

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Московский физико-технический институт  
(государственный университет)»

На правах рукописи  
УДК 621.373.826

Воронов Артём Анатольевич

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРА НА КРИСТАЛЛЕ  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ .

01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Долгопрудный – 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Фролов Михаил Павлович  
(ФИАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Колеров Андрей Николаевич  
(МИЭТ)

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Баленко Валерий Геннадиевич  
(ФГУП ГНЦ «НИОПИК»)

Ведущая организация: Научный центр волоконной оптики  
Российской академии наук

Защита состоится «21» апреля 2010 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.156.01 при Московском физико-техническом институте по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института.

Автореферат разослан «11» марта 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н., доцент



А.С. Батурин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время лазеры нашли широкое применение в промышленности, медицине, телекоммуникациях. Для некоторых приложений используются лазеры на основе активных сред, обладающих широким контуром усиления и позволяющих плавно перестраивать длину волны генерации. В видимой области спектра для этих задач используют лазеры на растворах красителей. Они обладают высоким КПД и большим диапазоном перестройки длины волны. В инфракрасной (ИК) области спектра расположены сильные линии поглощения многих молекул, обусловленные колебательно-вращательными переходами, поэтому применение лазеров с длиной волны генерации в ИК диапазоне позволяет повысить чувствительность методов спектрального анализа и успешно применять такие лазеры в науке и технике, например, для исследования кинетики химических реакций, экологического мониторинга атмосферы, в медицине и т.д. [1]

В последние годы активно ведется поиск и исследование лазерных сред для диапазона 2-5 мкм. Одними из наиболее перспективных кандидатов на эту роль являются кристаллы на основе халькогенидов (ZnS, ZnSe и др.), легированные двухвалентными ионами переходных металлов (Cr, Ni, Fe и др.) [2]. Наиболее исследованным из этой группы является кристалл  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ . При использовании активных элементов лазеров, изготовленных из кристаллов  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ , была получена эффективная генерация в непрерывном и импульсном режимах, продемонстрирована возможность перестройки в широком спектральном диапазоне (1.88-3.10 мкм) [3, 4]. Кроме того, продемонстрирована генерация в лазерах на кристаллах ZnS, ZnSe,  $\text{Cd}_{0.85}\text{Mn}_{0.15}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.55}\text{Mn}_{0.45}\text{Te}$ , CdSe, легированных ионами  $\text{Cr}^{2+}$  [3, 5], и в кристалле ZnSe, легированном ионами  $\text{Fe}^{2+}$  [6, 7]. Последний из перечисленных кристаллов особенно интересен тем, что его область люминесценции смещена в длинноволновую область спектра дальше остальных, на которых была получена генерация. К сожалению, дифференциальный КПД по поглощенной энергии и максимальная энергия генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера, полученные в работе [6], были небольшими и существенно уступали по величине аналогичным параметрам  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. Генерация возникала при охлаждении активного элемента до температур в диапазоне от 15 до 180 К.

Кристалл  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , используемый в работе [6] в качестве активного элемента, был выращен методом Бриджмена. Тем не менее, известно, что

кристаллы, выращенные из паровой фазы, обладают большей оптической однородностью, меньшими потерями и более высокими лазерными характеристиками [8]. Поэтому для получения высоких КПД и максимальной энергии в импульсе перспективно в качестве активного элемента использовать кристалл, полученный из паровой фазы с одновременным легированием ионами  $\text{Fe}^{2+}$  в процессе роста. В наших исследованиях лазерных характеристик использовались монокристаллы  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенные из паровой фазы с одновременным легированием по уникальной технологии, разработанной в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН) [9].

Кристаллы халькогенидов, легированные ионами переходных металлов, обладают широкой полосой поглощения и достаточно большим сечением поглощения для успешного использования в качестве затворов для пассивной модуляции добротности резонаторов лазеров с длиной волны генерации в среднем инфракрасном спектральном диапазоне. Кристалл  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  при комнатной температуре может использоваться как затвор в резонаторах лазеров, работающих на длине волны вблизи 3 мкм.

#### **Цель диссертационной работы:**

Целью настоящей работы является исследование генерационных и спектральных характеристик лазера на кристалле  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенном из паровой фазы с одновременным легированием, в широком диапазоне температур активного элемента; изучение спектрально-кинетических характеристик этого лазера применительно к задачам метода внутрирезонаторной лазерной спектроскопии и достижение режима модуляции добротности резонатора лазера, излучающего на длине волны вблизи 3 мкм, с использованием в качестве пассивного модулятора добротности насыщающегося поглотителя, изготовленного из кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ .

Основные задачи диссертационной работы:

1. Получить наибольшее значение дифференциального КПД для кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  и исследовать его зависимость от температуры активного элемента.
2. Получить эффективную (дифференциальный КПД  $>10\%$ ) генерацию при комнатной температуре активного элемента  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера.
3. Получить максимальный диапазон плавной перестройки  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в дисперсионном резонаторе.
4. Изучить возможность использования кристалла в качестве пассивного затвора для модуляции добротности резонатора лазера, излучающего вблизи длины волны 3 мкм.

5. Получить режим непрерывной генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера.

6. Исследовать возможность применения  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в одном из высокочувствительных методов спектрального анализа — методе внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС).

### **Научная новизна:**

- Впервые измерены лазерные характеристики кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенного из паровой фазы с одновременным легированием.

- Получен рекордный суммарный диапазон непрерывной перестройки по длине волны генерации в дисперсионном резонаторе для  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. Длинноволновая граница при температуре активного элемента 295 К составила 5.05 мкм, а коротковолновая — 3.77 мкм (при температуре 85 К).

- Впервые измерено время затухания люминесценции уровня  $^5\text{T}_2$  кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  при комнатной температуре.

- Впервые кристалл  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  был успешно использован в качестве пассивного модулятора добротности резонатора  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера.

- Впервые получена генерация на кристалле  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  в непрерывном режиме.

- Продемонстрирована возможность использования  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в методе внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС).

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. При использовании в качестве активного элемента лазера монокристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенного из паровой фазы с одновременным легированием, по сравнению с активными элементами, изготовленными из кристаллов  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , полученных в результате роста из расплава с необходимой лигатурой или роста из паровой фазы нелегированного кристалла  $\text{ZnSe}$  с последующей диффузией  $\text{Fe}$  в твердом теле через поверхность, достигаются режимы генерации излучения с более высоким дифференциальным КПД и более широким суммарным диапазоном плавной перестройки длины волны генерации в селективном резонаторе (3.77-4.40 мкм при температуре активного элемента 85 К и 3.95-5.05 мкм при 295 К).

