

## Внутрирезонаторная лазерная спектроскопия с использованием $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера

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

*Впервые в методе внутрирезонаторной лазерной спектроскопии использован лазер на кристалле  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ , способном генерировать излучение в спектральном диапазоне 3.77–5.05 мкм. В различные моменты времени генерации лазера (0–80 нс) записаны спектры внутрирезонаторного поглощения метана в окрестности длины волны 4.1 мкм, изучена динамика спектральных провалов в течение генерации. Обнаружено, что в исследованном диапазоне длительностей генерации  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера сигнал внутрирезонаторного поглощения линейно возрастает со временем, что позволяет реализовать эффективную длину поглощения 24 км.*

**Ключевые слова:** внутрирезонаторная лазерная спектроскопия,  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазер, лазеры ИК диапазона, твердотельные лазеры.

### 1. Введение

В настоящее время кристаллы  $\text{A}_2\text{B}_6$ , легированные двухвалентными ионами переходных металлов, вызывают большой интерес [1–4]. Это обусловлено рядом причин.

Во-первых, в последние годы наблюдается все более возрастающая потребность в недорогих компактных лазерных источниках излучения среднего ИК диапазона спектра для широкого круга практических применений, например мониторинга окружающей среды, контроля за технологическими процессами, безопасной для зрения лазерной локации, анализа малых газовых примесей, различных неинвазивных методов медицинской диагностики с помощью безопасных для зрения лазерных источников, оптической связи, спектроскопических исследований и др. Кристаллы  $\text{A}_2\text{B}_6$ , легированные ионами переходных металлов, образуют класс новых перспективных лазерных сред для генерации в диапазоне 2–5 мкм [1]. В частности, в кристаллах  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  была получена эффективная лазерная генерация и осуществлена непрерывная перестройка длины волны выходного излучения в спектральной области 3.77–5.05 мкм [5–8]. Поскольку в этот диапазон попадает окно прозрачности атмосферного воздуха, расположенное вблизи 4 мкм, то использование  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера также перспективно для решения задач, связанных с дистанционным зондированием атмосферы.

Во-вторых, постоянно ведется интенсивный поиск твердотельных насыщающихся поглотителей, которые

можно было бы применять в качестве пассивных модуляторов добротности лазерных резонаторов для генерации гигантских импульсов лазерами среднего ИК диапазона спектра. Такой режим работы лазера значительно расширяет его возможности и необходим в целом ряде практических задач. Кристаллы  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  перспективны для использования их в качестве удобных просветляющихся затворов для лазеров трехмикронного диапазона, что было экспериментально продемонстрировано на примере пассивной модуляции добротности  $\text{Er} : \text{YAG}$ -лазера [9] и  $\text{Er} : \text{Cr} : \text{YSGG}$ -лазера [10], работающих соответственно на длинах волн 2.94 и 2.8 мкм.

Настоящая работа посвящена исследованиям, связанным с новой областью потенциальных применений  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазера. Изучается принципиальная возможность использования этого лазера в методе внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС) [11] для высокочувствительной регистрации слабых линий поглощения в среднем ИК диапазоне спектра. Ярко выраженная тенденция расширения диапазона спектральных исследований в ИК область, характерная для большинства высокочувствительных лазерных абсорбционных методов, обусловлена стремлением реализовать более низкие пороги обнаружения газов, многие из которых имеют в ИК диапазоне относительно сильные линии поглощения, связанные с колебательными переходами.

В методе ВРЛС используются лазеры с широкой полосой генерации, в которых однородная ширина контура усиления активной среды велика по сравнению с шириной линии поглощения исследуемого газа, помещенного в резонатор лазера. Этому требованию, в частности, удовлетворяют лазеры на кристаллах  $\text{A}_2\text{B}_6$ , легированных ионами переходных металлов. В работах [12–14] было показано, что  $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$ -лазер может с успехом применяться для ВРЛС, позволяя реализовать метод в спектральной области 2.1–3.1 мкм. По-видимому, до настоящего времени кристалл  $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$ , использовавшийся в методе ВРЛС, был средой, обеспечивающей генерацию наиболее длинноволнового лазерного излучения. Использование кристаллов  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$ ,

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

Поступила в редакцию 13 декабря 2006 г., после доработки – 8 мая 2007 г.

