

Эффективный ИК лазер на кристалле $ZnSe:Fe$ с плавной перестройкой в спектральном диапазоне 3.77–4.40 мкм

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

Исследованы лазерные характеристики монокристалла $ZnSe:Fe$, выращенного из паровой фазы методом свободного роста с использованием химического транспорта в водород. При накачке излучением $Er:YAG$ -лазера с $\lambda = 2.9364$ мкм в $Fe^{2+}:ZnSe$ -лазере при температуре жидкого азота была получена выходная энергия 130 мДж с дифференциальным КПД 40 % по поглощенной энергии, что соответствует квантовой эффективности 55 %. В дисперсионном резонаторе осуществлена плавная перестройка спектра генерации в диапазоне 3.77–4.40 мкм.

Ключевые слова: ИК лазеры, перестраиваемые твердотельные лазеры, $Fe^{2+}:ZnSe$ -лазер.

1. Введение

Перестраиваемые лазеры спектрального диапазона 2–5 мкм представляют большой интерес для решения широкого круга задач научного и практического характера. Медицина, дистанционное зондирование атмосферы, контроль окружающей среды – это лишь некоторые области их применения. Разработка таких лазеров особенно важна для развития высокочувствительных методов спектрального анализа, поскольку в данной области длин волн лежат сильные линии поглощения многих молекул, связанные с колебательными переходами.

В этой связи особый интерес представляют кристаллы на основе халькогенидов (ZnS , $ZnSe$ и др.), легированные ионами переходных металлов (Cr , Ni , Fe и др.) [1], которые являются перспективными лазерными средами для указанного диапазона спектра. Наиболее длинноволновым в этом ряду является кристалл $ZnSe:Fe$, в котором была реализована лазерная генерация в спектральной области 3.98–4.54 мкм [2]. Используя кристалл, выращенный методом Бриджмена, авторы [2] получили максимальную выходную энергию 12 мкДж и дифференциальный КПД по поглощенной энергии 8.2 %. Генерация $Fe^{2+}:ZnSe$ -лазера наблюдалась в диапазоне температур 15–180 К. Наилучшие параметры лазера были реализованы при температурах 130–150 К.

Хорошо известно, что более высокое структурное совершенство и оптическая однородность достигаются в кристаллах, выращенных из паровой фазы. Поэтому лазерные кристаллы, выращенные таким способом, обладают малыми внутренними потерями [3, 4]. В нашей предыдущей работе [5] был впервые запущен лазер на кристалле $ZnSe:Fe$, выращенном из паровой фазы, и проведены предварительные исследования его характе-

ристик, в ходе которых был получен дифференциальный КПД лазера, составивший 18 % при выходной энергии 25 мДж. Однако в работе [5] использовался резонатор с достаточно высокими паразитными потерями, связанными с низким оптическим качеством поверхностей имевшегося образца $ZnSe:Fe$ и с френелевским отражением на окнах криостата, в котором был размещен кристалл.

Цель настоящей работы – исследование генерационных характеристик кристалла $ZnSe:Fe$ при использовании лазерного резонатора с минимальными паразитными потерями.

2. Экспериментальная установка

Монокристалл $ZnSe:Fe$ был выращен из паровой фазы методом свободного роста на монокристаллической затравке с использованием химического транспорта в водород. Технология выращивания близка к технологии, разработанной для выращивания монокристаллов твердых растворов соединений A_2B_6 [6]. Рост проводился из отдельных источников, содержащих поликристаллические соединения $ZnSe$ и $FeSe$. Концентрация ионов Fe^{2+} , определенная по спектру поглощения с учетом взятого из [2] сечения поглощения, составляла 10^{18} см^{-3} . Из выращенного образца был вырезан активный элемент (АЭ) сечением 17×10 мм и длиной 10 мм.

Оптическая схема установки представлена на рис.1. АЭ был установлен под углом Брюстера на медном хладопроводе внутри криостата, окнами которого служили плоскопараллельные пластины из CaF_2 , также расположенные под углом Брюстера. Все эксперименты проводились при охлаждении кристалла $ZnSe:Fe$ до температуры жидкого азота. Резонатор $Fe^{2+}:ZnSe$ -лазера был образован глухим задним зеркалом 1 радиусом 50 см и плоским выходным зеркалом 2 с коэффициентом отражения 70 % на длине волны 4 мкм, нанесенным на подложку из CaF_2 . Длина резонатора составляла 30 см.

