

# Эффективная лазерная генерация кристалла $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ при комнатной температуре

В.А.Акимов, А.А.Воронов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин,  
А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, М.П.Фролов

*При накачке излучением гигантских импульсов Er:YAG-лазера с длиной волны 2.9364 мкм в кристалле  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  получена эффективная генерация при комнатной температуре. Дифференциальный КПД  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера по поглощенной энергии накачки был равен 13 %. В дисперсионном резонаторе осуществлена плавная перестройка спектра генерации в области 3.95–5.05 мкм. Измерено также время затухания люминесценции уровня  ${}^5T_2$  иона  $\text{Fe}^{2+}$  в матрице ZnSe при комнатной температуре, составившее  $355 \pm 15$  нс.*

**Ключевые слова:** ИК лазеры, перестраиваемые твердотельные лазеры, кристаллы  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ .

## 1. Введение

Кристалл ZnSe, легированный ионами  $\text{Fe}^{2+}$ , привлекает к себе внимание как широкополосная лазерная среда среднего ИК диапазона спектра. Впервые лазерный эффект в этом кристалле реализован авторами работы [1], которые получили импульсную генерацию  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера в диапазоне температур 15–180 К и наблюдали температурную перестройку длины волны его излучения в спектральной области 3.98–4.54 мкм. Для оптического возбуждения кристалла использовалась лазерная накачка импульсами длительностью 48 мкс.

В нашей предыдущей работе [2] верхняя граница рабочей температуры лазера составила 255 К при длительности импульсов накачки 200 мкс. Это позволило отказаться от использования в качестве хладагента жидкого азота и получить эффективную генерацию  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера при охлаждении кристалла двухступенчатым термоэлектрическим модулем. Однако очевидно, что и при таком способе охлаждения сохраняются значительные неудобства при эксплуатации лазера.

Лазерным переходом в кристалле  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  является переход между состояниями  ${}^5T_2$  и  ${}^5E$  иона  $\text{Fe}^{2+}$ . Необходимость охлаждения кристалла  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  для достижения лазерной генерации при накачке длинными импульсами обусловлена тем, что с ростом температуры время жизни верхнего лазерного уровня  ${}^5T_2$  иона  $\text{Fe}^{2+}$  в матрице ZnSe уменьшается от 105 мкс при 120 К до 5 мкс при 220 К [1] из-за увеличения скорости безызлучательной релаксации, и, по оценкам, при комнатной температуре оно не должно превышать единиц микросекунд. Следовательно, одним из способов снижения пороговой энергии накачки при комнатной температуре может служить использование для накачки импульсов, длитель-

ность которых мала по сравнению с временем безызлучательной релаксации.

Действительно, в поликристаллических образцах ZnSe, выращенных методом химического осаждения из паровой фазы и затем легированных ионами  $\text{Fe}^{2+}$  диффузионным методом, авторам работы [3] удалось получить лазерный эффект при комнатной температуре, используя для накачки импульсы длительностью 5 нс, однако оцененная в [3] максимальная выходная энергия составила лишь  $\sim 1$  мкДж, а эффективность генерации не превышала 0.01 %.

В настоящей работе при комнатной температуре осуществлена эффективная генерация лазера на основе монокристалла  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  при его накачке излучением Er:YAG-лазера ( $\lambda = 2.9364$  мкм), работавшего в режиме модуляции добротности.

## 2. Экспериментальная установка

Активный элемент для  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера был изготовлен из монокристалла  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ , выращенного из паровой фазы методом свободного роста на монокристаллическую затравку с использованием химического транспорта в водороде по технологии, близкой к ранее разработанной для выращивания монокристаллов твердых растворов соединений  $A_2B_6$  [4]. Легирование ионами  $\text{Fe}^{2+}$  до концентрации  $\sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  проводилось непосредственно в процессе роста. Активный элемент имел длину 10 мм и поперечный размер  $17 \times 10$  мм. Ранее в  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазере, охлаждаемом до температуры жидкого азота, с помощью изготовленных таким способом активных элементов была получена выходная энергия  $\sim 0.2$  Дж при дифференциальном КПД 43 % [2], а также осуществлена плавная перестройка длины волны генерации в диапазоне 3.77–4.40 мкм при использовании дисперсионного резонатора [5].