2. Использование кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  в качестве просветляющегося поглотителя для модуляции добротности резонатора  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера позволяет реализовать режим генерации гигантских импульсов  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера и получать гигантские импульсы с энергией 27-30 мДж и длительностью 35 нс.

3. Использование в качестве активного элемента лазера монокристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенного из паровой фазы с одновременным легированием, позволяет реализовать режим непрерывной генерации излучения  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера.

4. Метод внутриврезонаторной лазерной спектроскопии на основе  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера обеспечивает чувствительность регистрации слабых линий поглощения не хуже  $4 \times 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ .

### **Практическая значимость работы**

В настоящей работе были исследованы генерационные и спектрально-кинетические характеристики монокристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенного из паровой фазы с одновременным легированием.

Достигнутые высокие дифференциальная эффективность и диапазон перестройки длины волны генерации позволяют спроектировать и создать эффективный компактный твердотельный лазер, перестраиваемый в широком спектральном диапазоне. Показано, что при накачке длинными импульсами  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер обладает дифференциальным КПД не менее 30% вплоть до температуры 220 К, которая может быть достигнута при охлаждении термоэлектрическим элементом. Это позволит существенно снизить затраты на эксплуатацию промышленного образца лазера в случае его создания.

Показано, что кристалл  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  может быть использован в качестве пассивного затвора для модуляции добротности резонатора  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера, что позволило получить генерацию излучения в режиме гигантских импульсов малой длительности.  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазер, генерирующий излучение в режиме гигантских импульсов, может применяться, например, в медицине [1]. Потенциально кристалл  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  возможно использовать в качестве пассивного модулятора добротности резонаторов других лазеров, излучающих вблизи 3 мкм.

Метод внутриврезонаторной лазерной спектроскопии может быть использован для регистрации слабых линий поглощения в спектральной области генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. Это, в частности, предоставляет возможность измерять малые концентрации веществ, что является актуальным для решения задач экологического мониторинга в окнах прозрачности атмосферы, а также контроля кинетики химических реакций.

В результате работы над диссертацией был создан научно-исследовательский стенд в МФТИ, который может быть использован в дальнейшем для исследований свойств других кристаллов халькогенидов,

легированных ионами переходных металлов.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием стандартных методик проведения измерений и измерительного оборудования с оценкой и учетом их экспериментальной погрешности.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях и школах:

1. 46 научная конференция МФТИ // 2003, Москва-Долгопрудный, Россия.
2. IX Международная школа-семинар по люминесценции и лазерной физике ЛЛФ-2004 // 2004, Иркутск, Россия.
3. 47 научная конференция МФТИ // 2004, Москва-Долгопрудный, Россия.
4. ICONO/LAT 2005 // 2005, St. Petersburg, Russia.
5. 12-th International Conference on II-VI Compounds // 2005, Warsaw, Poland.
6. 48 научная конференция МФТИ // 2005, Москва-Долгопрудный, Россия.
7. Демидовская конференция в Москве “Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики” // 2006, Москва, Россия.
8. XII Conference on Laser Optics // 2006, St. Petersburg, Russia (2 доклада).
9. XII Национальная конференция по росту кристаллов (НКРК-2006) // 2006, Москва, Россия.
10. 49 научная конференция МФТИ // 2006, Москва-Долгопрудный, Россия.
11. Шестая международная школа молодых ученых “Физика окружающей среды” // 2007, г. Томск, Россия.
12. XIII Conference on Laser Optics // 2008, St. Petersburg, Russia.
13. 51 научная конференция МФТИ // 2008, Москва-Долгопрудный, Россия.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 9 статей и один препринт, из них 7 — в ведущих рецензируемых российских научных журналах, а 1 — в зарубежном научном журнале из списка изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертации на

соискание ученой степени кандидата наук.

## Структура работы

Диссертационная работа состоит из шести глав, введения и заключения. Объем работы составляет 151 страницу. Диссертация содержит 69 рисунков и одну таблицу. Список литературы состоит из 177 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту. Кроме того, приводится последовательность изложения материала диссертации.

**Первая глава** представляет собой обзор работ посвященных источникам когерентного излучения в среднем ИК диапазоне; методам выращивания кристаллов халькогенидов, легированных ионами переходных металлов, используемых в качестве активных элементов твердотельных лазеров; методам модуляции добротности резонаторов лазеров и применению этих кристаллов в качестве насыщающихся поглотителей; методам высокочувствительной абсорбционной спектроскопии, в том числе методу внутрирезонаторной лазерной спектроскопии на основе лазеров ИК диапазона спектра.

Для решения разных научных и практических задач используются источники когерентного излучения среднего ИК диапазона спектра с плавно перестраиваемой (изменяемой) длиной волны на основе оптических параметрических генераторов света, волоконных лазеров, диодных лазеров и других твердотельных лазеров [10]. В диссертации приведены достигнутые энергии, мощности, диапазоны плавной перестройки длины волны, а также указаны некоторые особенности их работы. Твердотельные лазеры на основе кристаллов халькогенидов, легированных ионами переходных металлов, обладают высокими дифференциальными эффективностями, мощностями и энергиями генерации, широкими диапазонами плавной перестройки длины волны:  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  (10 Вт, 73%, 1880-3100 нм),  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$  (0.7 Вт, 53%, 2050-2840 нм),  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  (импульсно-периодический режим со средней мощностью 815 мВт, 50%, 2.3-2.9 мкм),  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  (импульсы с энергией 12 мкДж, 8.2%, 3.98-4.54 мкм при температуре активного элемента  $T = 15\text{-}180\text{ K}$  и 3.9-4.8 мкм при  $T = 295\text{ K}$ ). Кристалл  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  интересен тем, что его область люминесценции и диапазон перестройки длины вол-



ны генерации сдвинуты в длинноволновую область спектра.

