

Fe²⁺:ZnSe-лазер, работающий в непрерывном режиме

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

Впервые реализован непрерывный режим генерации Fe²⁺:ZnSe-лазера. Длина волны излучения находилась в диапазоне 4.04–4.08 мкм. Активный элемент охлаждался жидким азотом. Накачка осуществлялась излучением Cr²⁺:CdSe-лазера с длиной волны 2.97 мкм. Максимальная мощность лазерного излучения составила 160 мВт при дифференциальной эффективности 56%. Минимальный порог по поглощенной мощности накачки был равен 18 мВт. В режиме генерации коэффициент потерь в кристалле ZnSe:Fe²⁺ не превышал 0.024 см⁻¹.

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

1. Введение

Необходимость разработки эффективных малогабаритных лазеров среднего ИК диапазона мотивируется наличием широкого круга практических задач, которые такие лазеры позволяют решать. К ним, в частности, относятся вопросы, связанные с различными высокочувствительными методами спектрального анализа, дистанционным зондированием атмосферы и мониторингом окружающей среды, медициной и др.

Кристалл ZnSe:Fe²⁺ является одним из представителей класса кристаллов A₂B₆, легированных двухвалентными ионами переходных металлов. Эти кристаллы в последнее время зарекомендовали себя как перспективные активные среды для лазеров, перестраиваемых в средней ИК области спектра. Каждый из таких кристаллов обладает широкой полосой плавной перестройки (~1000 см⁻¹), а в совокупности они позволяют получать эффективную лазерную генерацию в диапазоне длин волн 2–5 мкм.

Начало исследований в этой области физики лазеров было положено авторами работ [1, 2], первоначально предложившими использовать в качестве новых лазерных сред халькогениды цинка, легированные переходными металлами, и первыми реализовавшими генерацию в Cr²⁺:ZnSe- и Cr²⁺:ZnS-лазерах. В дальнейшем были также изучены кристаллы на основе халькогенидов кадмия и марганца. В настоящее время лазерная генерация получена в кристаллах ZnSe:Cr²⁺ (реализованная область спектральной перестройки 1.88–3.10 мкм) [3, 4], ZnS:Cr²⁺ (2.17–2.86 мкм) [5], Cd_{0.85}Mn_{0.15}Te:Cr²⁺ (2.30–2.66 мкм) [6], Cd_{0.55}Mn_{0.45}Te:Cr²⁺ (2.17–3.01 мкм) [7], CdTe:Cr²⁺ (2.54 мкм) [8], CdSe:Cr²⁺ (2.26–3.61 мкм) [9–11] и ZnSe:Fe²⁺ (3.77–5.05 мкм) [12–15]. Однако непре-

рывная генерация до сих пор была получена лишь в Cr²⁺:ZnSe-, Cr²⁺:ZnS- и Cr²⁺:CdSe-лазерах, в которых в таком режиме достигнуты выходные мощности 6 Вт [16], 0.7 Вт [5] и 1.07 Вт [17] соответственно.

На сегодняшний день Fe²⁺:ZnSe-лазер является наиболее длинноволновым среди лазеров на кристаллах A₂B₆ с ионами металлов переходной группы. Реализация непрерывной генерации в Fe²⁺:ZnSe-лазере позволит существенно расширить возможности его применения. В связи с этим в настоящей работе исследуются лазерные характеристики кристалла ZnSe:Fe²⁺ при непрерывной накачке.

2. Методика изготовления активного элемента

Активный элемент Fe²⁺:ZnSe-лазера был вырезан из монокристалла ZnSe:Fe²⁺, выращенного из паровой фазы на монокристаллической затравке при температурах 1100–1150 °С с одновременным легированием по технологии, разработанной ранее для выращивания однородных монокристаллов твердых растворов [18, 19]. Преимуществами данной технологии по сравнению с другими, такими как рост из расплава с необходимой лигатурой или рост из паровой фазы нелегированного кристалла ZnSe с последующей диффузией Fe через поверхность в этот кристалл, являются высокое структурное совершенство и оптическая однородность выращиваемых кристаллов. Благодаря этому получаемые кристаллы отличаются малыми внутренними потерями. Массоперенос паровой фазы осуществлялся физическим транспортом в гелии. Основной принцип технологии заключался в использовании отдельных источников, содержащих сублиматы ZnSe и FeSe, что позволяло за счет выбора геометрии источников дозировать паровую фазу легирующим элементом в широком интервале концентраций и получать кристаллы с концентрациями [Fe²⁺] = 10¹⁷–10¹⁹ см⁻³. Ранее нами с использованием изготовленных таким способом кристаллов была получена эффективная генерация Fe²⁺:ZnSe-лазера в импульсном режиме [13–15].