Оптическая схема установки представлена на рис.1. Резонатор  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера был образован задним сферическим зеркалом 31 (радиус кривизны 50 см) и плоским выходным зеркалом 32 с интерференционными покрытиями, нанесенными на подложки из  $\text{CaF}_2$ . Спектральные кривые пропускания зеркал резонатора приведены на рис.2. Вблизи длины волны  $\lambda = 4.4$  мкм пропускание

В.А.Акимов, А.А.Воронов. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9  
В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, М.П.Фролов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53;  
e-mail: frolovmp@x4u.lebedev.ru

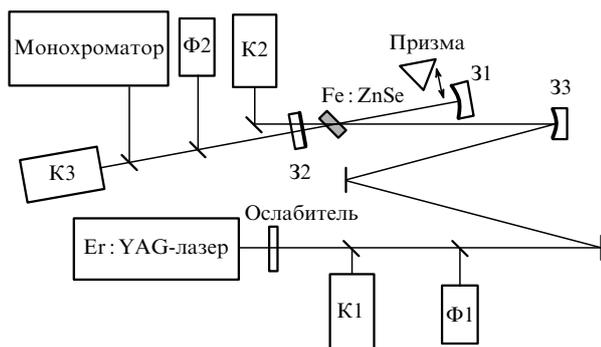


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 31 – заднее сферическое зеркало; 32 – плоское выходное зеркало; 33 – фокусирующее зеркало; К1–К3 – калориметры; Ф1 и Ф2 – фотоприемники.

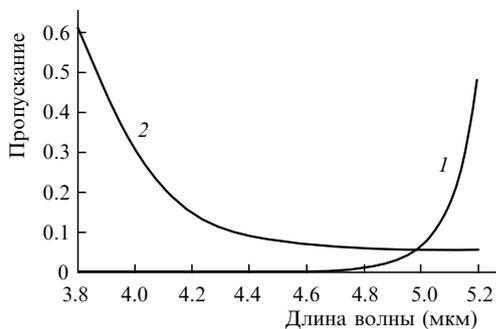


Рис.2. Спектральные характеристики заднего (1) и выходного (2) зеркала резонатора.

зеркал составляло соответственно 0.25 % и 9.5 %. Длина резонатора равнялась 17 см. Кристалл  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  был установлен вблизи выходного зеркала под углом Брюстера к оптической оси резонатора.

Накачка  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера осуществлялась излучением Ег: YAG-лазера ( $\lambda = 2.9364$  мкм) с ламповым возбуждением в режиме пассивной модуляции добротности резонатора. Пассивным затвором в Ег: YAG-лазере служила плоскопараллельная пластинка из монокристалла  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  [6]. Выходной импульс этого лазера имел длительность 60 нс по уровню половинной интенсивности и энергию до 10 мДж. Лазер накачки работал в режиме однократных импульсов, интервал между которыми составлял не менее 1 мин.

Излучение накачки было линейно поляризовано, причем вектор электрического поля лежал в плоскости падения пучка накачки на лазерный кристалл (горизонтальная плоскость), что сводило к минимуму потери, связанные с френелевским отражением. Направление распространения пучка накачки составляло небольшой угол ( $\sim 2^\circ$ ) с направлением оптической оси резонатора. Пучок фокусировался сферическим зеркалом 33 с фокусным расстоянием 50 см так, что его поперечное сечение перед входом в кристалл имело форму круга диаметром 1.4 мм. Энергии накачки изменялась с помощью набора ослабителей, в качестве которых использовались калиброванные светофильтры.

Энергия падающего на кристалл и прошедшего через него излучения накачки измерялись соответственно калориметрами К1 (ВЧД-2) и К2 (измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н). Для измерения выходной энергии  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера использовался калориметр К3 (ВЧД-2).

Временной ход импульсов накачки и генерации регистрировался соответственно фотоприемниками Ф1 и Ф2 (фотоспротивления ФСГ-22-3А2), сигналы с которых поступали на осциллограф Tektronix TDS-1012. Временное разрешение схемы регистрации позволяло регистрировать фронты импульсов с временем нарастания 10 нс. Длина волны генерации  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера измерялась с помощью дифракционного монохроматора, за выходной щелью которого устанавливался калориметр ВЧД-2.