Этот и другие кристаллы халькогенидов, легированные ионами переходных металлов, выращиваются при помощи нескольких методов, например, в результате роста из расплава с необходимой лигатурой или роста из паровой фазы нелегированного кристалла (ZnS, ZnSe, CdSe, CdTe и др.) с последующей диффузией Cr или Fe в твердом теле через поверхность. Тем не менее, известно, что кристаллы, выращенные из паровой фазы, обладают большей оптической однородностью, меньшими потерями и более высокими лазерными характеристиками [8]. Метод выращивания из паровой фазы на монокристаллической затравке с одновременным легированием [9], позволяет выращивать монокристаллы диаметром и толщиной до нескольких сантиметров. Монокристаллы  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  с концентрацией ионов  $\text{Fe}^{2+}$  до  $2.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , исследуемые в настоящей работе, были изготовлены этим методом.

Активный элемент лазера на кристалле  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  по типу схемы энергетических уровней относится к активным элементам на электронно-колебательных переходах. Ионы железа  $\text{Fe}^{2+}$  обладают в свободном состоянии конфигурацией  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6$  ( $^5D_4$ ) и при легировании замещают ионы  $\text{Zn}^{2+}$  в кристаллической решетке ZnSe. Взаимодействие с тетраэдрическим кристаллическим полем кристалла приводит к частичному снятию вырождения термина  $^5D$  и появлению двух энергетических уровней  $^5T_2$  и  $^5E$  (см. рис. 1). Учет спин-орбитального взаимодействия первого и второго порядков и электронно-колебательного взаимодействия, обусловленного эффектом Яна-Теллера, приводит к дополнительному снятию вырождения и формированию схемы энергетических уровней, соответствующей активному элементу на электронно-колебательных переходах.

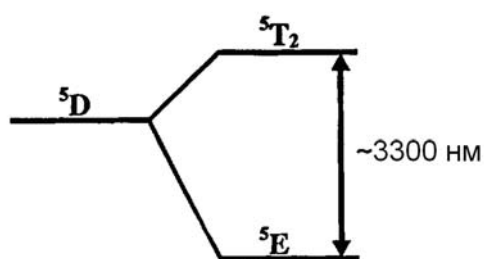


Рис. 1 — Схема энергетических уровней иона  $\text{Fe}^{2+}$  в кристалле ZnSe [11]

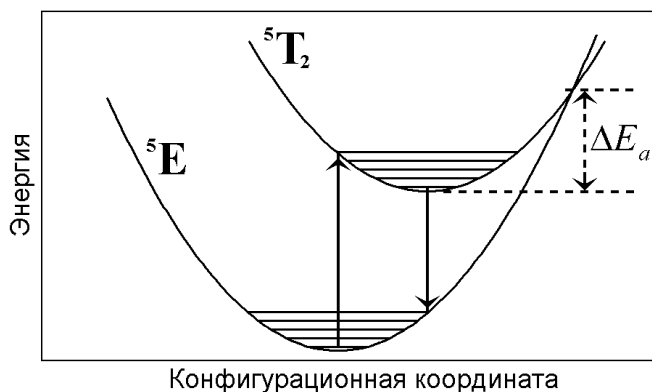


Рис. 2 — Упрощенная схема энергетических уровней иона  $\text{Fe}^{2+}$  в кристалле ZnSe с учетом колебаний [11]

Она подобна схеме лазера на красителе. Ее можно проиллюстрировать с использованием простой модели, схематически изображенной на рис. 2 [11], в которой рассматриваются две кривых потенциальной энергии: для основного уровня и возбужденного уровня в зависимости от смещения ионов решетки относительно их положений равновесия. Считается, что каждый из уровней имеет подуровни, обусловленные колебаниями по конфигурационной координате [11]. Переходы между двумя уровнями (изображены вертикальными стрелками) происходят без изменения конфигурационной координаты (принцип Франка-Кондона). Внутри уровней происходит быстрая колебательная релаксация.

Спектр поглощения и люминесценции кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , полученный в работе [6], представлен на рис.3. Зависимость времени затухания люминесценции уровня  ${}^5\text{T}_2$  иона  $\text{Fe}^{2+}$  в кристалле  $\text{ZnSe}$  от температуры представлена на рис. 4 [6].

В конце главы представлен обзор литературы, посвященный затворам, используемым для модуляции добротности резонаторов, и методам высокочувствительной спектроскопии. Кратко приведены основные результаты, полученные в ранее опубликованных работах.

**Во второй главе** сообщается о характеристиках лазера на кристалле  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  при охлаждении активного элемента до температур 85-255 К.

Активный элемент  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера был вырезан из монокристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенного из паровой фазы с одновременным легированием, с концентрацией ионов  $\text{Fe}^{2+}$  равной  $1 \times 10^{-18} \text{ см}^{-3}$ . Кристалл был размещен на хладопроводе внутри криостата под углом Брюстера относительно оптической оси резонатора. Его температура могла изменяться от 85 К до

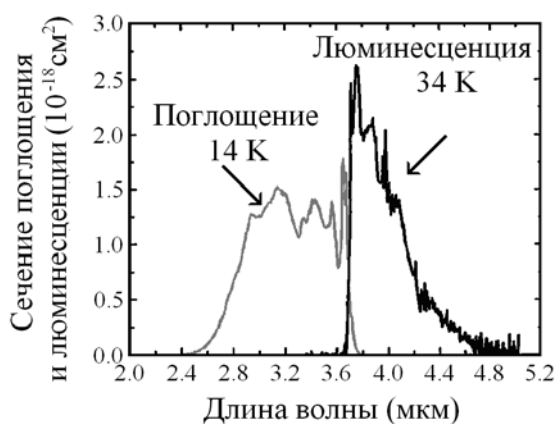


Рис. 3 — Спектры поглощения и люминесценции кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  [6]

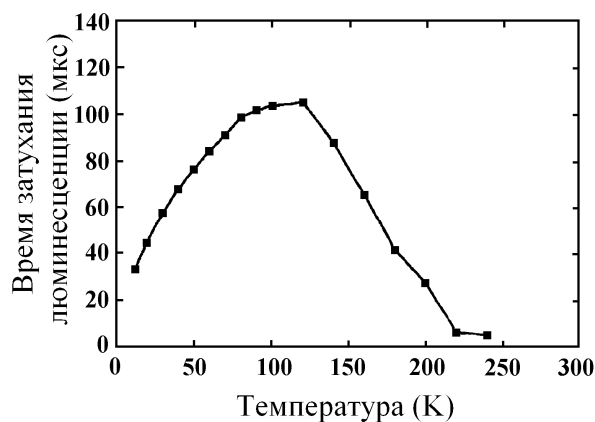


Рис. 4 — Зависимость времени затухания люминесценции уровня  ${}^5\text{T}_2$  иона  $\text{Fe}^{2+}$  в кристалле  $\text{ZnSe}$  от температуры [6]

комнатной и контролировалась с точностью 3 К с помощью калиброванной термопары, размещенной вблизи активного элемента. Накачка  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера осуществлялась под небольшим углом относительно оптической оси резонатора при помощи  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера, работающего в режиме свободной генерации, с энергией импульсов 0.75 Дж и длительностью 0.20 мс. Данная установка позволяла измерять энергию излучения накачки падающего на кристалл, энергию излучения накачки, прошедшего через кристалл, и энергию генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с точностью 10%. При установке в резонатор призмы из  $\text{CaF}_2$  длина волны генерации плавно перестраивалась за счет поворота заднего зеркала вокруг оси перпендикулярной плоскости дисперсии призмы. Длина волны генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера определялась с помощью дифракционного монохроматора, теоретическое разрешение которого было 1 нм.

