

## НАСЫЩАЮЩИЕСЯ ПОГЛОТИТЕЛИ ДЛЯ ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ ЭРБИЕВЫХ ЛАЗЕРОВ, ИЗЛУЧАЮЩИХ В ОБЛАСТИ 3 мкм

В. Э. Кисель<sup>а</sup>, В. Г. Щербицкий<sup>а</sup>, Н. В. Кулешов<sup>а</sup>, Л. И. Постнова<sup>б</sup>, В. И. Левченко<sup>б</sup>

УДК [535.34+535.37]:621.375.826

<sup>а</sup> Международный лазерный центр Белорусского национального технического университета, 220013, Минск, просп. Независимости, 65; e-mail: vekisel@ils.by

<sup>б</sup> Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, Минск

(Поступила 21 марта 2005)

Изучены фототропные свойства монокристаллов Fe:ZnSe, Co:ZnSe и Co:ZnS, продемонстрирована возможность использования кристаллов в качестве насыщающихся поглотителей для твердотельных эрбиевых лазеров, излучающих в области 3 мкм. Экспериментально определены поперечные сечения поглощения из основного состояния иона Co<sup>2+</sup> в кристаллах ZnSe ( $\sigma_{GSA} = 11 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ) и ZnS ( $\sigma_{GSA} = 5.6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ) и иона Fe<sup>2+</sup> в кристалле ZnSe ( $\sigma_{GSA} = 50 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ) на  $\lambda = 2.79 \text{ мкм}$ . Показано, что поглощение из возбужденного состояния для исследованных материалов незначительно. С использованием данных кристаллов в качестве пассивных затворов впервые получен режим модуляции добротности Cr,Er:YSGG-лазера, излучающего на длине волны 2.79 мкм. В режиме пассивной модуляции добротности получены моноимпульсы с энергией 60 мДж и длительностью 170 нс.

**Ключевые слова:** монокристаллы Fe:ZnSe, Co:ZnSe, Co:ZnS; насыщение поглощения; сечение поглощения; модуляция добротности; пассивный затвор; область спектра 3 мкм.

In this work the absorption saturation of Fe:ZnSe, Co:ZnSe and Co:ZnS crystals is studied and the possibility of use of these crystals as saturable absorbers for 3- $\mu\text{m}$  erbium solid-state lasers is demonstrated as well. The values of ground state absorption cross-sections of Co<sup>2+</sup> ion in ZnSe ( $\sigma_{GSA} = 11 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ ) and ZnS ( $\sigma_{GSA} = 5.6 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ ) crystals and Fe<sup>2+</sup> ion in ZnSe ( $\sigma_{GSA} = 50 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ ) crystal are experimentally determined at  $\lambda = 2.79 \mu\text{m}$ . It is shown that the absorption from an excited state for the investigated materials is negligible. Using this crystals as passive gates, for the first time we have obtained the Q-switching regime of a Cr,Er:YSGG laser emitting at 2.79  $\mu\text{m}$ . In the passive Q-switching regime the output pulses with an energy of 60 mJ and a pulse width of 170 ns were obtained.

**Keywords:** Fe:ZnSe, Co:ZnSe, Co:ZnS crystals; absorption saturation; absorption cross-section; Q-switching; passive shutter; spectral range 3  $\mu\text{m}$ .

**Введение.** Эрбиевые лазеры, излучающие в области 3 мкм, представляют интерес для применений в медицине (хирургии, офтальмологии, стоматологии), что обусловлено высоким коэффициентом поглощения воды (основной составляющей биологических тканей) в данном спектральном диапазоне [1]. Для указанных практических приложений требуются, как правило, короткие импульсы с высокой пиковой мощностью. Модуляция добротности 3-мкм эрбиевых лазеров как один из простых и надежных способов получения таких импульсов была осуществлена разными методами: с помощью вращающихся призм [2] и зеркала [3]; электрооптическим [4] и акустооптическим [5] модуляторами; призмой с наведенным полным внутренним отражением [6, 7]; пассивными затворами [8, 9]. В последнем случае в качестве насыщающихся поглотителей использованы монокристаллические слои InAs, созданные по технологии молекулярно-лучевой эпитаксии [8], и сверхтонкий слой этанола, содержащий ОН-группы [9].