Для исследования кривой спектральной перестройки  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера в его резонаторе перед задним зеркалом устанавливалась дисперсионная призма из  $\text{CaF}_2$  с преломляющим углом  $70^\circ$ . Перестройка спектра достигалась за счет поворота заднего зеркала резонатора вокруг вертикальной оси. Поскольку пропускание заднего зеркала с интерференционным покрытием резко возрастало в длинноволновой области генерации лазера (рис.2), при работе с дисперсионным резонатором вместо этого зеркала использовалось зеркало с алюминиевым покрытием и таким же радиусом кривизны.

### 3. Результаты и их обсуждение

В данной работе исследовались энергетические и спектральные характеристики  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера. Все эксперименты проводились при температуре активного элемента 295 К.

На рис.3 представлена зависимость выходной энергии лазера от поглощенной энергии накачки, полученная в отсутствие призмы в резонаторе. Максимальная энергия генерации составила в этом случае 0.37 мДж. По экспериментальным точкам методом наименьших квадратов была проведена прямая линия, с помощью которой определены дифференциальный КПД лазера по поглощенной энергии накачки (13 %) и пороговая поглощенная энергия накачки (1.4 мДж). Спектр генерации лазера имел ширину 0.1 мкм и центральную длину волны 4.4 мкм.

Осциллограммы импульсов накачки и генерации при энергиях накачки 8.3 и 4.2 мДж приведены на рис.4. При высоких энергиях накачки передний фронт импульса генерации был задержан относительно вершины импульса накачки на 20–30 нс, а его длительность не превышала 40 нс. При снижении энергии накачки длительность импульса генерации увеличивалась и вблизи порога составляла 60 нс, а временная задержка возрастала до 200 нс.

На рис.5 показана кривая спектральной перестройки  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера с дисперсионной призмой в резонаторе. Область перестройки охватывала спектральный диапазон 3.95–5.05 мкм и на коротковолновом участке, ве-

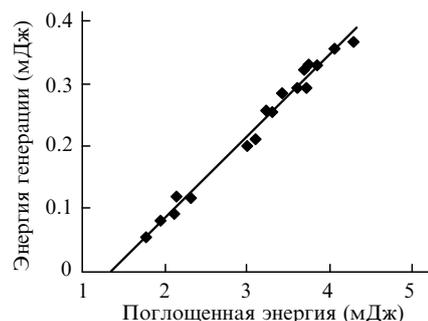


Рис.3. Зависимость выходной энергии  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера от поглощенной энергии накачки.

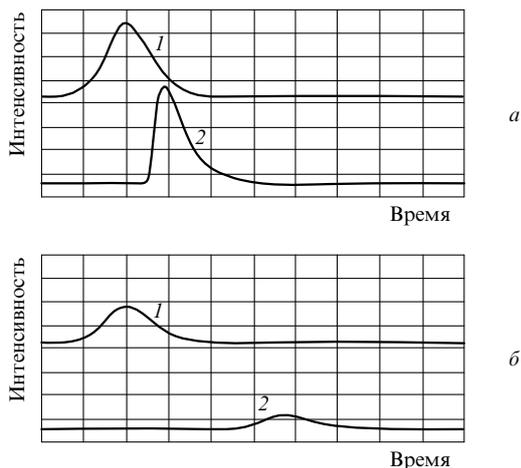


Рис.4. Осциллограммы импульсов накачки (1) и генерации (2)  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера при полных энергиях накачки 8.3 (а) и 4.2 мДж (б). Скорость развертки 50 нс/дел.

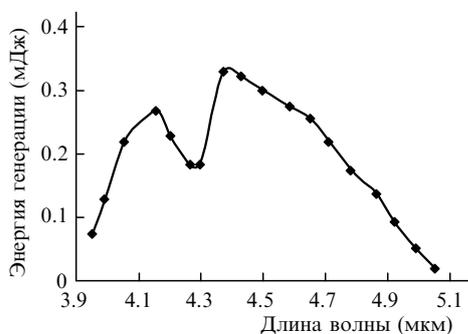


Рис.5. Перестройка спектра генерации  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера в дисперсионном резонаторе.