способных генерировать излучение в диапазоне 3.77–5.05 мкм, открывает новые возможности для дальнейшего продвижения спектральной области метода ВРЛС в ИК диапазон.

## 2. Описание установки и методы исследования спектральной динамики излучения $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера

В настоящей работе была исследована спектральная динамика излучения многомодового (широкополосного)  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при наличии в его резонаторе узкополосных потерь, обусловленных линиями поглощения метана. Оптическая схема установки представлена на рис.1.

Источником накачки  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера служил импульсный  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазер с ламповым возбуждением, работавший в режиме свободной генерации на длине волны 2.94 мкм. Максимальная выходная энергия лазера накачки составляла 190 мДж, длительность импульса – 120 мкс, максимальная частота следования импульсов – 0.5 Гц. Измерение энергии лазерных импульсов осуществлялось калориметром Solo-X с пироэлектрической головкой QE12LP-S-MB-DO. Осциллограмма импульса накачки, полученная с помощью фотоприемника Ф1 (фотодиод PD36-03) и осциллографа Tektronix TDS3052B, показана на рис.2 (кривая 1). Излучение накачки было линейно поляризовано так, чтобы его потери на расположенных под углом Брюстера элементах резонатора  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера были минимальными. Энергия накачки регулировалась с помощью ослабителя, в качестве которого использовались калиброванные светофильтры. Пучок накачки направлялся в кристалл  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  фокусирующим зеркалом 31 с радиусом кривизны 50 см. Пятно накачки перед кристаллом имело вид вытянутого в вертикальном направлении эллипса с осями 1.2 и 1 мм.

Излучение накачки падало на кристалл под углом  $\sim 3^\circ$  к оптической оси резонатора.

Активный элемент  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера толщиной 10 мм с поперечным размером  $17 \times 10$  мм был вырезан из монокристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , выращенного из паровой фазы методом свободного роста на монокристаллическую затравку с использованием химического транспорта в водороде и легированного непосредственно в процессе роста. Концентрация ионов  $\text{Fe}^{2+}$ , определенная по спектру поглощения с использованием приведенных в [5] данных о сечении поглощения, составляла  $\sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Активный элемент был установлен в резонаторе под углом Брюстера.

В кристалле  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  лазерная генерация происходит между состояниями  $^5T_2$  и  $^5E$  иона  $\text{Fe}^{2+}$ . Время жизни верхнего лазерного уровня  $^5T_2$  иона  $\text{Fe}^{2+}$  в матрице  $\text{ZnSe}$  уменьшается с ростом температуры от 105 мкс при 120 К до 5 мкс при 220 К [5] из-за увеличения скорости безызлучательной релаксации и при комнатной температуре составляет 355 нс [7]. Это вызывает необходимость охлаждения кристалла  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  для достижения лазерной генерации при накачке длинными импульсами. Поэтому в нашей установке активный элемент располагался внутри криостата на медном хладопроводе, охлаждаемом жидким азотом до температуры 85 К. Окнами криостата служили плоскопараллельные пластины из  $\text{CaF}_2$ , установленные под углом Брюстера.