В результате анализа экспериментальных данных зависимостей выходной энергии  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от поглощенной энергии накачки при температурах в диапазоне от 85 до 255 К были определены значения дифференциальных КПД лазера по поглощенной энергии при этих температурах (см.рис. 5).

Наибольшее значение дифференциального КПД достигалось при температуре 85 К и составляло 43%, что существенно превышало результат, полученный в работе [6]. Как следует из рис. 5, дифференциальная эффективность лазера по поглощенной энергии накачки монотонно убывает с увеличением температуры, причем в диапазоне температур от 85 К до 220 К рассматриваемая величина изменяется незначительно от 43% до 30%, а при более высоких температурах ее значение существенно уменьшается.

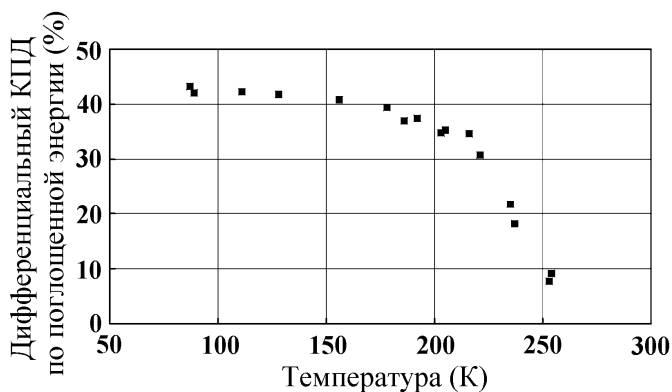


Рис. 5 — Зависимость дифференциального КПД  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера по поглощенной энергии от температуры

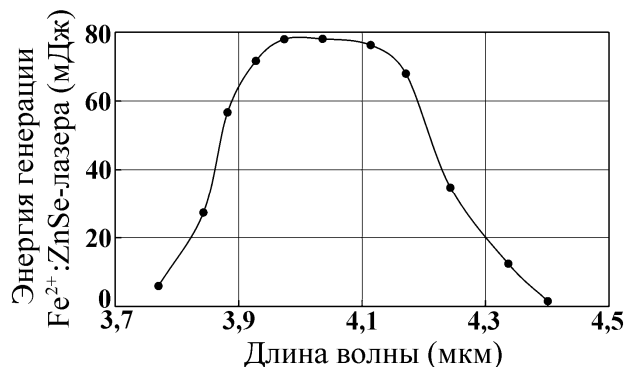


Рис. 6 — Зависимость энергии генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от длины волны в дисперсионном резонаторе при температуре активного элемента лазера равной 85 К

Температура 220 К может быть легко достигнута с помощью двухступенчатого термоэлектрического охлаждающего модуля без использования жидкого азота. Был изготовлен криостат с термоэлектрическим охлаждением активного элемента, реализована генерация  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера и проведены исследования его характеристик. Оптическая схема установки не изменялась. Дифференциальный КПД по поглощенной энергии накачки составил 30%, при энергии излучения накачки 0.72 Дж была достигнута энергия генерации 0.09 Дж. Измерения показали, что охлаждаемый термоэлектрическим модулем кристалл в режиме генерации пропускал 48% падающей энергии накачки. Это существенно ограничивало дифференциальный КПД лазера по падающей энергии накачки, который составил 14.5%. Чтобы повысить эту величину, излучение накачки, прошедшее через кристалл, с помощью зеркал возвращалось назад в область накачки. Более эффективное использование излучения накачки привело к росту наибольшей выходной энергии лазера с термоэлектрическим охлаждением и позволило довести ее уровень до 0.14 Дж при энергии излучения накачки равной 0.75 Дж. Дифференциальный КПД по падающей энергии составил 21%.

Была измерена область плавной перестройки длины волны генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. В неселективном резонаторе с увеличением температуры от 85 К до 255 К длина волны монотонно увеличивалась от 4.00 мкм до 4.17 мкм. С использованием в качестве дисперсионного элемента призмы из  $\text{CaF}_2$ , размещенной внутри резонатора, при неизменной температуре активного элемента 85 К и фиксированной поглощенной энергии 0.27 Дж была осуществлена плавная перестройка длины волны генерации от 3.77 мкм до 4.40 мкм (см.рис. 6).

**В третьей главе** рассматриваются перспективы использования кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  в качестве пассивного затвора для модуляции добротности резонатора  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера с целью получения режима генерации гигантских импульсов малой длительности.

Кристалл  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  поглощает излучение на длине волны генерации  $\text{Er}:\text{YAG}$ , причем для  $\lambda = 2.94$  мкм его сечение поглощения составляет  $9.5 \times 10^{-19}$  см<sup>2</sup>, что приблизительно в 35 раз превышает сечение лазерного перехода иона  $\text{Er}^{3+}$  в иттрий-алюминиевом гранате. Следовательно, он может быть использован в качестве пассивного затвора для модуляции добротности  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера. В настоящей работе с помощью численного моделирования был выполнен предварительный анализ процесса разви-

тия генерации Er:YAG-лазера с модулированной добротностью резонатора при помощи модифицированного варианта модели из работ [12, 13].

Экспериментально реализован режим пассивной модуляции добротности резонатора Er:YAG-лазера с ламповой накачкой при помощи кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ . Пороговая энергия накачки при наличии пассивного затвора в резонаторе составляла 49 Дж. При энергиях накачки 78-84 Дж лазер генерировал одиночные гигантские импульсы длительностью 35 нс (удовлетворительно согласуется с длительностью 41 нс, полученной в результате численного моделирования) и энергией 27-30 мДж. При энергиях накачки 85-90 Дж лазер генерировал пару близких по энергии гигантских импульсов с общей энергией 60-62 мДж, следовавших друг за другом через 20 мкс.

