

Лазерные характеристики кристалла Fe : ZnSe в диапазоне температур 85 – 255 К

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

Исследована зависимость эффективности генерации лазера на кристалле Fe : ZnSe, выращенном из паровой фазы методом свободного роста, от температуры в диапазоне 85 – 255 К. При увеличении температуры дифференциальная эффективность (ДЭ) лазера по поглощенной энергии снижалась с 43 % (85 К) до 9 % (255 К), а его спектр генерации смещался соответственно от 4.0 до 4.17 мкм. Реализована генерация Fe²⁺ : ZnSe-лазера при охлаждении кристалла термоэлектрическим модулем до температуры ~ 220 К. В этом случае ДЭ лазера по поглощенной энергии составила 30 %. В лазере с термоэлектрическим охлаждением достигнута выходная энергия 142 мДж при ДЭ по отношению к падающей энергии накачки 21 %.

Ключевые слова: ИК лазеры, перестраиваемые твердотельные лазеры, Fe²⁺ : ZnSe-лазер.

1. Введение

Кристалл ZnSe, легированный ионами Fe²⁺, является перспективной лазерной средой для среднего ИК диапазона спектра. Впервые генерация Fe²⁺ : ZnSe-лазера была продемонстрирована авторами [1] в спектральной области 3.98 – 4.54 мкм. В этой работе использовался кристалл Fe : ZnSe, выращенный методом Бриджмена. Импульсная генерация наблюдалась при охлаждении кристалла от 15 до 180 К. Максимальная дифференциальная эффективность (ДЭ) лазера по поглощенной энергии была получена при температуре 150 К и составила 8.2 %, а максимальная выходная энергия достигла 12 мДж. Перестройка спектра генерации осуществлялась путем изменения температуры кристалла.

Значительно более высокие параметры Fe²⁺ : ZnSe-лазера были продемонстрированы нами в работах [2, 3]. В частности в работе [3] с использованием кристалла Fe : ZnSe, выращенного из паровой фазы, была получена ДЭ лазера 40 % и максимальная выходная энергия 130 мДж. Для перестройки спектра генерации использовался дисперсионный призмный резонатор, с помощью которого продемонстрирована плавная перестройка спектра в диапазоне 3.77 – 4.40 мкм. Приведенные результаты были получены при охлаждении кристалла Fe : ZnSe жидким азотом.

Очевидно, что необходимость использования жидкого азота является большим недостатком лазера, поскольку создает значительные неудобства при его эксплуатации. В настоящей работе исследованы характеристики Fe²⁺ : ZnSe-лазера в широком диапазоне темпера-

тур и изучена возможность его работы при охлаждении кристалла термоэлектрическим модулем.

2. Изготовление активного элемента

Активный элемент Fe²⁺ : ZnSe-лазера с поперечными размерами 17 × 10 мм и длиной 10 мм был вырезан из монокристалла Fe : ZnSe, выращенного из паровой фазы методом свободного роста на монокристаллическую заготовку с использованием химического транспорта в водороде. Легирование кристалла ионами Fe²⁺ осуществлялось непосредственно в процессе роста. Технология выращивания была близка к технологии, разработанной для выращивания монокристаллов твердых растворов соединений A₂B₆ [4]. Рост проводился из отдельных источников, содержащих поликристаллические соединения ZnSe и FeSe. Измеренная по спектру поглощения с учетом приведенного в [1] сечения поглощения концентрация ионов Fe²⁺ составила ~ 1 × 10¹⁸ см⁻³.

3. Экспериментальная установка

Исследования генерационных и спектральных характеристик Fe²⁺ : ZnSe-лазера при различных температурах активного элемента проводились на установке, оптическая схема которой представлена на рис.1. Кристалл

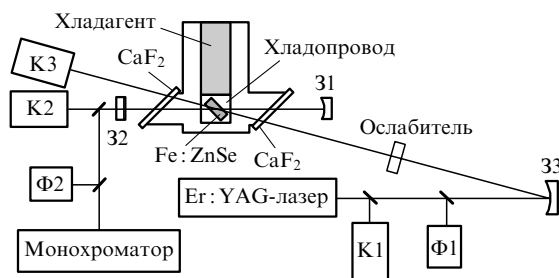


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 31, 32 – зеркала резонатора; 33 – фокусирующее зеркало; К1, К2 – калориметры; Ф1, Ф2 – фотоприемники.

А.А.Воронов. Московский физико-технический институт (государственный университет), 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

Поступила в редакцию 29 июля 2005 г.

