффективности по падающей на образец и поглощенной в образце энергии накачки  $\eta_p \approx 22\%$  и  $\eta_{abs} \approx 29\%$  соответственно.*

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

С момента появления первой публикации о наблюдении генерации [1]  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазера с оптической накачкой интерес к таким исследованиям не затухает [2–10]. В настоящее время максимальная энергия генерации  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазера  $E = 2.1$  Дж с эффективностью по поглощенной в активном элементе энергии (накачка  $\text{Er:YAG}$ -лазером в режиме свободной генерации)  $\eta_{abs} \approx 40\%$  получена при температуре  $T = 85$  К [8]. В этом же режиме возбуждения при комнатной температуре значения  $E$  и  $\eta_{abs}$  составили соответственно 42 мДж и около 0.9% [8]. Низкая эффективность в данном случае объясняется уменьшением времени жизни верхнего лазерного состояния с ростом температуры. Для достижения приемлемых значений эффективности при  $T > 245$  К приходится возбуждать кристалл короткими импульсами [2, 3, 5–7], но при этом возможности достижения больших энергий генерации  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазера ограничиваются низким уровнем энергий излучения используемых для накачки твердотельных лазеров (длины волн  $\lambda = 2.92$  мкм и  $\lambda = 2.8$  мкм) в режиме модулированной добротности (например, 35 мДж, см. [6]). При использовании коротких импульсов накачки и комнатной температуры максимальные значения  $E$  и дифференциальной эффективности по поглощенной в кристалле энергии  $\eta_{sl}$  составили 6 мДж и около 39% [9].

Нецепные электроразрядные HF-лазеры ( $\lambda = 2.6–3.1$  мкм) при длительности светового импульса  $\sim 150$  нс практически не имеют ограничений по энергии генерации и, кроме того, могут работать с большими частотами следования импульсов [11]. В [10] такой лазер использовался в схеме с поперечной накачкой кристалла, легированного ионами  $\text{Fe}^{2+}$  в тонком ( $\sim 100$  мкм) приповерхностном слое [4]. При комнатной температуре значение  $E$

составило 30.6 мДж при эффективности по энергии накачки  $\eta_p \approx 3.1\%$ .

Целью настоящей работы является исследование возможности увеличения энергии излучения и эффективности  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазера, возбуждаемого при комнатной температуре излучением нецепного HF-лазера, в случае использования в качестве активного элемента образца  $\text{ZnSe}$  с объемным легированием ионами  $\text{Fe}^{2+}$ .

Образец  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$  был изготовлен из поликристаллического  $\text{ZnSe}$ , выращенного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) в реакции паров  $\text{Zn}$  с  $\text{HSe}$  в потоке  $\text{Ar}$ . Вырезанные из этого материала пластины диаметром 20 мм и толщиной 4.5 мм механически шлифовались и полировались. Методика легирования  $\text{ZnSe}$  ионами  $\text{Fe}$  не отличалась существенно от методики легирования ионами  $\text{Cr}$  [12]. На обе поверхности пластины электронно-лучевым испарением наносились пленки  $\text{Fe}$  толщиной не более 1 мкм. Пластина отжигалась в течение семи суток при  $T = 1000 \pm 2^\circ\text{C}$  в запаянной кварцевой ампуле, заполненной водородом, после чего подвергалась химико-механическому полированию.

Схема эксперимента приведена на рис.1. Резонатор  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазера длиной 120 мм образован вогнутым зеркалом  $\text{Z}_1$  (золотое покрытие) с радиусом кривизны  $R = 1$  м и выходным зеркалом  $\text{Z}_2$ , в качестве которого использовалась плоскопараллельная пластина из  $\text{Si}$  толщиной

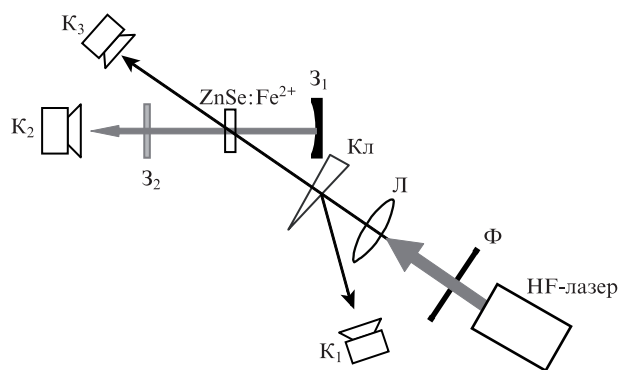


Рис.1. Схема эксперимента:

Кл – клин из  $\text{BaF}_2$ ;  $\text{K}_1$ ,  $\text{K}_2$  и  $\text{K}_3$  – calorimeters; Ф – калиброванный светофильтр; Л – сферическая линза;  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$  – активный элемент;  $\text{Z}_1$ ,  $\text{Z}_2$  – зеркала резонатора  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$ -лазера.