В образце, из которого был изготовлен активный элемент Fe²⁺:ZnSe-лазера, концентрация ионов Fe²⁺,

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, Я.К.Скасырский, 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 21 февраля 2008 г.

определенная по спектру поглощения кристалла с учетом взятого из [12] сечения поглощения, составляла $\sim 2.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Активный элемент имел длину 7.7 мм и поперечный размер 4×2.5 мм. Оптические поверхности активного элемента не просветлялись, угол между ними не превышал $1'$.

3. Экспериментальная установка

Схема оптической части установки приведена на рис. 1. Накачка кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ осуществлялась излучением непрерывного $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера, подробное описание которого можно найти в [17]. Источником накачки $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера служил непрерывный тулиевый волоконный лазер с диодной накачкой (модель TLM-05LP производства НТО «ИРЭ-Полус», длина волны выходного излучения 1.908 мкм, максимальная выходная мощность 5 Вт). Поскольку коэффициент поглощения кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ имеет максимум вблизи 3 мкм [12], в настоящей работе в отличие от [17] $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазер генерировал в области 2.97 мкм за счет использования выходного зеркала со специально подобранным спектром пропускания. При работе на указанной длине волны выходная мощность $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера составляла 0.6 Вт. Лазер работал на основной поперечной моде и имел расхождение выходного пучка, близкую к дифракционной.

В кристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ лазерная генерация происходит между состояниями $^5\text{T}_2$ и ^5E иона Fe^{2+} . Время жизни верхнего лазерного уровня $^5\text{T}_2$ иона Fe^{2+} в матрице ZnSe уменьшается с ростом температуры от ~ 100 мкс при 77 К до 5 мкс при 220 К [12] из-за увеличения скорости безызлучательной релаксации и при комнатной температуре составляет всего 370 нс [15]. Это приводит к быстрому росту порога генерации с увеличением температуры. Поэтому в настоящей работе активный элемент располагался внутри криостата на медном хладопроводе, охлаждаемом жидким азотом. К теплоотводящей поверхности хладопровода через прослойку из металлического индия была прижата одна из граней кристалла, имеющая

размер 7.7×4 мм. Одним окном криостата служила плоскопараллельная пластина из CaF_2 , вторым – выходное зеркало резонатора $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера.

Резонатор $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера был образован плоским глухим зеркалом 31 и выходным сферическим ($R = 50$ мм) зеркалом 32. В экспериментах использовались выходные зеркала с пропусканием 2.9 %, 10.2 %, 17 % и 34.5 % в спектральной области генерации лазера. Геометрия резонатора была близка к полуконцентрической. Выходное зеркало 32 устанавливалось во фланце, герметично связанном с корпусом криостата сильфоном, что позволяло изменять длину резонатора лазера в процессе его юстировки. Кристалл $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ располагался на расстоянии 1 мм от зеркала 31 так, что его полированные грани были перпендикулярны оптической оси резонатора.

Накачка кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ осуществлялась вдоль оптической оси резонатора через окно криостата из CaF_2 и зеркало 31, которое имело пропускание 97 % на длине волны накачки. Излучение накачки фокусировалось в пятно диаметром ~ 150 мкм в центр кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ линзой, изготовленной из CaF_2 , с фокусным расстоянием 110 мм. Мощность накачки, подводимой к кристаллу $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$, регулировалась с помощью устанавливаемого перед линзой ослабителя, в качестве которого использовались калиброванные светофильтры.