**Четвертая глава** посвящена лазерным характеристикам кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  при комнатной температуре, достигнутым при накачке с помощью коротких импульсов Er:YAG-лазера с модулированной добротностью резонатора.

Поскольку в литературе отсутствовали данные о значении времени затухания люминесценции уровня  $^5\text{T}_2$  иона  $\text{Fe}^{2+}$  в кристаллической решетке ZnSe при комнатной температуре, используя в качестве источника накачки Er:YAG-лазер с импульсами малой длительности (60 нс), было измерено время жизни уровня  $^5\text{T}_2$  при температуре 295К. Оно составило  $370 \pm 25$  нс.

Вследствие того, что происходит быстрая релаксация населенности верхнего лазерного уровня, для достижения генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при комнатной температуре необходима большая мощность накачки. В качестве источника накачки был использован Er:YAG-лазер с модулированной добротностью резонатора, работающий в режиме импульсов малой длительности (60 нс) с энергией до 20 мДж. Методика перестройки длины волны генерации с помощью призмы из  $\text{CaF}_2$ , а также погрешность измерительных приборов приведены в описании содержания второй главы диссертации.

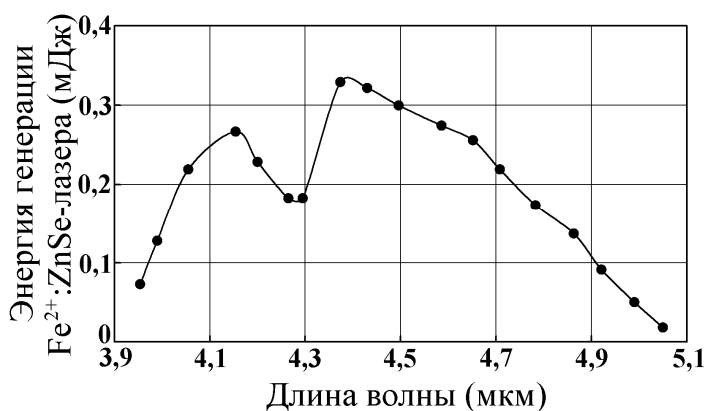


Рис. 7 — Зависимость энергии генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от длины волны в дисперсионном резонаторе при температуре активного элемента равной 295 К

В результате была получена генерация на кристалле  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  при комнатной температуре с максимальной энергией 1.4 мДж существенно превышающей  $\sim 1$  мкДж — результат достигнутый в работе [7]. Дифференциальный КПД по поглощенной энергии составил 17%. В селективном резонаторе с помощью призмы из  $\text{CaF}_2$  была осуществлена плавная перестройка длины волны генерации в диапазоне  $\lambda = 3.95\text{--}5.05$  мкм (см. рис. 7) с длинноволновой границей превышающей достигнутую в работе [7].

**Пятая глава** посвящена экспериментальной демонстрации работы  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в режиме непрерывной генерации.

Активный элемент  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера был вырезан из монокристалла с концентрацией ионов  $\text{Fe}^{2+}$  равной  $\sim 2.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и располагался внутри криостата на медном хладопроводе, охлаждаемом жидким азотом. Накачка кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  осуществлялась излучением непрерывного  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера, подробное описание которого можно найти в [14]. (Кристалл  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  — активный элемент лазера также принадлежит классу кристаллов халькогенидов, легированных ионами переходных металлов). Близкий к полуконцентрическому резонатор  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера был образован плоским зеркалом с коэффициентом отражения близким к 100% и выходным сферическим ( $R = 50$  мм) зеркалом. В экспериментах использовались выходные зеркала с пропусканием 2.9, 10.2, 17 и 34.5% в спектральной области генерации лазера. Поскольку рабочая грань кристалла, обращенная к выходному зеркалу, располагалась перпендикулярно оптической оси резонатора, выходным зеркалом  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера фактически служил интерферометр Фабри-Перо, образованный этим зеркалом и гранью кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  с френелевским отражением 17%. Поэтому при оценке пассивных потерь излучения в резонаторе в качестве коэффициента пропускания зеркала использовалась величина минимального пропускания этого интерферометра  $T_{\text{ФП}}$ .

В настоящей работе впервые реализован непрерывный режим генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. Достигнута выходная мощность лазера 160 мВт при дифференциальной эффективности по поглощенной мощности накачки 56%. С учетом соотношения энергий квантов генерации и накачки это соответствует дифференциальной квантовой эффективности 76%.

Используя значения дифференциальной эффективности  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера  $\eta$  для разных коэффициентов пропускания резонатора  $T_{\text{ФП}}$ , при помощи модели из работы [15] была произведена оценка потерь лазерного излучения за полный обход резонатора  $L$  и предельного КПД лазера

$\eta_0$  в соответствии с зависимостью:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\eta_0} + \frac{L}{\eta_0} \frac{1}{T_{\text{ФП}}} \quad (1)$$

Величина потерь не превышала 3.7%, следовательно (предполагая, что все потери определяются только внутренними потерями в кристалле) коэффициент поглощения на длине волны генерации составляет не более  $0.024 \text{ см}^{-1}$ , что доказывает высокое качество оптического элемента. Предельный КПД лазера в модели [15] вычисляется по формуле:

$$\eta_0 = \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \eta_p \left( 1 - \frac{\sigma_{\text{ESA}}}{\sigma} \right), \quad (2)$$

где  $\lambda_p$  — длина волны излучения накачки,  $\lambda_g$  — длина волны излучения генерации,  $\eta_p$  — эффективность использования излучения накачки,  $\sigma_{\text{ESA}}$  — сечение поглощения с верхнего лазерного уровня,  $\sigma$  — сечение лазерного перехода. Полученное  $\eta_0 = 67\%$  близко к максимально возможному значению КПД лазера 73%, определяемого отношением квантов генерации и накачки, что свидетельствует об отсутствии заметного поглощения с возбужденного уровня и хорошем согласовании области накачки и модового объема резонатора лазера.

$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер генерировал излучение, спектр которого лежал в пределах длин волн 4.04-4.08 мкм в зависимости от выходного зеркала. Ширина спектра излучения составляла  $\sim 10$  нм.