Fe: ZnSe был установлен под углом Брюстера к оси резонатора на медном хладопроводе внутри вакуумной криогенной камеры, окнами которой служили плоскопараллельные пластины из CaF_2 , также расположенные под углом Брюстера. Камера была изготовлена из нержавеющей стали. Хладопровод прикреплялся ко дну тонкостенного стакана с жидким хладагентом. Резонатор $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера был образован сферическим зеркалом 31 (радиус кривизны 50 см) с коэффициентом отражения, близким к 100 %, и плоским выходным зеркалом 32 с коэффициентом отражения 70 % в окрестности длины волны 4 мкм. Длина резонатора составляла 32 см.

Источником накачки $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера служил импульсный Er: YAG-лазер с ламповой накачкой, работавший в режиме свободной генерации на длине волны 2.9364 мкм. Выходной импульс Er: YAG-лазера имел длительность 200 мкс и энергию до 0.75 Дж. Излучение накачки было линейно поляризовано, причем вектор электрического поля лежал в плоскости падения пучка накачки на лазерный кристалл и окна камеры. Благодаря этому сводились к минимуму потери излучения накачки, связанные с френелевским отражением на поверхностях активного элемента и окон криогенной камеры. Излучение накачки входило в кристалл под небольшим углом ($\sim 2^\circ$) по отношению к оптической оси резонатора. Пучок накачки фокусировался сферическим зеркалом 33 с фокусным расстоянием 75 см так, что его поперечное сечение перед входом в кристалл имело форму эллипса с осями 3 и 3.5 мм. Изменение энергии накачки осуществлялось с помощью набора ослабителей, в качестве которых использовались калиброванные светофильтры.

Падающая на кристалл энергия накачки, выходная энергия $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера и прошедшая через кристалл энергия накачки измерялись соответственно калориметрами К1, К2 и К3 (измерители средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н). Одновременная регистрация падающей и прошедшей энергий накачки позволяла надежно определять поглощенную кристаллом энергию. Длина волны генерации $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера измерялась с помощью дифракционного монохроматора.

Форма импульсов накачки и генерации регистрировалась соответственно фотоприемниками Ф1 и Ф2 (фотосопротивления ФСГ-22-3А2), сигналы с которых поступали на осциллограф Tektronix TDS 1012. Импульс накачки имел нерегулярную пиковую структуру, характерную для многомодовых импульсных твердотельных лазеров. Импульс генерации также состоял из пиков, при достаточно высокой энергии накачки следовавших за пиками накачки с задержкой 0.2–0.5 мкс, которая зависела от превышения накачкой порогового уровня.

При исследовании зависимости эффективности генерации $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от температуры активного элемента в качестве хладагента использовался жидкий азот либо этиловый спирт, охлаждаемый жидким азотом до требуемой температуры. Температура контролировалась с помощью термопары медь–константан, измерительный спай которой был установлен внутри отверстия, просверленного в медном хладопроводе. Погрешность измерения температуры кристалла не превышала 3 К.

4. Результаты и их обсуждение

Нами были исследованы лазерные характеристики кристалла Fe: ZnSe при температуре активного элемен-

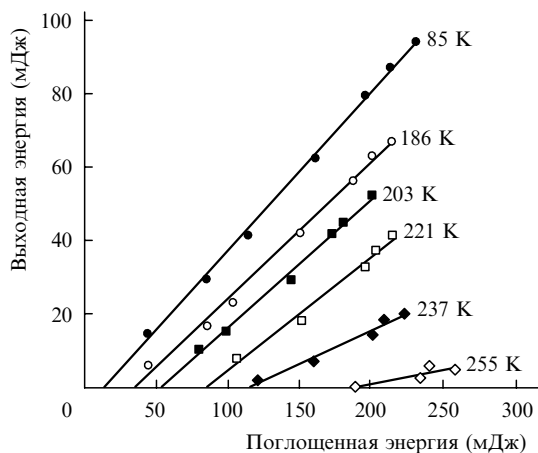


Рис.2. Зависимости выходной энергии $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от поглощенной энергии накачки, полученные при различных температурах.

та $T = 85 - 255$ К. На рис.2 в качестве примера представлены зависимости выходной энергии лазера от поглощенной энергии накачки, полученные при различных температурах.

Через экспериментальные точки методом наименьших квадратов проведены прямые линии, с помощью которых для каждой температуры были определены ДЭ лазера и пороговая поглощенная энергия накачки.

На рис.3 и 4 представлены совокупные результаты, отражающие температурные зависимости ДЭ лазера по поглощенной энергии и пороговой поглощенной энергии накачки. Максимальная ДЭ лазера, составляющая 43 % (квантовая эффективность 59 %), была получена при $T = 85$ К. При энергии накачки 733 мДж мы получили (при этой же температуре) максимальную выходную энергию 187 мДж (поглощенная энергия накачки равна 470 мДж).