Резонатор  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера был образован задним алюминиевым сферическим зеркалом 32 с радиусом кривизны 50 см и плоским выходным зеркалом 33 с коэффициентом пропускания 0.5 % на длине волны генерации, нанесенным на клиновидную подложку из  $\text{CaF}_2$  (угол клина  $5^\circ$ ) для устранения интерференционных эффектов. Оптическая длина резонатора  $L_c$  составляла 33 см. Внутри резонатора была установлена газовая кювета тол-

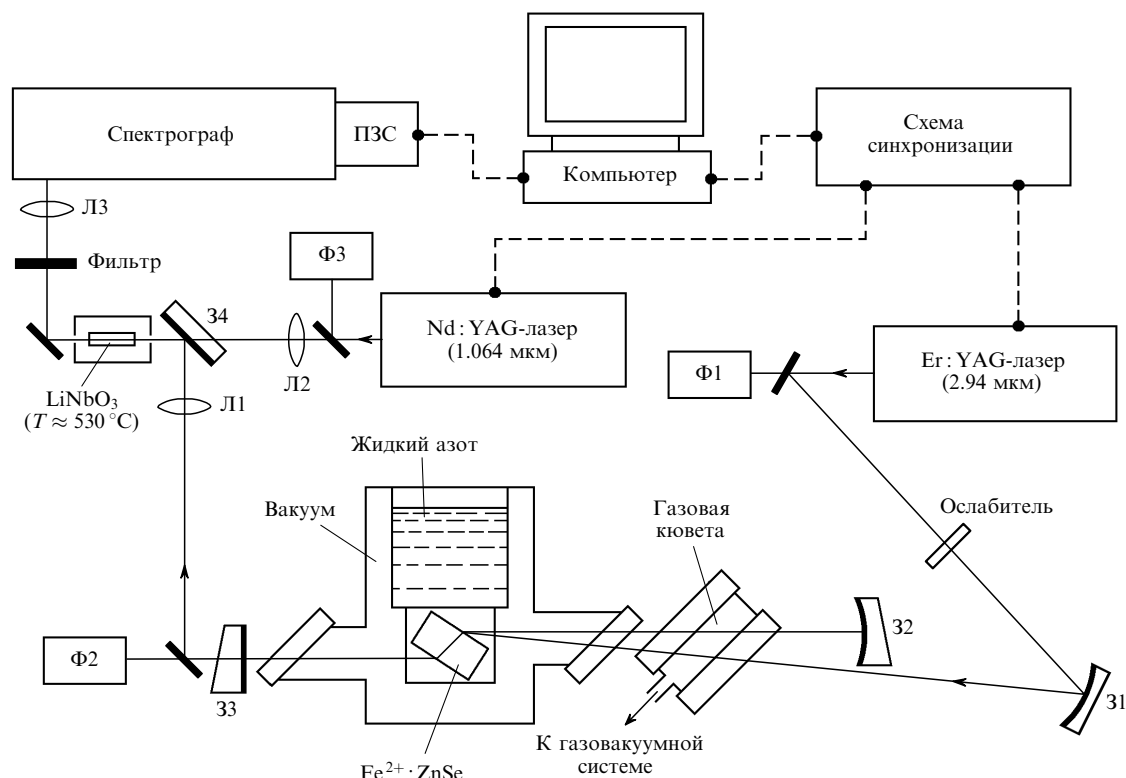


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

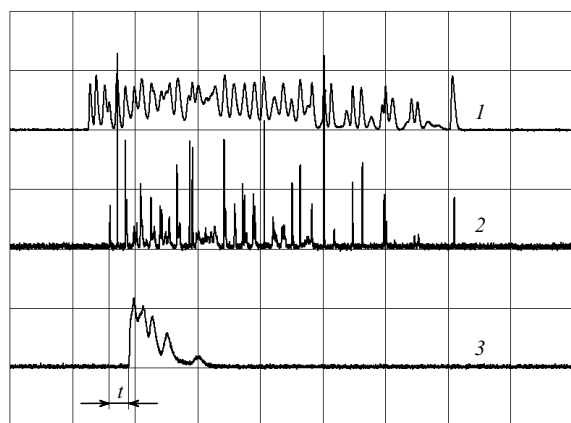


Рис.2. Осциллограммы импульсов накачки (1), генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера (2) и  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера (3). Скорость развертки 20 мкс/дел.