**В шестой главе** исследуется спектральная динамика  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  применительно к задачам метода внутррезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС). Значительное внимание уделено особенностям установки и методам обработки результатов. Результаты представлены в виде иллюстраций спектров и графиков.

Метод ВРЛС, предложенный в 1970 году в ФИАНе [16], является одним из высокочувствительных методов абсорбционной спектроскопии [17]. Для его реализации необходимо, чтобы однородная ширина контура усиления лазера значительно превосходила ширину линии поглощения исследуемого вещества. Это позволяет скомпенсировать потери в резонаторе на зеркалах и оптических элементах, расположенных на оси, поскольку они слабо зависят от длины волны генерации в пределах контура усиления лазера. А потери, обусловленные наличием поглотителя с малой ши-

риной линии поглощения, приводят к возникновению провалов в спектре излучения лазера при развитии генерации. Причем глубина провалов увеличивается со временем развития генерации в соответствии с формулой [17]:

$$\frac{I(\omega_0, t)}{I_0(\omega_0, t)} = \exp[-k(\omega_0)L_{\text{эфф}}] = \exp\left[-k(\omega_0)c(t_0 + t)\frac{l}{d}\right], \quad (3)$$

где  $\omega_0$  — частота, соответствующая максимуму контура исследуемой линии поглощения;  $t$  — время, отсчитываемое от момента возникновения генерации;  $I(\omega_0)$  — интенсивность генерации в центре спектрального провала;  $I_0(\omega_0)$  — значение интенсивности, соответствующее огибающей спектрального распределения излучения лазера в центре провала;  $k(\omega_0)$  — коэффициент поглощения исследуемого вещества для частоты  $\omega_0$ ;  $L_{\text{эфф}}$  — эффективная длина пути, характеризующая путь, который свет проходит за время развития спектрального провала с учетом коэффициента заполнения резонатора поглотителем;  $c$  — скорость света;  $t_0$  — время скрытого развития генерации, обусловленное в твердотельных лазерах существенным превышением времени жизни верхнего лазерного уровня над временем жизни фотона в резонаторе;  $l$  — толщина поглощающего слоя,  $d$  — оптическая длина резонатора. Отношение  $\frac{l}{d}$  называется коэффициентом заполнения резонатора.

Активный элемент  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера обладает широким спектром люминесценции (см. рис. 3), а лазер генерирует излучение в диапазоне длин волн (см. рис. 6), для которого ранее не были реализованы внутрирезонаторные лазерные спектрометры, поэтому была поставлена задача исследования возможности применения этого лазера в методе ВРЛС. В качестве поглотителя использовалась смесь метана ( $\text{CH}_4$ ) с атмосферным воздухом в соотношении 1:100, которой наполнялась кювета, расположенная внутри резонатора, при комнатной температуре и давлении, равном 1 атм. Чтобы уменьшить селективные по длине волны потери, обусловленные интерференцией на параллельных плоскостях, все элементы внутри резонатора были расположены под углом Брюстера относительно его оси, а зеркала были нанесены на клиновидные подложки. Для удобств-



ва регистрации ИК излучение  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера преобразовывалось в видимый диапазон с помощью сложения частот импульсом ( $\tau = 10$  мкс) монохроматического ( $0.05 \text{ см}^{-1}$ ) излучения Nd:YAG-лазера в нелинейном кристалле  $\text{LiNbO}_3$ , нагретом до температуры  $\sim 530^\circ\text{C}$  для достижения синхронизма. Это позволяло не только использовать в качестве детектора ПЗС линейки, чувствительные к видимому диапазону спектра, но и наблюдать за развитием спектральной динамики  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера во времени, меняя задержку между запуском преобразующего Nd:YAG-лазера и  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера, и переводя в видимый диапазон только малый временной интервал  $\tau$  генерации последнего. Остальное излучение убиралось при помощи светофильтров. Спектральное распределение сигнала записывалось с помощью дифракционного спектрографа. Точность регистрации спектра  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера по частоте (с учетом разрешения спектрографа и ширины спектра Nd:YAG-лазера, используемого для преобразования) составляла около  $0.05 \text{ см}^{-1}$ .