Цель настоящей работы — создание новых твердотельных пассивных затворов для лазеров, излучающих в области 3 мкм. В качестве насыщающихся поглотителей использованы кристаллы халькогенидов цинка, легированные ионами переходных металлов. Данные материалы относятся к классу полупроводниковых соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> и, как показано в [10], являются перспективными для создания новых лазеров сред среднего ИК диапазона. Оптические свойства халькогенидов с ионами переходных металлов

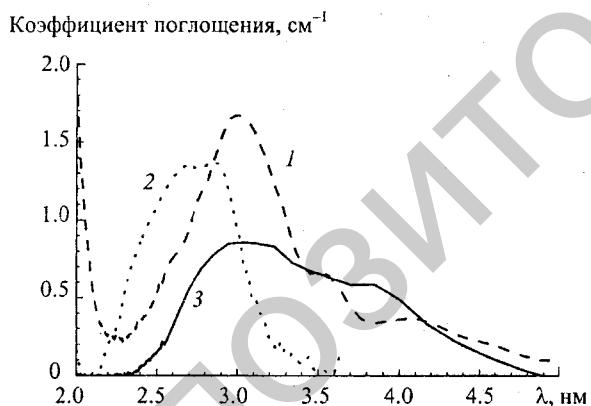
### SATURABLE ABSORBERS FOR Q-SWITCHING OF ERBIUM LASERS EMITTING IN A RANGE OF 3 $\mu\text{m}$

V. E. Kisel<sup>а</sup>, V. G. Scherbitsky<sup>а</sup>, N. V. Kuleshov<sup>а</sup>, L. I. Postnova<sup>б</sup>, and V. I. Levchenko<sup>б</sup> (<sup>а</sup> International Laser Center of the Belarussian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus; e-mail: vekisel@ilc.by;

<sup>б</sup> Institute of Solid State and Semiconductors Physic, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk)

обусловлены совокупностью следующих факторов. 1) Тетраэдрическая координация примесных ионов переходных металлов, замещающих катионы решетки, приводит к снятию запрета по четности на  $d-d$ -переходы и, как следствие, к повышенным вероятностям переходов между электронными состояниями (значения поперечных сечений поглощения  $\sim 10^{-18}$ — $10^{-19}$  см<sup>2</sup>). 2) Значительно более низкие силы кристаллического поля для соединений  $A^{IV}B^{VI}$ , являющихся полупроводниками, по сравнению с кристаллами-диэлектриками приводят к смещению частот основных оптических переходов в среднюю ИК область спектра. 3) Низкая энергия решеточных колебаний (фононов) кристалла-матрицы снижает скорость безызлучательной релаксации примесных центров вследствие электронно-колебательного взаимодействия. При использовании кристаллов халькогенидов (ZnSe, ZnS и др.), легированных ионами хрома, получена генерация излучения в области 2—3 мкм с дифференциальной эффективностью более 60 % при комнатной температуре [10—12]. Помимо лазерных свойств халькогенидам с ионами переходных металлов присущи фототропные свойства, т. е. зависимость собственного поглощения от интенсивности падающего излучения (насыщение поглощения). Недавно при использовании в качестве насыщающихся поглотителей кристаллов Cr:ZnSe и Cr:ZnS был продемонстрирован режим пассивной модуляции добротности лазера на эрбиевом стекле (длина волны излучения 1.54 мкм) как с импульсной ламповой [13, 14], так и с непрерывной диодной накачкой [15]. В настоящей работе исследованы фототропные свойства монокристаллов Fe:ZnSe, Co:ZnSe и Co:ZnS в области 3 мкм, а также впервые продемонстрирована возможность их использования в качестве пассивных затворов для лазера на кристалле иттрий-скандий-гадолиниевого граната с эрбием (Cr,Er:YSGG) при импульсной ламповой накачке.