щиной 1.5 см, окна которой были выполнены из  $\text{CaF}_2$ . Кювета была связана с газовакуумной системой, позволявшей проводить ее откачку и заполнение поглощающими газами, и располагалась под углом Брюстера, поэтому при каждом проходе внутри нее излучение лазера поглощалось в исследуемом газе на длине 2.5 см.

При энергии накачки 90 мДж выходная энергия  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера составляла 2 мДж. Импульс генерации регистрировался с помощью фотоприемника Ф2 (фотоспротивление ФСГ-22) и имел полную длительность 80–100 мкс в зависимости от энергии накачки (рис.2, кривая 2). Центр спектра генерации находился вблизи длины волны 4.1 мкм.

Для регистрации спектрального распределения излучения  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера и исследования его спектральной динамики широкополосное ИК излучение лазера преобразовывалось в более коротковолновое (0.84 мкм) в процессе генерации суммарной частоты при его смещении в нелинейном кристалле  $\text{LiNbO}_3$  (90-градусный синхронизм с температурной настройкой) с излучением дополнительного  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера (1.064 мкм), обладающего узким спектром (измеренная ширина составляла не более  $0.04 \text{ см}^{-1}$  и определялась разрешением спектрографа) и малой длительностью генерации по сравнению с длительностью генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. Подобный способ регистрации ИК спектров применялся нами ранее при регистрации спектров поглощения методом ВРЛС с использованием  $\text{Co}^{2+}:\text{MgF}_2$ -лазера [15] и  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера [12, 13]. Осциллограмма импульса  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера, зарегистрированная с помощью фотоприемника Ф3 (фотодиод ФД-10), показана на рис.2 (кривая 3). Выходная энергия  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера составляла 5 мДж.

Для обеспечения синхронизма кристалл  $\text{LiNbO}_3$  нагревался до температуры  $\sim 530^\circ\text{C}$ . Фокусировка и совмещение пучков  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ - и  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазеров внутри кристалла ниобата лития осуществлялись с помощью линз Л1 и Л2 и дихроичного зеркала 34, которое имело близкий к 100 % коэффициент отражения в окрестности длины волны 4.1 мкм и было прозрачным на длине волны 1.064 мкм. Преобразованное излучение выделялось оптическим фильтром и фокусировалось линзой Л3 на входную щель дифракционного спектрографа (теоретическое разрешение  $0.043 \text{ см}^{-1}$ ), снабженного ПЗС-линейкой, сопряженной с персональным компьютером. С помощью схемы синхронизации осуществлялась регулировка задержки импульса  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера относительно момен-

та запуска лазера накачки, что позволяло записывать спектральное распределение излучения  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в любой момент времени его генерации и наблюдать развитие спектров внутрирезонаторного поглощения во времени. Время задержки  $t$  отсчитывалось от переднего фронта импульса генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера до переднего фронта импульса  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера (см. рис.2).

В качестве поглощающего газа в резонаторе использовался метан, имеющий спектр поглощения в области генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера [16]. С этой целью газовая кювета заполнялась смесью воздух:метан = 100:1 при полном давлении 1 атм.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектры излучения  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при наличии внутрирезонаторного поглощения были записаны для времени задержки  $t = 0 - 80$  мкс. Энергия накачки  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при записи спектров превышала пороговое значение в 6–7 раз. На рис.3,а и б в качестве примера представлены спектры, зарегистрированные соответственно при задержках  $t = 20$  и 40 мкс. Приведенные для каждого значения  $t$  спектральные распределения получены в результате усреднения по 100 лазерным импульсам. Наблюдающиеся в спектрах провалы обусловлены линиями поглощения метана.