На рис. 8(в) и 8(г) представлены модельные спектры поглощения ис-

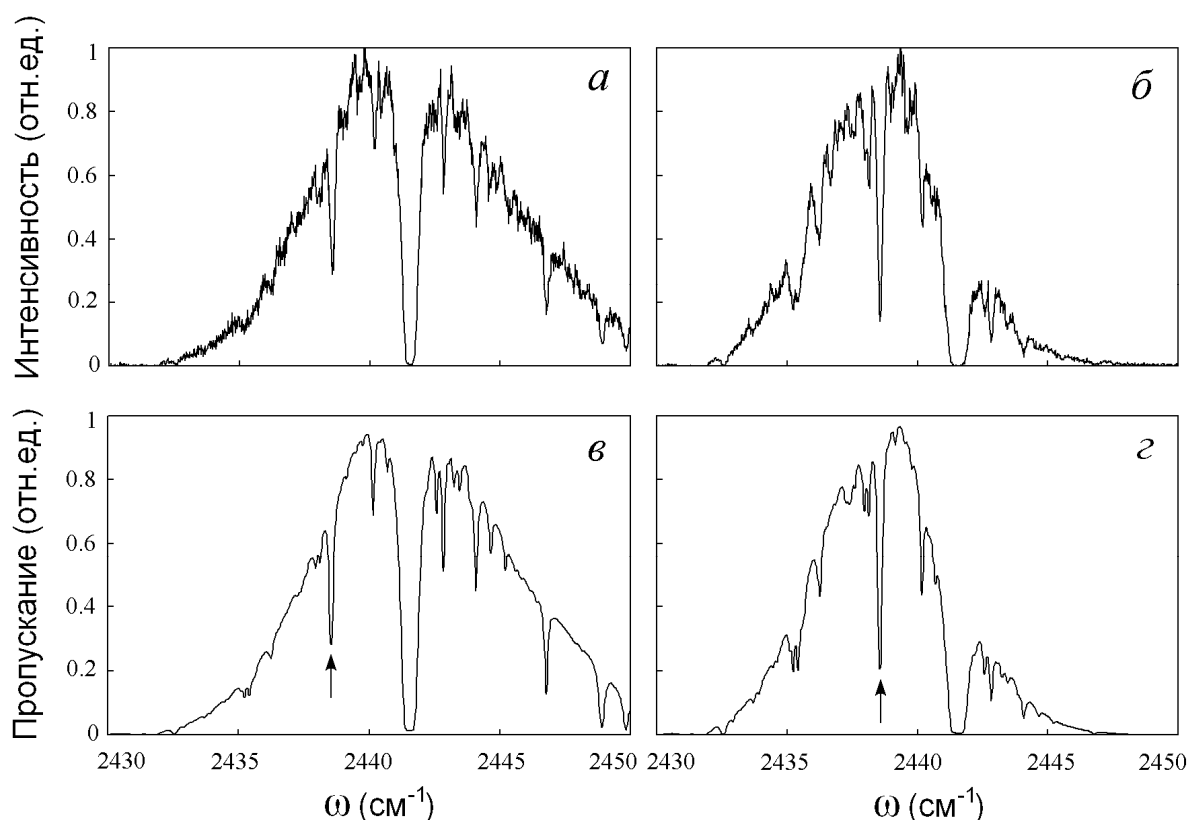


Рис. 8 — Спектральные распределения излучения  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера, записанные с задержками 20 мкс (а) и 40 мкс (б) при заполнении газовой кюветы смесью воздух:метан=100:1 до полного давления 1 атм, и расчетные спектры поглощения этой же смеси, полученные на основании данных HITRAN [18] для толщин поглощающего слоя 0.68 км (в) и 1.14 км (г) с учетом огибающей экспериментального спектра генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера

пользовавшейся в экспериментах смеси, построенные с учетом огибающей экспериментальных спектров генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера для длин поглощения соответственно 0.68 и 1.14 мкм [18]. Эти значения равны эффективным поглощающим длинам для экспериментальных условий, при которых были получены показанные на рис. 8(а) и 8(б) спектры. При моделировании использовалось значение  $t_0 = 10$  мкс, при котором было достигнуто удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных спектров.

Для количественного исследования динамики внутрирезонаторного поглощения нами был выбран спектральный провал с центром на частоте  $\omega_0 = 2438.56 \text{ см}^{-1}$ , отмеченный на рис. 8 стрелкой. Он соответствует трем частично перекрывающимся линиям метана с частотами 2438.5109, 2438.5282 и 2438.5885  $\text{см}^{-1}$  [18]. У спектров с разными задержками было графически определено значение огибающей  $I_0(\omega, t)$  и интенсивности сигнала с учетом поглощения  $I(\omega, t)$  для выбранной длины волны. По полученным данным был построен график зависимости  $\ln(I_0(\omega, t) / I(\omega, t))$  от  $t$  (рис.9), который согласно формуле (3), должен быть линейным.

Из рис.9 видно, что линейное нарастание сигнала внутрирезонаторного поглощения наблюдается вплоть до 80 мкс от начала генерации, что соответствует эффективной поглощающей длине  $ct = 24$  км при коэффициенте заполнения резонатора близком к единице.

В зарегистрированных нами спектрах уровень минимального детектируемого поглощения определялся шумами в спектре генерации лазера. Из-за этого при максимальной длительности генерации мы могли обнаруживать линии поглощения, которые приводили к спектральным провалам с относительной глубиной более 25% (см.рис.8). Если считать, что надежно детектируются линии с относительной глубиной  $1 - e^{-1} = 63\%$ , то метод ВРЛС на основе  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера обеспечивает чувствительность регистрации слабых линий поглощения не хуже  $4 \times 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ .

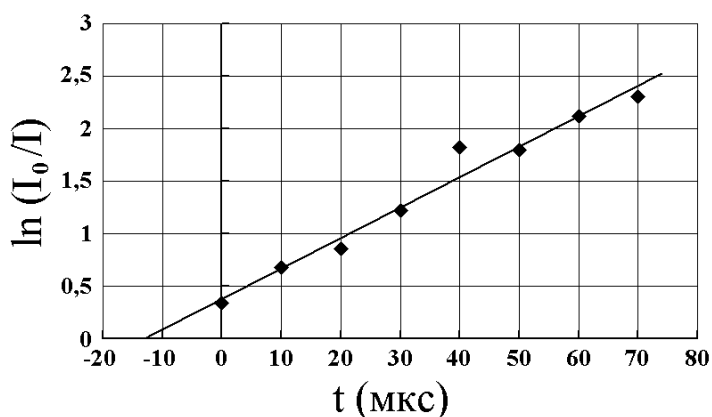


Рис. 9 — Зависимость сигнала внутрирезонаторного поглощения  $\ln(I_0(\omega, t) / I(\omega, t))$  от времени  $t$ , отсчитанного с начала генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера

## **В заключении сформулированы основные результаты работы.**

1. В лазере на монокристалле  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенном из паровой фазы с одновременным легированием, получена генерация при низких (85-295 K) и комнатной температуре (при накачке импульсами с большей средней мощностью). Достигнуты дифференциальный КПД 43% по поглощенной энергии накачки (при 85 K) и суммарный диапазон непрерывной перестройки длины волны генерации в селективном резонаторе (3.77-4.40 мкм при температуре 85 K и 3.95-5.05 мкм при температуре 295 K). Эти параметры превышают значения, достигнутые ранее в лазерах на кристаллах  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенных на основе других технологических процессов.

2. Получен режим пассивной модуляции добротности резонатора Er:YAG-лазера с длиной волны генерации  $\lambda = 2.94$  мкм при помощи кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ . Эффективность преобразования (отношение энергии гигантского импульса к соответствующей выходной энергии лазера в режиме свободной генерации) составила 20%.

3. Впервые реализован непрерывный режим генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. Достигнута выходная мощность лазера 160 мВт при дифференциальной эффективности по поглощенной мощности накачки 56%.

4. Впервые экспериментально реализован метод ВРЛС на основе  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. Линейный рост чувствительности спектра генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера к внутрирезонаторному поглощению наблюдался при увеличении длительности генерации до, по меньшей мере, 80 мкс, что при полном заполнении резонатора поглощающим веществом позволяет реализовать эффективную длину поглощения более двадцати километров и измерять коэффициент поглощения до  $\sim 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ .

## **Публикации по теме диссертации:**

1. А.А.Воронов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, М.П.Фролов // Лазер на кристалле  $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ , выращенном из паровой фазы // Краткие сообщения по физике ФИАН, № 2, 39-42 (2004).

2. В.А.Акимов, А.А.Воронов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, М.П.Фролов // Эффективный ИК лазер на кристалле  $\text{ZnSe}:\text{Fe}$  с плавной перестройкой в спектральном диапазоне 3.77-4.40 мкм // Квантовая электроника, т. 34, № 10, 912-914 (2004).