**Спектроскопические свойства кристаллов Co:ZnSe, Co:ZnS и Fe:ZnSe.** Образцы кристаллов Fe:ZnSe и Co:ZnSe синтезировались методом диффузионного легирования [16] в два этапа. На первом этапе были выращены нелегированные монокристаллы ZnSe вертикальной возгонкой в замкнутом объеме. Ионы железа или кобальта вводились в кристалл-матрицу путем термической диффузии. Для этого на грани кристалла магнетронным напылением наносилась металлическая пленка. Монокристалл Co:ZnS выращен методом Бриджмена из исходной шихты, содержащей соединения кобальта. Для экспериментов изготовлены полированные образцы толщиной 2.0—3.5 мм и апертурой  $8 \times 8$  мм<sup>2</sup> с различным содержанием примеси.



Спектры поглощения исследуемых кристаллов в области 3 мкм при комнатной температуре приведены на рис. 1. Широкие полосы с максимумом около 3 мкм в спектрах Fe:ZnSe и Co:ZnSe и около 2.8 мкм для Co:ZnS относятся, соответственно, к электронно-колебательным переходам  ${}^5E \rightarrow {}^5T_2$  ионов  $Fe^{2+}$  (электронная конфигурация  $3d^6$ ) и переходам  ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$  ионов  $Co^{2+}$  (электронная конфигурация  $3d^7$ ), замещающих катионы  $Zn^{2+}$  в тетрапозиции [10, 17].

Рис. 1. Спектры поглощения образцов кристаллов Co:ZnSe (1), Co:ZnS (2) и Fe:ZnSe (3) в области 3 мкм при комнатной температуре

Предварительная оценка величин сечения поглощения на длине волны генерации Cr,Er:YSGG-лазера (2.79 мкм) была проведена на основе опубликованных ранее значений сечений на других длинах волн (для кристаллов Co:ZnSe и Co:ZnS в [18] на  $\lambda = 1.535$  мкм, для Fe:ZnSe — в [17] на  $\lambda = 3$  мкм) в соответствии с измеренными спектрами поглощения. Рассчитанные значения поперечных сечений поглощения на  $\lambda = 2.79$  мкм оказались приблизительно равными  $8 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> (Co:ZnSe),  $4 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> (Co:ZnS) и  $9 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup> (Fe:ZnSe). Как видно, сечения поглощения исследуемых кристаллов превосходят сечение усиления активной среды  $\sigma_{SE}$  ( $\sigma_{SE} = 3 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> для Cr,Er:YSGG на  $\lambda = 2.79$  мкм), что позволяет в последующих лазерных экспериментах не прибегать к внутррезонаторной фокусировке излучения на пассивном затворе.

Время жизни возбужденного состояния  ${}^4T_2$  ионов  $Co^{2+}$  измерялось путем регистрации затухания их люминесценции в области 3.5 мкм. Возбуждение образцов осуществлялось на длине волны 1.6 мкм импульсами излучения параметрического генератора длительностью 7 нс, накачиваемого Nd:YAG-лазером. Измеренные времена затухания люминесценции приведены в табл. 1. Люминесценцию кристалла Fe:ZnSe при комнатной температуре (возбуждение излучением Cr,Er:YSGG-лазера) нам не удалось зарегистрировать, что по данным работы [17] связано с ее сильным температурным тушением. Измеренное время жизни возбужденного состояния  ${}^5T_2$  ионов  $Fe^{2+}$  при температуре 250 К составило 5 мкс.