роятно, была ограничена выходным зеркалом, пропускание которого резко возрастало для  $\lambda < 4.2$  мкм (рис.2). Наблюдающийся на кривой провал в диапазоне 4.2–4.3 мкм обусловлен поглощением атмосферного углекислого газа [7]. Ширина спектра лазера с дисперсионным резонатором была равна 0.05 мкм.

Как уже отмечалось выше, необходимость использования коротких импульсов для достижения лазерной генерации в кристалле  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  при комнатной температуре обусловлена высокой скоростью безызлучательной релаксации верхнего лазерного уровня. Однако в литературе отсутствуют экспериментальные данные о времени жизни уровня  ${}^5\text{T}_2$  иона  $\text{Fe}^{2+}$  в матрице  $\text{ZnSe}$  при комнатной температуре. Поэтому в настоящей работе мы измерили время затухания люминесценции этого уровня.

В данном эксперименте возбуждение кристалла также осуществлялось лазерными импульсами с длиной волны 2.9364 мкм и длительностью 60 нс. Энергия возбуждающих импульсов составляла 7–8 мДж. Кристалл  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  был установлен вне лазерного резонатора. Сигнал люминесценции кристалла регистрировался в перпендикулярном по отношению к возбуждающему пучку направлении с помощью фотоприемника Ф2, установленного вблизи кристалла, и записывался осциллографом Tektronix TDS-1012. Рассеянное излучение возбуждающего импульса ослаблялось более чем на четыре порядка с помощью оптического фильтра, образованного из двух зеркал, имевших коэффициент отражения более 99 % в трехмикронной области спектра и коэффициент

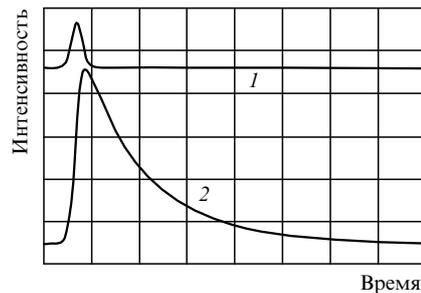


Рис.6. Осциллограммы возбуждающего импульса (1) и сигнала люминесценции (2) кристалла  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ . Скорость развертки 250 нс/дел.

пропускания более 50 % в спектральной области люминесценции кристалла.

Характерные осциллограммы возбуждающего импульса и сигнала люминесценции представлены на рис.6. Обработка полученных данных показала, что при температуре кристалла 295 К затухание люминесценции происходит по экспоненциальному закону с постоянной времени  $355 \pm 15$  нс.

#### 4. Заключение

В настоящей работе продемонстрирована эффективная импульсная генерация  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера при комнатной температуре. Дифференциальный КПД лазера по поглощенной энергии накачки составил 13 %, что соответствует квантовой эффективности 20 %. Осуществлена плавная перестройка длины волны генерации в спектральном диапазоне 3.95–5.05 мкм. Таким образом, полный диапазон плавной перестройки  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера с учетом результатов, полученных при охлаждении кристалла [5], охватывает спектральную область 3.77–5.05 мкм. Время затухания люминесценции верхнего лазерного уровня при комнатной температуре было равно  $355 \pm 15$  нс.

Отметим, что достигнутая эффективность лазера, по видимому, не является предельной и может быть увеличена за счет лучшего согласования областей накачки и генерации в лазерном элементе и оптимизации выходного зеркала резонатора.

Работа поддержана совместной Программой Министерства образования и науки РФ «Фундаментальные исследования и высшее образование» и CRDF (грант MO-011-0/B2M411), Программами фундаментальных исследований РАН «Новые материалы и структуры», «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур» и грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ № НШ-1466-2003-02.

1. Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24**, 1720 (1999).
2. Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **35**, 809 (2005).
3. Kernal J., Fedorov V.V., Gallian A., Mirov S.B., Badikov V.V. *Opt. Express*, **13**, 10608 (2005).
4. Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Nasibov A.S., Shapkin P.V. *J. Crystal Growth*, **159**, 181 (1996).
5. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **34**, 912 (2004).
6. Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Полушкин В.Г., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **36**, 1 (2006).
7. The HITRAN database, 2004 edition (<http://www.hitran.com>).