Накачка $Fe^{2+}:ZnSe$ -лазера осуществлялась излучением $Er:YAG$ -лазера с выходной энергией 0.6 Дж и длительностью импульса 300 мкс, работавшего в режиме свободной генерации на длине волны 2.9364 мкм. Излучение накачки было линейно поляризовано, благодаря че-

В.А.Акимов, А.А.Воронов. Московский физико-технический институт, Россия, 141700 Долгопрудный, Московская обл., 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

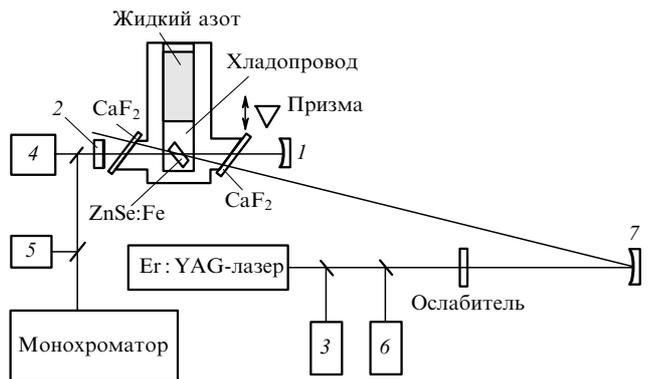


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – глухое зеркало; 2 – выходное зеркало; 3, 4 – калориметры; 5, 6 – фотоприемники; 7 – длиннофокусное зеркало.

му сводились к минимуму его потери, связанные с френелевским отражением на поверхностях АЭ и окон криостата. Накачка кристалла ZnSe: Fe осуществлялась под небольшим углом к оптической оси резонатора. Пучок накачки фокусировался длиннофокусным зеркалом 7 так, что его поперечное сечение перед входом в кристалл имело форму эллипса с осями 3.5 и 2.5 мм. Кристаллом поглощалось 54 % подводимой энергии накачки. При изучении зависимости выходной энергии лазера от энергии накачки снижение энергии накачки осуществлялось с помощью набора ослабителей, в качестве которых использовались калиброванные светофильтры.

Энергия накачки и выходная энергия Fe²⁺:ZnSe-лазера измерялись соответственно калориметрами 3 и 4 (измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н). При исследовании спектральной перестройки лазера в его резонаторе устанавливалась дисперсионная призма из CaF₂. Длина волны генерации измерялась с помощью дифракционного монохроматора. Формы импульсов накачки и генерации регистрировались с помощью фотоприемников 5 и 6 (фотоспротивления ФСГ-22), сигналы с которых поступали на запоминающий осциллограф.

3. Результаты эксперимента

Типичные формы импульсов накачки и генерации представлены на рис.2. Импульс накачки имел нерегулярную пиковую структуру. Импульс генерации также

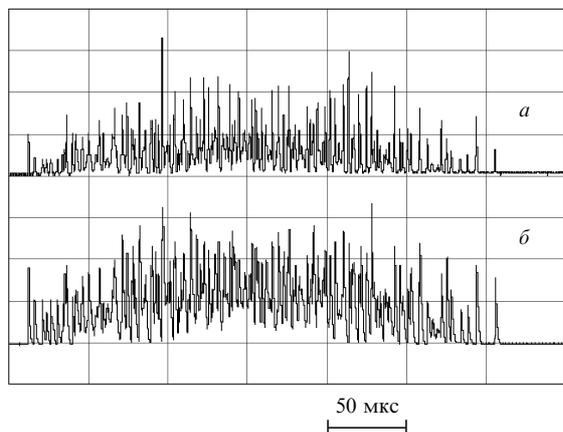


Рис.2. Оциллограммы импульсов накачки (а) и генерации (б) Fe²⁺:ZnSe-лазера.

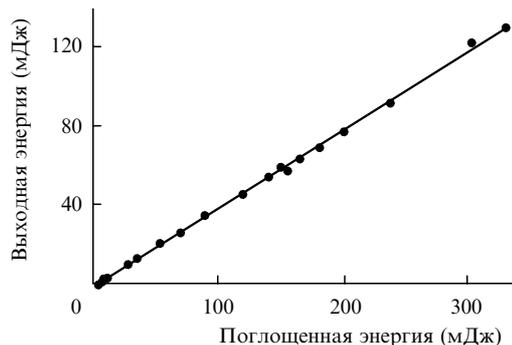


Рис.3. Зависимость выходной энергии Fe²⁺:ZnSe-лазера от поглощенной энергии накачки.