**Т а б л и ц а 1.** Спектроскопические характеристики иона  $\text{Co}^{2+}$  в кристаллах  $\text{ZnSe}$  и  $\text{ZnS}$  и иона  $\text{Fe}^{2+}$  в кристалле  $\text{ZnSe}$

Кристалл	$\lambda = 2.79$ мкм		Время релаксации *, мкс	Уровень
	$\sigma_{\text{GSA}}, 10^{-20} \text{ см}^2$	$\sigma_{\text{ESA}}/\sigma_{\text{GSA}}$		
Co:ZnSe	$11 \pm 4$	$\sim 0$	330	$^4T_2$
Co:ZnS	$5.6 \pm 2$	$< 0.1$	110	$^4T_2$
Fe:ZnSe	$50 \pm 20$	$\sim 0$	$< 5$	$^5T_2$ [9]

\* $T = 300$  К.

Для экспериментального исследования процессов насыщения поглощения в области 3 мкм использована установка, схема которой представлена на рис. 2. Источником возбуждения служил описанный ниже Cr,Er:YSGG-лазер 1 с пассивной модуляцией добротности. Интенсивность падающего на образец излучения изменялась с помощью поляризационного аттенюатора на основе призмы Глана—Тейлора 2. Для получения поляризованного излучения использовалась стеклянная пластинка, установленная под углом Брюстера внутри резонатора лазера. Излучаемые лазером импульсы имели частоту повторения 0.5 Гц, длительность 170 нс, энергию 60 мДж. Лазерный пучок проходил сквозь аттенюатор и с помощью линзы с фокусным расстоянием 300 мм фокусировался на образец в пятно диаметром 1.7 мм. Размеры перетяжки возбуждающего излучения определялись методом “ножа” [19]. Энергия прошедшего сквозь образец импульса измерялась калиброванным измерителем мощности Nova (Ophir, Израиль) с фоточувствительной головкой 3A-P-CAL.

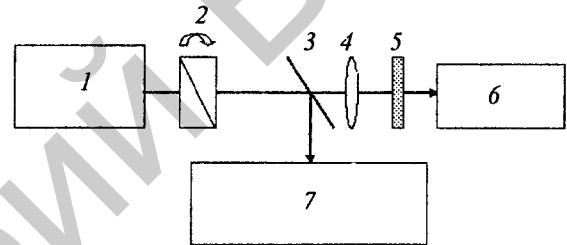


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения кривых просветления: 1 — Cr:Er:YSGG-лазер; 2 — призма Глана—Тейлора; 3 — светоделитель; 4 — линза; 5 — образец; 6 — измеритель мощности; 7 — фотодиод+цифровой осциллограф С9-27 (200 МГц)

В ходе эксперимента регистрировалась зависимость пропускания  $T$  образца от средней плотности энергии падающего на образец импульса излучения  $F_{\text{пад}} = E_{\text{пад}}/S$ , где  $E_{\text{пад}}$  — энергия импульса (непосредственно измеряемая величина),  $S$  — площадь области возбуждения. Измерения для каждого значения падающей энергии (задавалось аттенюатором) проводились не менее 10 раз и усреднялись.

Для определения поперечных сечений поглощения из основного и возбужденного состояний проведено численное моделирование экспериментальных кривых просветления. Для вычисления пропускания поверхность кристалла разделена на множество кольцеобразных участков, при этом полное пропускание среды задается выражением

$$T(E_{\text{пад}}) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} 2\pi r I_{\text{прош}}(r, t) dr \right) dt}{E_{\text{пад}}}, \quad (1)$$

где  $r$  — радиальная координата в плоскости поперечного сечения светового пучка.