3. А.А.Воронов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, М.П.Фролов // Лазерные характеристики кристалла

Fe:ZnSe в диапазоне температур от 85 до 255 К // Квантовая электроника, т. 35, № 9, 809-812 (2005).

4. А.А.Воронов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, В.Г.Полушкин, М.П.Фролов // Пассивный затвор на основе монокристалла  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnSe для модуляции добротности лазеров трехмикронного диапазона // Квантовая электроника, т. 36, № 1, 1-2 (2006).

5. V.A.Akimov, M.P.Frolov, Yu.V.Korostelin, V.I.Kozlovsky, A.I.Landman, Yu.P.Podmar'kov, A.A.Voronov // Vapour growth of II-VI single crystals doped by transition metals for mid-infrared lasers // Phys. stat. sol. (c) 3 (4), 1213-1216 (2006).

6. В.А.Акимов, А.А.Воронов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, М.П.Фролов // Эффективная лазерная генерация кристалла  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnSe при комнатной температуре // Квантовая электроника, т. 36, № 4, 299-301 (2006).

7. V.V.Fedorov, S.B.Mirov, A.Gallian, D.V.Badikov, M.P.Frolov, Yu.V.Korostelin, V.I.Kozlovsky, A.I.Landman, Yu.P.Podmar'kov, V.A.Akimov, A.A.Voronov // 3.77-5.05- $\mu\text{m}$  Tunable Solid-State Lasers Based on  $\text{Fe}^{2+}$ -Doped ZnSe Crystals Operating at Low and Room Temperatures // IEEE J.Quantum Electronics, V. 42, № 9, 907-917(2006).

8. В.А.Акимов, А.А.Воронов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, М.П.Фролов // Внутривибраторная лазерная спектроскопия с использованием  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnSe-лазера // Квантовая электроника, т. 37, № 11, 1071-1075 (2007).

9. А.А.Воронов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов //  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnSe-лазер, работающий в непрерывном режиме // Квантовая электроника, т. 38, № 12, 1113-1116 (2008).

10. В.А.Акимов, А.А.Воронов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов, А.А.Белов, В.А.Ильевский, А.П.Калинин, И.Э.Раздольский, И.Д.Родионов, А.И.Родионов // Лазерная система, позволяющая получать излучение на трех длинах волн вблизи 1.9, 2.9 и 4 мкм // Препринт №906 Института проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, г.Москва, 1-45 (2009)

### Список цитируемой литературы

[1] В.Jean, Т.Bende //Mid-IR laser applications in Medicine // Springer Berlin/Heidelberg, 89/2003 "Solid-state mid-infrared laser sources", 530-565 (2003)

- [2] L.D.DeLoach, R.H.Page, G.D.Wilke, S.A.Payne, W.F.Krupke // Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy and laser demonstration of a new class of gain media // IEEE Journal of Quantum Electronics, 32, №6, 885-895 (1996)
- [3] I.T.Sorokina // Cr<sup>2+</sup>-doped II-VI materials for lasers and nonlinear optics // Optical Materials 26, 395-412 (2004)
- [4] U.Demirbas, A.Sennaroglu // Intracavity-pumped Cr<sup>2+</sup>:ZnSe laser with ultrabroad tuning range between 1880 and 3100 nm // Optics Letters, 31, №15, 2293-2295 (2006)
- [5] S.Kuck // Spectroscopy and laser characteristics of Cr<sup>2+</sup>-doped chalcogenide crystals – overview and recent results // Journal of Alloys and Compounds, 341, 28-33 (2002)
- [6] J.J.Adams, C.Bibeau, R.H.Page, D.M.Krol, L.H.Furu, S.A.Payne // 4.0-4.5 μm lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material // Optics Letters, 24, №23, 1720-1722 (1999)
- [7] J.Kernal, V.V.Fedorov, A.Gallian, S.B.Mirov, V.V.Badikov // 3.9-4.8 μm gain-switched lasing of Fe:ZnSe at room temperature // Optics Express, 13, №26, pp.10608-10615, (2005)
- [8] R.H.Page, K.I.Schaffers, L.D.DeLoach, G.D.Wilke, F.D.Patel, J.B.Tassano, S.A.Payne, W.F.Krupke, K.-T.Chen, A.Burger // Cr<sup>2+</sup>-doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers // IEEE Journal of Quantum Electronics, 33, №4, 609-617 (1997)
- [9] Yu.V.Korostelin, V.I.Kozlovsky, A.S.Nasibov, P.V.Shapkin // Vapour growth and characterization of bulk ZnSe single crystals // J.Crystal Growth, 159, 181 (1996).
- [10] M.J.Weber // Handbook of Lasers // CRC Press LLC (2001)
- [11] J.J.Adams // New crystalline materials for nonlinear frequency conversion, electro-optic modulation, and mid-infrared gain media // Lawrence Livermore National Laboratory, PhD Theses (2002)
- [12] S.Georgescu, O.Toma // Er:YAG three-micron laser: performances and limits // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 11, №3, 682-689 (2005)
- [13] S.Georgescu, V.Lupeii // Q-switch regime of 3-μm Er:YAG lasers // IEEE Journal of Quantum Electronics, 34, №6, 1031-1040 (1998)
- [14] В.А.Акимов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов // Эффективная генерация Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера в непрерывном режиме // Квантовая электроника, 37, 991

(2007)

[15] J.A.Caird, S.A.Payne, P.R.Staber, A.J.Ramponi, L.L.Chase, W.F.Krupke // Quantum electronic properties of the  $\text{Na}_3\text{Ga}_2\text{Li}_3\text{F}_{12}:\text{Cr}^{3+}$  laser // IEEE J.Quantum.Electron., 24, 1077-1099 (1988)

[16] Л.А.Пахомычева, Э.А.Свириденков, А.Ф.Сучков, Л.В.Титова, С.С.Чурилов // Линейчатая структура спектров генерации ОКГ с неоднородно уширенной линией усиления // Письма в ЖЭТФ, Т. 12, вып. 2, 60-63 (1970)

[17] V.M.Baev, T.Latz, P.E.Toschek // Laser intracavity absorption spectroscopy // App.Phys.B, 69, 171-202 (1999).

[18] The HITRAN Database (high-resolution transmission molecular absorption database) ([www.hitran.com](http://www.hitran.com)).