состоял из пиков, следовавших за пиками накачки с задержкой 0.2–0.5 мкс (в зависимости от уровня превышения накачки над пороговым значением). На рис.3 представлена зависимость выходной энергии Fe²⁺:ZnSe-лазера от поглощенной энергии накачки, полученная без призмочки в резонаторе. Центр спектра генерации в этом случае находился на длине волны 4.04 мкм, ширина спектра составляла 0.03 мкм. Из построенной по экспериментальным точкам прямой были определены пороговое значение поглощенной энергии накачки (5 мДж) и дифференциальный КПД лазера по поглощенной энергии, оказавшийся равным 40 %, что соответствует квантовой эффективности 55 %. Максимальная выходная энергия в наших экспериментах составила 130 мДж.

Использование в качестве селектора длины волны дисперсионной призмы из CaF₂ позволило осуществить плавную перестройку спектра генерации Fe²⁺:ZnSe-лазера в диапазоне 3.77–4.40 мкм. Перестроечная кривая, полученная при поглощенной энергии накачки 265 мДж и температуре жидкого азота, представлена на рис.4,а. Поскольку пропускание выходного зеркала возрастало с увеличением длины волны (см. рис.4,б), это, в принципе, могло ограничивать в наших экспериментах длинноволновую границу перестроечной кривой. По-видимому, ис-

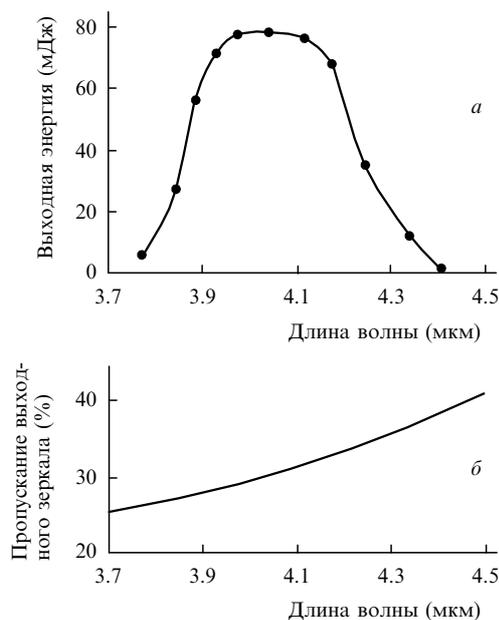


Рис.4. Спектр генерации Fe²⁺:ZnSe-лазера (а) и зависимость пропускания выходного зеркала от длины волны (б).

пользование зеркала с не зависящим от длины волны спектром пропускания позволит продвинуться в область еще больших длин волн.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе показано, что при накачке излучением Er:YAG-лазера с длиной волны 2.9364 мкм лазер на кристалле ZnSe:Fe при температуре жидкого азота обеспечивает дифференциальный КПД 40 % по поглощенной энергии, что соответствует квантовой эффективности 55 %. В дисперсионном резонаторе с призмой реализована плавная перестройка спектра генерации в диапазоне 3.77–4.40 мкм. Полученные нами максимальная выходная энергия Fe²⁺:ZnSe-лазера (130 мДж) на четыре порядка, а дифференциальный КПД (40 %) в пять раз превышают значения, достигнутые в работе [2].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (грант CRDF BRNE REC-011) и Программы фундаментальных исследований РАН «Новые материалы и структуры».

1. DeLoach L.D., Page R.H., Wilke G.D., Payne S.A., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 885 (1996).
2. Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24**, 1720 (1999).
3. Page R.H., Schaffers K.I., DeLoach L.D., Wilke G.D., Patel F.D., Tassano J.B., Payne S.A., Krupke W.F., Chen K.-T., Burger M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 609 (1997).
4. Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **33**, 408 (2003).
5. Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Кр. сообщ. по физ. ФИАН*, № 2, 39 (2004).
6. Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Nasibov A.S., Shapkin P.V. *J. Cryst. Growth*, **159**, 181 (1996).