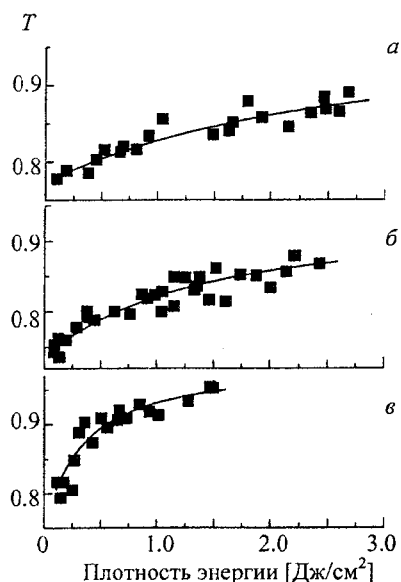
Прошедшая через образец интенсивность импульса  $I_{\text{прош}}$  определялась для каждого кольцеобразного участка путем решения системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dN_2}{dt} = \frac{I}{h\nu} N_1 \sigma_{\text{GSA}} - \frac{N_2}{\tau}, \\ \frac{\partial I}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} = -I(N_1 \sigma_{\text{GSA}} + N_2 \sigma_{\text{ESA}} + \alpha), \\ N_0 = N_1 + N_2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — населенности основного и возбужденного уровней;  $N_0$  — концентрация активных центров;  $\sigma_{\text{GSA}}$  и  $\sigma_{\text{ESA}}$  — сечения поглощения из основного и возбужденного состояний на длине волны возбуждения (2.79 мкм);  $h\nu$  — энергия фотона;  $c$  — скорость света;  $\tau$  — время релаксации возбужденного состояния;  $\alpha$  — коэффициент ненасыщаемых потерь;  $z$  — координата вдоль направления распространения излучения в кристалле. Варьируемые параметры —  $\sigma_{\text{GSA}}$  и  $\sigma_{\text{ESA}}$ .

В системе (2) учтены временной и пространственный профили падающего на поглотитель импульса

[18]. Таким образом, приняты меры по устранению систематической ошибки определения сечений поглощения из кривых просветления.



Коэффициент насыщаемых потерь  $\alpha$  считался равным величине пассивных потерь образца вне полосы примесного поглощения и определялся из спектров поглощения:  $\alpha = 0.2 \text{ см}^{-1}$  для Co:ZnSe и  $\alpha \approx 0$  для Co:ZnS, Fe:ZnSe. На рис. 3 показаны результаты эксперимента и аппроксимирующие их модельные кривые. Данные скорректированы на френелевские потери из-за отражения от граней. Для всех кристаллов наблюдается эффективное просветление, т. е. увеличение пропускания до 85—95 %. Оптический пробой образцов Co:ZnSe, Co:ZnS при максимальных плотностях падающего излучения (3 Дж/см<sup>2</sup>) не зарегистрирован. Лучевая стойкость образцов Fe:ZnSe оценена на уровне 1.5 Дж/см<sup>2</sup>.

Рис. 3. Зависимость пропускания образцов кристаллов Co:ZnS (а), Co:ZnSe (б), Fe:ZnSe (в) от средней поверхностной плотности энергии лазерного импульса (2.79 мкм, 170 нс); точки — эксперимент, сплошные линии — модельные расчеты с параметрами: а —  $\sigma_{\text{GSA}} = 5.6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{\text{ESA}} = 0.5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ,  $\alpha = 0$ ; б —  $\sigma_{\text{GSA}} = 11 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{\text{ESA}} = 0 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ,  $\alpha = 0.2 \text{ см}^{-1}$ ; в —  $\sigma_{\text{GSA}} = 50 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{\text{ESA}} = 0 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ,  $\alpha = 0$

Из условия достижения наилучшего совпадения экспериментальных данных и расчетных кривых (уравнения (1) и (2)) определены поперечные сечения поглощения из основного  $\sigma_{\text{GSA}}$  и возбужденного  $\sigma_{\text{ESA}}$  состояний на  $\lambda = 2.79 \text{ мкм}$  (табл. 1). Полученные результаты вполне удовлетворительно согласуются с предварительными оценками на основе работ [17, 18]. Высокие значения  $\sigma_{\text{GSA}}$  и незначительная величина  $\sigma_{\text{ESA}}$  свидетельствуют о перспективности использования кристаллов Co:ZnSe и Fe:ZnSe в качестве пассивных затворов для лазеров, излучающих в области около 3 мкм.