Для измерения мощностей накачки и генерации $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера применялись измерители мощности ИМ1 (Gentec-EO UP19K-15S-W5-D0) и ИМ2 (ИМО-2Н) соответственно. На выходе $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при исследовании его характеристик поочередно устанавливались два оптических фильтра. Первый из них отсекал непоглощенное кристаллом $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ излучение накачки и использовался при измерениях выходной мощности лазерного излучения. Второй фильтр, наоборот, отсекал излучение генерации и служил для определения поглощенной кристаллом доли мощности накачки. Как показали измерения, в режиме генерации поглощение излучения накачки в активном элементе составляло 90 %.

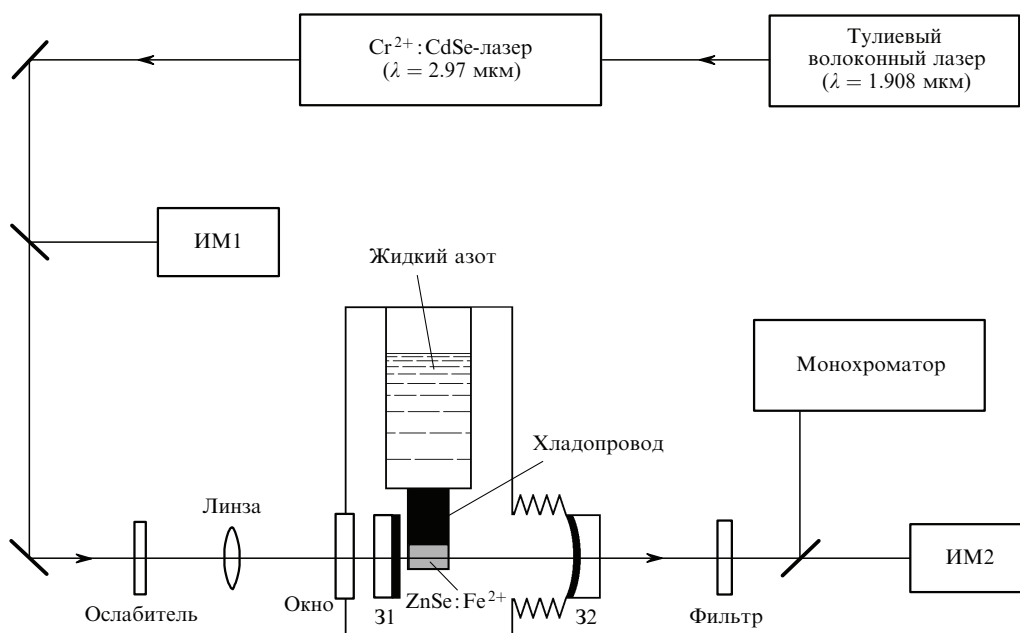


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки: 31, 32 – зеркала резонатора; ИМ1, ИМ2 – измерители мощности.

Длина волны генерации Fe²⁺:ZnSe-лазера определялась с помощью дифракционного монохроматора, теоретическое разрешение которого было равно 1 нм.

4. Результаты

Нами впервые была получена непрерывная генерация Fe²⁺:ZnSe-лазера. На рис.2 представлены зависимости выходной мощности Fe²⁺:ZnSe-лазера от поглощенной кристаллом ZnSe:Fe²⁺ мощности накачки, полученные при использовании выходных зеркал с пропусканием $T = 2.9\%$, 10.2% , 17% и 34.5% . По наклону проведенных через экспериментальные точки прямых для каждого из выходных зеркал были определены значения дифференциальной эффективности лазера η по поглощенной мощности накачки, которые также приведены на рис.2.

Максимальная эффективность $\eta = 56\%$ была достигнута при использовании выходного зеркала с пропусканием 34.5% . При этом максимальная выходная мощность составила 160 мВт при поглощенной мощности накачки 340 мВт, а пороговая поглощенная мощность накачки была равна 56 мВт. Минимальная поглощенная пороговая мощность накачки 18 мВт в наших экспериментах была получена при использовании выходного зеркала с пропусканием 2.9% .

Fe²⁺:ZnSe-лазер генерировал излучение, спектр которого зависел от выходного зеркала и лежал в диапазоне длин волн 4.04–4.08 мкм. Ширина этого спектра составляла ~ 10 нм.