Из рис.3 видно, что дифференциальная эффективность $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера монотонно снижается с ростом температуры во всем исследованном нами диапазоне (85–255 К). Это противоречит результатам работы [1], где генерация наблюдалась только при $T < 180$ К, причем максимальная эффективность была получена при $T = 150$ К. Из рис.4 видно, что пороговая энергия накачки лазера, составляющая 15 мДж при $T = 85$ К, резко возрастает при температурах выше 200 К, что, по видимому, связано с уменьшением времени жизни верхнего лазерного уровня из-за процессов релаксации [1].

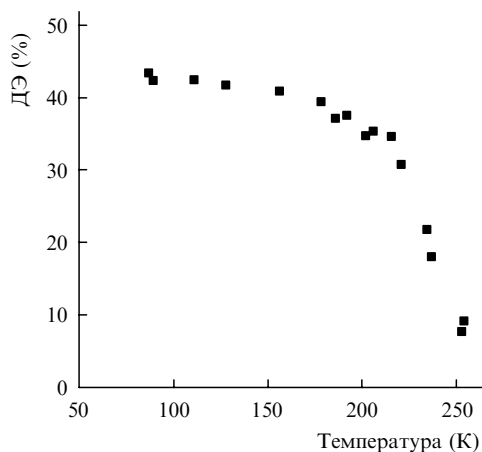


Рис.3. Зависимость ДЭ по поглощенной энергии $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от температуры.

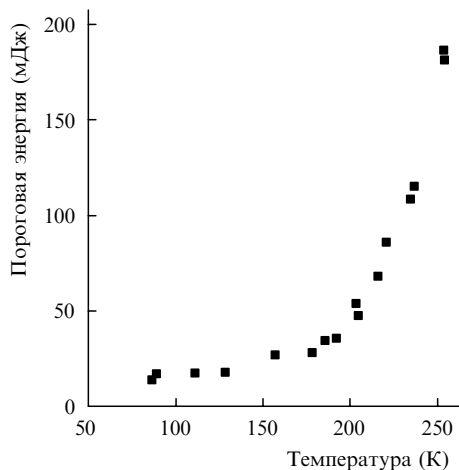


Рис. 4. Зависимость пороговой поглощенной энергии накачки от температуры.

Смещение спектра генерации лазера с ростом температуры в область больших длин волн (рис.5) обусловлено смещением красной границы спектра поглощения кристалла Fe : ZnSe в длинноволновую область при увеличении температуры [1]. Длина волны генерации возросла с 4 мкм при $T = 85$ К до 4.17 мкм при $T = 255$ К, что отличается от наблюдавшегося в [1] смещения спектра от 3.98 до 4.54 мкм. Это может объясняться спектральной зависимостью коэффициента отражения использованного нами выходного зеркала, который уменьшался от 70 % для $\lambda = 4$ мкм до 59 % для $\lambda = 4.5$ мкм.

Вышеприведенные данные показали (см. рис.3), что ДЭ лазера по поглощенной энергии накачки, превышающая 30 %, реализуется при температурах кристалла ниже 220 К. Поскольку $T = 220$ К может быть легко достигнута с помощью двухступенчатого термоэлектрического охлаждающего модуля, в настоящей работе мы исследовали характеристики лазера с термоэлектрическим охлаждением кристалла.

Для работы с термоэлектрическим охлаждающим модулем была сконструирована криогенная камера, корпус которой изготовлен из дюралюминия. Тепло выделяющая поверхность термомодуля находилась в тепловом контакте с массивным дном корпуса камеры при температуре, близкой к комнатной. Использовался двухступенчатый термомодуль, температура теплопоглоща-

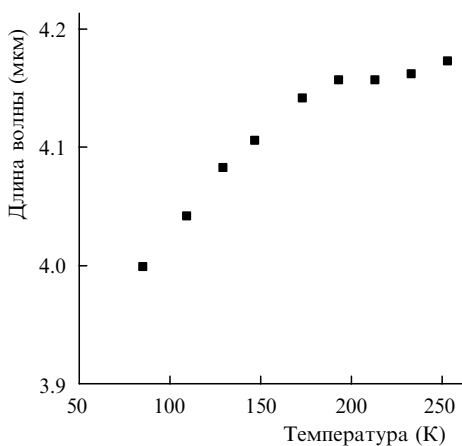


Рис. 5. Перестройка спектра генерации Fe²⁺ : ZnSe-лазера при изменении температуры кристалла.