**Модуляция добротности Cr,Er:YSGG-лазера.** В экспериментах по модуляции добротности с использованием исследуемых насыщающихся поглотителей применялся лазер на кристалле Cr,Er:YSGG с импульсной ламповой накачкой, излучающий на  $\lambda = 2.79 \text{ мкм}$ . Резонатор лазера образован плоским высокоотражающим зеркалом и плоским выходным зеркалом с пропусканием на длине волны генерации 35 %. Длина резонатора  $\approx 370 \text{ мм}$ . Активной средой служил Cr,Er:YSGG-стержень диаметром 5 мм и длиной 75 мм. Образцы пассивных затворов без антиотражающих покрытий помещались в резонатор на расстоянии 4—6 мм от выходного зеркала. Параметр внутрирезонаторной фокусировки излучения (отношение поперечных сечений моды резонатора на активном элементе и просветляющейся среде) составлял 1.6, что обусловлено влиянием термической линзы, индуцируемой в активном элементе. Временные параметры излучения анализировались InGaSbP-фотодиодом с постоянной времени менее 20 нс и цифровым осциллографом C9-27 с полосой пропускания 200 МГц.

Энергия импульсов свободной генерации составляла около 150 мДж при частоте следования 0.5 Гц и электрической энергии накачки 64 Дж. Длительность импульса свободной генерации варьировалась от 250 до 300 мкс с длительностью отдельных пиков около 0.7—1.0 мкс. Параметры Cr,Er:YSGG-лазера в режиме пассивной модуляции добротности представлены в табл. 2. Лучшие выходные характеристики достигнуты с затвором Fe:ZnSe, имеющим начальное пропускание 78 %. При максимальной энергии накачки (64 Дж) получены моноимпульсы излучения длительностью 170 нс с энергией 60 мДж. С затвором на основе кристалла Co:ZnSe с начальным пропусканием 72 % энергия импульса составила 35 мДж, длительность 230 нс. При использовании пассивного затвора Co:ZnS режим пассивной модуляции добротности возникал только при уменьшении пропускания выходного зеркала до 13 %. Это обусловлено относительно низким сечением поглощения данного кристалла, что требует повышенной интенсивности излучения

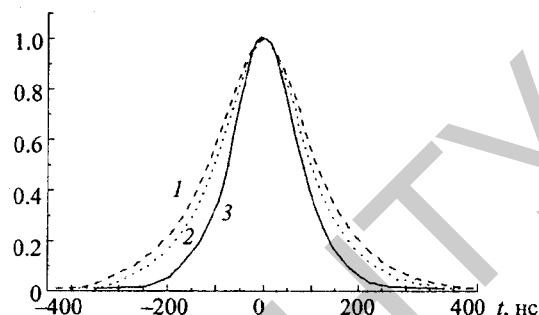
Т а б л и ц а 2. Характеристики режима модуляции добротности Cr,Er:YSGG-лазера с пассивными затворами на основе кристаллов Co:ZnSe, Co:ZnS, Fe:ZnSe

Тип насыщающегося поглотителя	Начальное пропускание затвора, %	Пропускание выходного зеркала, %	Длительность импульса, нс	Энергия импульса, мДж	Энергия свободной генерации, мДж
Co:ZnSe	72	35	230	35	150
Co:ZnS	78	13	210	9	55
Fe:ZnSe	78	35	170	60	150

внутри резонатора. Последнее было достигнуто увеличением добротности резонатора за счет снижения выходных потерь. Эффективность модуляции добротности (отношение энергии моноимпульса к энергии импульса свободной генерации) составила 40, 23 и 16 % для кристаллов Fe:ZnSe, Co:ZnSe и Co:ZnS соответственно. На рис. 4 приведены временные профили импульсов Cr,Er:YSGG-лазера с исследованными пассивными затворами. Меньшая длительность импульсов с затвором на основе кристалла Fe:ZnSe связана, вероятно, с более коротким временем релаксации (восстановления поглощения) данного затвора.