Зарегистрированные в экспериментах спектры поглощения мы сравнили с модельными спектрами, построенными с использованием базы данных HITRAN [16]. При численном моделировании учитывалось, что эффективная длина поглощения  $L_{\text{eff}}$  в методе ВРЛС описывается выражением

$$L_{\text{eff}} = c t_g L_{\text{ab}} / L_c, \quad (1)$$

где  $L_c$  – оптическая длина резонатора лазера, внутри которого имеется поглощающий слой толщиной  $L_{\text{ab}}$ ;  $t_g$  – время генерации, отсчитываемое от момента достижения инверсной населенности порогового значения;  $c$  – скорость света. При этом необходимо иметь в виду следующее. Поскольку в твердотельных лазерах время жизни верхнего лазерного уровня велико по сравнению с временем жизни фотона в резонаторе, первый пик излучения появляется через некоторое время  $t_0$  после возникновения инверсной населенности (время скрытого развития генерации). Поэтому при численном моделировании под временем генерации понималось время  $t_g = t_0 + t$ , а значение  $t_0$  подбиралось из соображений наилучшего совпадения модельных и экспериментальных результатов. При моделировании также предполагалось, что аппаратная функция спектральной аппаратуры имела дифракционный контур шириной  $0.05 \text{ см}^{-1}$ .

На рис.3,в и г представлены модельные спектры поглощения использовавшейся 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. Эти значения равны эффективным длинам поглощения для экспериментальных условий, при которых были получены показанные на рис.3,а и б спектры. При моделировании использовалось значение  $t_0 = 10$  мкс, при котором было достигнуто удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных спектров.