Полученный для четырех выходных зеркал набор значений дифференциальной эффективности лазера использовался нами для оценки пассивных внутррезонаторных потерь с помощью предложенной в [20] простой модели, связывающей эффективность генерации лазера с пропусканием выходного зеркала резонатора. При этом учитывалось, что при расположении обращенной к выходному зеркалу рабочей грани кристалла перпендикулярно оптической оси резонатора выходным зеркалом Fe²⁺:ZnSe-лазера фактически служит интерферометр Фабри–Перо, образованный зеркалом 32 с коэффициентом отражения $1 - T$ и гранью кристалла ZnSe:Fe²⁺ с френелевским коэффициентом отражения $R_F = 17\%$. Минимальное пропускание T_{FP} такого интерферометра, как нетрудно показать, описывается выражением [21]

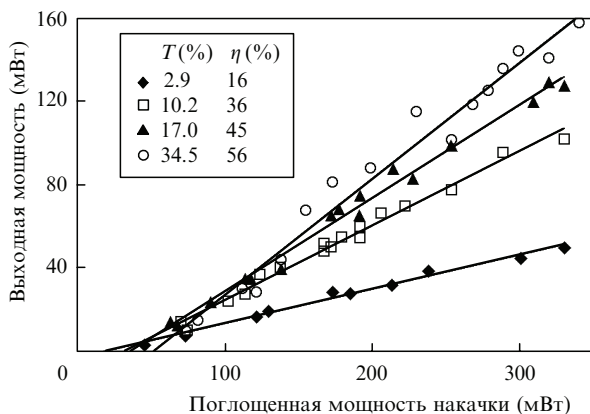


Рис.2. Зависимости выходной мощности Fe²⁺:ZnSe-лазера от поглощенной мощности накачки, полученные при использовании выходных зеркал с различным пропусканием T . Для каждого из зеркал приведены достигнутые значения дифференциальной эффективности лазера η по поглощенной мощности накачки.

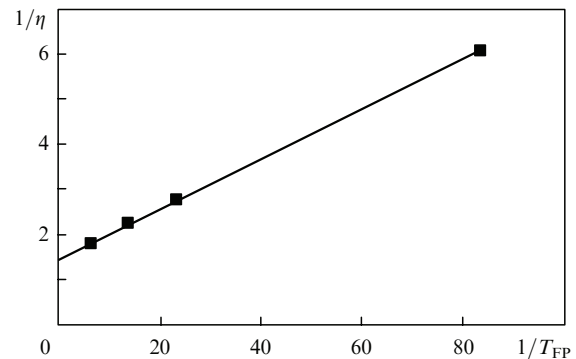


Рис.3. Зависимость обратной эффективности $1/\eta$ от обратного пропускания $1/T_{FP}$ интерферометра Фабри–Перо, образованного выходным зеркалом резонатора и обращенной к нему гранью кристалла ZnSe:Fe²⁺.

$$T_{FP} = \frac{T(1 - R_F)}{\{1 + [(1 - T)R_F]^{1/2}\}^2}, \quad (1)$$

из которого следует, что для используемых нами зеркал с указанными выше пропусканиями T_{FP} составляло соответственно 1.2% , 4.3% , 7.3% и 15.9% .

Согласно [20] зависимость

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\eta_0} + \frac{L}{\eta_0 T_{FP}} \quad (2)$$

позволяет определить суммарные пассивные потери L за полный обход резонатора и предельный КПД лазера η_0 :

$$\eta_0 = \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \eta_p \left(1 - \frac{\sigma_{ESA}}{\sigma}\right), \quad (3)$$

где λ_p – длина волны накачки; λ_g – длина волны генерации; η_p – эффективность использования излучения накачки; σ_{ESA} – сечение поглощения с верхнего лазерного уровня; σ – сечение лазерного перехода.

На рис.3 представлена зависимость $1/\eta$ от величины $1/T_{FP}$, используя которую мы получили $\eta_0 = 67\%$ и $L = 3.7\%$. Найденное значение η_0 близко к максимально возможному КПД лазера 73% , определяемому отношением энергий квантов излучения генерации и накачки. Это свидетельствует об отсутствии заметного поглощения с возбужденного уровня и о хорошем согласовании области накачки и модового объема резонатора лазера.