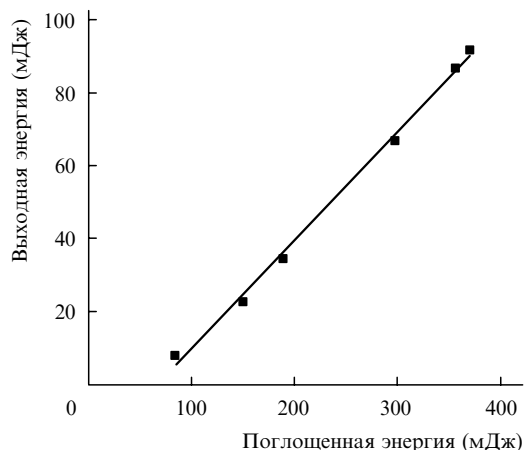


Рис. 6. Зависимость выходной энергии Fe²⁺ : ZnSe-лазера от поглощенной энергии накачки при термоэлектрическом охлаждении кристалла.

ющей поверхности которого в наших экспериментальных условиях согласно паспортным данным была близка к 220 К. Температура кристалла в этом случае не измерялась. Оптическая схема установки оставалась прежней.

Зависимость выходной энергии лазера от поглощенной энергии накачки, полученная при термоэлектрическом способе охлаждения кристалла двухступенчатым термомодулем, показана на рис.6. При поглощенной энергии накачки 370 мДж максимальная выходная энергия лазера была равна 91 мДж (падающая энергия накачки 718 мДж). ДЭ лазера по поглощенной энергии составляла 30 %. Представленные на рис.6 данные находятся в хорошем соответствии с данными, полученными нами при $T = 221$ К в случае охлаждения кристалла этиловым спиртом (см. рис.2).

Использовавшийся в настоящей работе лазерный элемент имел значительное пропускание на длине волны накачки, величина которого зависела от температуры. Измерения показали, что охлаждаемый термомодулем кристалл в режиме генерации пропускал 48 % падающей энергии накачки. Это существенно ограничивало ДЭ лазера по падающей энергии накачки, которая составила 14.5 %. Для увеличения ДЭ, мы установили два дополнительных зеркала с алюминиевым покрытием; они возвращали в кристалл прошедшее излучение на-

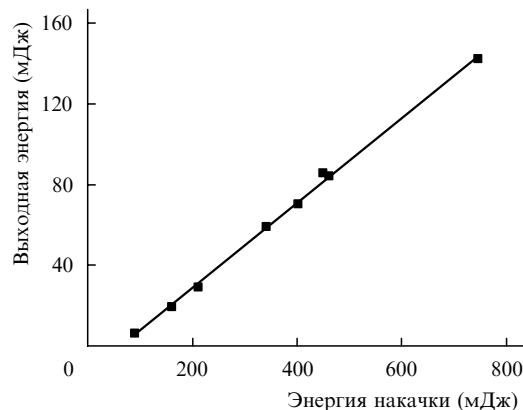


Рис. 7. Зависимость выходной энергии Fe²⁺ : ZnSe-лазера от падающей энергии накачки при двукратном прохождении излучения накачки через активный элемент.

качки так, что оно пересекало оптическую ось резонатора под углом $\sim 4^\circ$ в центре кристалла. Зависимость выходной энергии $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от полной энергии накачки при двукратном прохождении излучения накачки через активный элемент представлена на рис.7. Более эффективное использование излучения накачки привело к росту выходной энергии лазера с термоэлектрическим охлаждением и позволило довести ее до 142 мДж при падающей энергии накачки 746 мДж. ДЭ лазера с термоэлектрическим охлаждением по отношению к падающей энергии накачки составила в этом случае 21 %.

Таким образом, оптимизация лазерного резонатора (подбор оптимального коэффициента отражения выходного зеркала, устранение внутрирезонаторных потерь на окнах камеры, лучшее согласование областей накачки и генерации), возможно, позволит достигнуть еще более высоких параметров $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера.

5. Заключение

В настоящей работе исследована генерация $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в диапазоне температур активного элемента 85–255 К. При увеличении температуры дифференциальная эффективность лазера по поглощенной энергии снижалась с 43 % ($T = 85$ К) до 9 % (255 К), а его спектр генерации смещался соответственно от 4.0 до 4.17 мкм.

Впервые была реализована генерация $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при охлаждении кристалла термоэлектрическим элементом. В этом случае дифференциальная эффективность лазера по поглощенной энергии составила 30 %. Показано, что при термоэлектрическом охлаждении кристалла эффективность лазера по отношению к падающей энергии накачки может превышать 20 %.

Работа частично поддержана совместной российско-американской Программой «Фундаментальные исследования и высшее образование» Министерства образования и науки РФ и Американского фонда гражданских исследований и развития (грант CRDF MO-011-0/B2M411), Программой фундаментальных исследований РАН «Новые материалы и структуры» и Программой Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 37900).

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. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 2, 39 (2004).
3. Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **34**, 912 (2004).
4. Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Nasibov A.S., Shapkin P.V. *J. Crystal Growth*, **159**, 181 (1996).