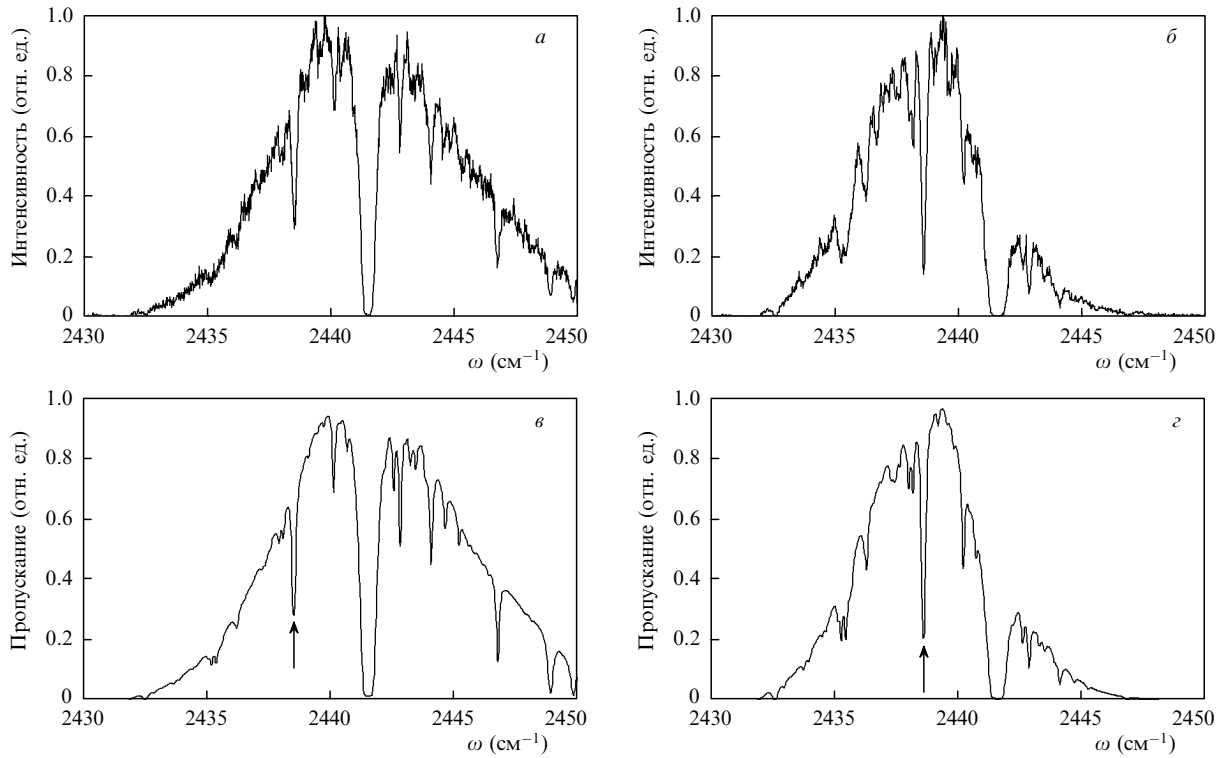


Рис.3. Спектральные распределения излучения  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера, записанные с временными задержками 20 (а) и 40 мкс (б) при заполнении газовой кюветы смесью воздух : метан = 100 : 1 до полного давления 1 атм, и расчетные спектры поглощения для той же смеси, полученные на основе базы данных HITRAN для длин поглощающего слоя 0.68 (в) и 1.14 км (г) с учетом огибающей экспериментального спектра генерации  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  лазера.

Поскольку задержка переднего фронта импульса  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера относительно переднего фронта импульса накачки  $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера составляла примерно 6 мкс, время развития генерации  $t_0$  не могло превышать это значение. По-видимому, величина 10 мкс обусловлена не только временем развития генерации  $t_0$ , но и достаточно большой длительностью ( $\sim 10$  мкс на полувысоте) импульса  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера, а также значительным разбросом ( $\pm 3$  мкс) времени задержки  $t$  при усреднении спектров.

Для количественного исследования динамики внутрирезонаторного поглощения нами был выбран спектральный провал с центром на частоте  $\omega = 2438.56 \text{ см}^{-1}$ , указанный на рис.3,в,г стрелкой. Он возникает в результате поглощения излучения генерации частично перекрывающимися линиями метана с частотами 2438.5109, 2438.5282 и 2438.5885  $\text{см}^{-1}$  [16].

На рис.4 представлена зависимость от времени сигнала внутрирезонаторного поглощения  $\ln(I_0/I)$ , где  $I$  – интенсивность генерации в центре спектрального провала, а  $I_0$  – интенсивность огибающей спектрального распределения излучения в центре провала. Видно, что сигнал внутрирезонаторного поглощения линейно возрастает с увеличением времени задержки в течение всего импульса генерации лазера, что соответствует модифицированному закону Бугера – Ламберта – Бера, описывающему динамику спектра многомодового лазера при наличии внутрирезонаторного поглощения на частоте  $\omega$ :

$$\begin{aligned} I(\omega)/I_0(\omega) &= \exp[-k(\omega)L_{\text{eff}}] \\ &= \exp[-k(\omega)c(t_0 + t)L_{\text{ab}}/L_{\text{c}}]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $I(\omega)$  – интенсивность генерации на частоте  $\omega$ ;  $I_0(\omega)$  – интенсивность огибающей спектрального распределения излучения на частоте  $\omega$ ;  $k(\omega)$  – коэффициент поглощения на частоте  $\omega$ . Проведенная по экспериментальным точкам прямая имеет начало в точке  $t = -13$  мкс, соответствующей  $t_0 = 13$  мкс, что находится в удовлетворительном соответствии со значением 10 мкс, найденным при численном моделировании.