Е.М.Гаврищук, С.А.Родин. Институт химии высокочистых веществ им Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Гагарина, 23; e-mail: gavr@ihps.nnov.ru, rodin@ihps.nnov.ru

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: kazan@kapella.gpi.ru, kononov@kapella.gpi.ru, k\_firsov@rambler.ru

Поступило в редакцию 3 апреля 2014 г., после доработки – 16 апреля 2014 г.

4 мм. Образец  $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$  устанавливался перпендикулярно оптической оси резонатора на расстоянии 40 мм от выходного зеркала. Излучение нецепного НФ-лазера с длительностью импульса на полувысоте  $\tau \approx 130$  нс [9], ослабленное светофильтрами Ф, фокусировалось на поверхность пластины сферической линзой Л в пятно эллиптической формы с размерами осей  $6.8 \times 7.5$  мм. Угол падения излучения накачки на поверхность активного элемента составлял  $\sim 20^\circ$ . Энергии падающего на образец излучения НФ-лазера  $E_p$ , прошедшего через образец излучения и генерации  $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера  $E$  измерялись калориметрами  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  (Molecron) соответственно. Для контроля формы импульсов генерации  $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ - и НФ-лазеров вместо калориметров  $K_1$  и  $K_3$  устанавливались фотоприемники (Vigo-system Ltd) с временным разрешением  $\sim 1$  нс. Пропускание пластины  $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$  на длинах волн НФ-лазера в условиях генерации изменялось от 4% до 7.1% при изменении плотности энергии накачки от 0.2 до 2.8 Дж/см<sup>2</sup>.

Зависимость энергии генерации  $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера  $E$  от энергии накачки  $E_p$  приведена на рис.2. Получена максимальная энергия  $E = 175$  мДж при эффективностях  $\eta_p \approx 22\%$ ,  $\eta_{\text{abs}} \approx 29\%$  и  $\eta_{\text{sl}} \approx 32\%$ . Длительность импульса генерации  $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера на полувысоте при больших уровнях накачки была  $\sim 90$  нс. Возможности дальнейшего увеличения энергии генерации ограничиваются двумя факторами: порогом разрушения поверхности образца излучением накачки ( $\sim 3$  Дж/см<sup>2</sup>) и характерными для лазеров с дисковой геометрией активного элемента излучательными потерями в поперечном к оптической оси направлении при больших размерах пятна накачки. Несколько увеличить энергию генерации вероятно удастся за счет оптимизации параметров резонатора. В заключение заметим, что полученные нами значения энергии генерации  $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера при комнатной температуре значительно превышают достигнутые к настоящему времени показатели.

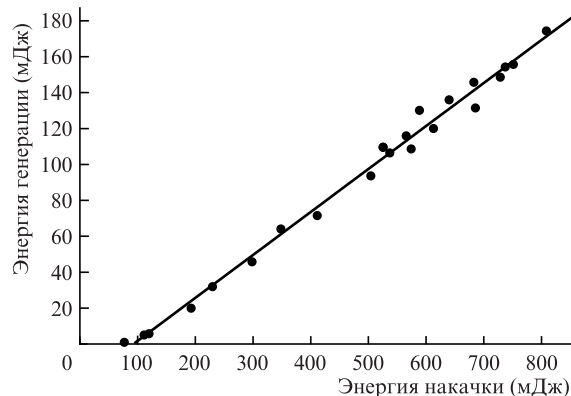


Рис.2. Зависимость энергии генерации  $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера от энергии накачки.

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. и др. *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 J., et al. *Laser Phys. Lett.*, **7** (1), 39 (2010).
6. No Sung Myoung, Martyshkin D.V., Fedorov V.V., Mirov S.B. *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. Kozlovsky V.I., Akimov V.A., Frolov M.P., et al. *Phys. Status Sol. B*, **247** (6), 1553 (2010).
10. Великанов С.Д., Данилов В.П., Захаров Н.Г. и др. *Квантовая электроника*, **44** (2), 141 (2014).
11. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **32** (2), 95 (2002).
12. Родин С.А., Балабанов С.С., Гавришук Е.М., Еремейкин О.Н. *Оптический журнал*, **80** (5), 89 (2013).