Величина L включает в себя все потери лазерного излучения за полный обход резонатора, а именно дифракционные потери, рассеяние на зеркалах резонатора и на гранях кристалла, а также собственно поглощение внутри кристалла. Оценка сверху, основанная на измеренном значении $L = 3.7\%$ и предположении, что все потери определяются только внутренними потерями в кристалле, дает для коэффициента поглощения на длине волны генерации величину 0.024 см^{-1} , что доказывает высокое качество оптического элемента.

5. Заключение

В настоящей работе впервые реализована непрерывная генерация Fe²⁺:ZnSe-лазера, который является наиболее длинноволновым среди лазеров на кристаллах A₂B₆, легированных двухвалентными ионами переходных металлов. Достигнута выходная мощность лазерно-

го излучения 160 мВт при дифференциальной эффективности по поглощенной мощности накачки 56 %. С учетом соотношения энергий квантов излучения генерации и накачки это соответствует дифференциальной квантовой эффективности 76 %.

Существенной особенностью данной работы является то, что в качестве источника накачки $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера использовался $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазер также на основе кристалла A_2B_6 с двухвалентными ионами переходных металлов.

Реализованная максимальная выходная мощность $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера ограничивалась в наших экспериментах мощностью $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера и потерями излучения накачки на подводящей оптике. По-видимому, она может быть существенно увеличена за счет увеличения мощности источника накачки и использования в схеме транспортировки и фокусировки излучения накачки просветленных оптических элементов.

Работа поддержана грантом Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-6055.2006.02, Программой фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур», Программой Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы», Программой Президиума РАН «Приобретение научных приборов и оборудования» и ЗАО "НТЦ «Реагент»".

- DeLoach L.D., Page R.H., Wilke G.D., Payne S.A., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 885 (1996).
- 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 A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 609 (1997).
- Sorokina I.T. *Opt. Mater.*, **26**, 395 (2004).
- Demirbas U., Sennaroglu A. *Opt. Lett.*, **31**, 2293 (2006).
- Sorokina I.T., Sorokin E., Mirov S., Fedorov V., Badikov V.V., Panyutin V., Schaffers K.I. *Opt. Lett.*, **27**, 1040 (2002).
- Seo J.T., Hömmerich U., Trivedi S.B., Chen R.J., Kutcher S. *Opt. Commun.*, **153**, 267 (1998).
- Trivedi S.B., Kutcher S.W., Wang C.C., Jagannathan G.V., Hömmerich U., Bluiett A., Turner M., Seo J.T., Schepler K.L., Schumm B., Boyd P.R., Green G. *J. Electron. Mater.*, **30**, 728 (2001).
- Bluiett A., Hömmerich U., Shah R.T., Trivedi S.B., Kutcher S.W., Wang C.C. *J. Electron. Mater.*, **31**, 806 (2002).
- McKay J., Schepler K.L., Catella G.C. *Opt. Lett.*, **24**, 1575 (1999).
- McKay J., Roh W.B., Schepler K.L. *Techn. Dig. Conf. on Advanced Solid-State Lasers* (Quebec, OSA, 2002, Paper WA7).
- Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **38**, 205 (2008).
- Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24**, 1720 (1999).
- Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **35**, 809 (2005).
- Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **36**, 299 (2006).
- Fedorov V.V., Mirov S.B., Gallian A., Badikov V.V., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Akimov V.A., Voronov A.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42**, 907 (2006).
- Mirov S., Fedorov V., Moskalev I., Martyshkin D. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 810 (2007).
- Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **37**, 991 (2007).
- Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Nasibov A.S., Shapkin P.V. *J. Cryst. Growth*, **159**, 181 (1996).
- Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I. *J. Alloys Compounds*, **371**, 25 (2004).
- Caird J.A., Payne S.A., Staver P.R., Ramponi A.J., Chase L.L., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 1077 (1988).
- Гагаринский С.В., Галаган Б.А., Денкер Б.А., Корчагин А.А., Осико В.В., Приходько К.В., Сверчков С.Е. *Квантовая электроника*, **30**, 10 (2000).