В данной работе коэффициент заполнения резонатора  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера  $L_{\text{ab}}/L_{\text{c}}$  составлял 0.076, что определялось конструкциями имевшихся в нашем распоряжении криостата и поглощающей кюветы, а также геометрией лазерного резонатора. Очевидно, что при использовании компактного криостата и более длинного резонатора коэффициент его заполнения поглощающим газом может быть близким к единице. В таком случае при длительности генерации 80 мкс эффективная длина погло-

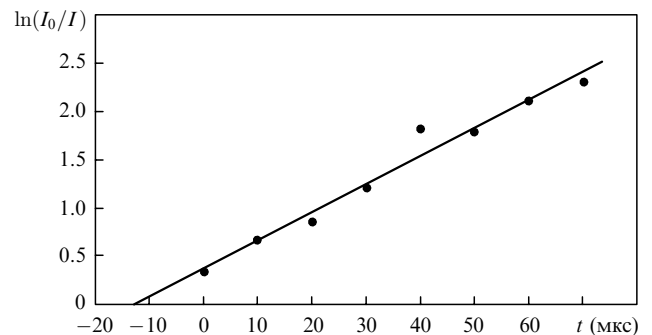


Рис.4. Зависимость сигнала внутрирезонаторного поглощения  $\ln(I_0/I)$  от времени задержки импульса  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера относительно импульса  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера.

щения составит 24 км. В зарегистрированных нами спектрах минимальное детектируемое поглощение определялось шумами в спектре генерации лазера. Вследствие этого при максимальной длительности генерации мы могли обнаруживать линии поглощения, которые приводили к спектральным провалам с относительной глубиной более 25 %. При эффективной длине поглощения 24 км к таким провалам приведут линии с коэффициентами поглощения, превышающими  $\sim 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ .

#### 4. Заключение

В настоящей работе впервые экспериментально реализован метод ВРЛС на основе  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера. Использование этого лазера для внутрирезонаторной спектроскопии открывает возможность продвижения длинноволновой границы метода до 5 мкм. 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 24 км и регистрировать слабые линии с коэффициентами поглощения до  $\sim 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ . Так как в эксперименте не наблюдалось отклонения зависимости внутрирезонаторного поглощения от времени генерации от линейной, возможно дальнейшее увеличение чувствительности метода при увеличении длительности генерации.

Ранее [6] нами была продемонстрирована эффективная генерация  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при охлаждении активного элемента до температуры  $\sim 220 \text{ К}$  термоэлектрическим элементом. Это обстоятельство, а также полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о перспективности использования  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера для разработки компактного ВРЛС-спектрометра невысокой стоимости для среднего ИК диапазона.

Работа поддержана совместной российско-американской Программой «Фундаментальные исследования и высшее образование» Министерства образования и на-

уки РФ и Американского фонда гражданских исследований и развития (грант CRDF MO-011-0/B2M411), грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ (№ НШ-6055.2006.02), Программой фундаментальных исследований ОФН РАН «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур» и Программой Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы».

1. DeLoach L.D., Page R.H., Wilke G.D., Payne S.A., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 885 (1996).
2. Kuck S. *J. Alloys Compounds*, **341**, 28 (2002).
3. Carrig T.J. *J. Electron. Mater.*, **31**, 759 (2002).
4. Sorokina I.T. *Opt. Mater.*, **26**, 395 (2004).
5. Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24**, 1720 (1999).
6. Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **35**, 809 (2005).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. Gallian A.R., Martinez A., Marine P., Fedorov V.V., Mirov S.B., Badikov V.V., Boutoussov D.M., Andriasyan M. *Proc. Conf. 'Photonics West, LASE 2007'* (San Jose, California, USA, San Jose Conventional Center, paper 6451-20).
11. Пахомычева Л.А., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф., Титова Л.В., Чурилов С.С. *Письма в ЖЭТФ*, **12**, 60 (1970).
12. Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **34**, 185 (2004).
13. Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **35**, 425 (2005).
14. Picque N., Gueye F., Guelachvili G., Sorokin E., Sorokina I.T. *Opt. Lett.*, **30**, 3410 (2005).
15. Frolov M.P., Podmar'kov Yu.P. *Opt. Commun.*, **155**, 313 (1998).
16. The HITRAN database, 2004 edition ([www.hitran.com](http://www.hitran.com)).