Рис. 4. Временные профили импульсов Cr,Er:YSGG-лазера с пассивными модуляторами добротности на основе Co:ZnSe (1), Co:ZnS (2), Fe:ZnSe (3); длительность импульса на полувысоте  $t_{1/2} = 230$  (1), 210 (2) и 170 нс (3)

Интенсивность, отн. ед.



**Заключение.** Экспериментально определены значения поперечных сечений поглощения из основного и возбужденного состояний иона  $\text{Co}^{2+}$  в кристаллах ZnSe и ZnS и иона  $\text{Fe}^{2+}$  в кристалле ZnSe на длине волны 2.79 мкм. Для иона кобальта в кристаллах ZnSe и ZnS (переход  ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$ ) они составили, соответственно,  $\sigma_{\text{GSA}} = 11 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{\text{ESA}} = 0 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$  и  $\sigma_{\text{GSA}} = 5.6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{\text{ESA}} = 0.5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ , а для иона железа в кристалле ZnSe (переход  ${}^5E \rightarrow {}^5T_2$ )  $\sigma_{\text{GSA}} = 50 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{\text{ESA}} = 0 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ . Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования данных кристаллов в качестве насыщающихся поглотителей для лазеров, излучающих в области 3 мкм. С пассивными затворами на основе кристаллов Co:ZnSe, Co:ZnS и Fe:ZnSe впервые экспериментально реализован режим пассивной модуляции добротности Cr,Er:YSGG-лазера ( $\lambda = 2.79$  мкм) с ламповой накачкой. Лучшие результаты достигнуты с затвором Fe:ZnSe, при использовании которого получены лазерные импульсы с энергией 60 мДж и длительностью 170 нс.

- [1] C.W.Robertson, D.Williams. J. Opt. Soc. Am., 61 (1971) 1316—1320
- [2] В.И.Кононов, А.М.Прохоров, И.А.Щербakov, И.Н.Сисакян, В.Б.Цветков. Изв. АН СССР, сер. физ., 54, № 10 (1990) 1935—1940
- [3] R.K.Shori, M.Furtado, A.A.Walston, O.M.Stafsudd, Milan Kokta. Conf. on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America), Washington DC (2000) 565—566
- [4] J.Breguet, A.F.Umyskov, W.A.R.Luethy, I.A.Shcherbakov, H.P.Weber. IEEE J. Quantum Electron., QE-27, N 2 (1991) 274—276
- [5] S.Schnell, V.G.Ostroumov, J.Breguet, W.A.R.Luethy, I.A.Shcherbakov, H.P.Weber. IEEE J. Quantum Electron., QE-26, N 26 (1990) 1111—1114
- [6] A.P.Fefelov, S.I.Khomenko, V.A.Mikhailov, S.K.Pak, I.A.Shcherbakov. Proc. SPIE, 1625 (1992) 113—120
- [7] P.R.Lakhno, I.A.Shcherbakov, V.B.Tsvetkov, L.Leininger, G.Phillipps. OSA TOPS 24 Proc. Advanced Solid State Lasers (Optical Society of America), Washington DC (1995) 150—154
- [8] K.L.Vodopyanov, A.V.Lukashev, C.C.Phillips, I.T.Ferguson. Appl. Phys. Lett., 59 (1991) 1658—1660
- [9] K.L.Vodopyanov, R.Shori, O.M.Stafsudd. Conf. on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America), Washington DC (1998) 300—301
- [10] L.D.DeLoach, R.H.Page, G.D.Wilke, S.A.Payne, W.F.Krupke. IEEE J. Quantum Electron., 32, N 6 (1996) 885—895
- [11] A.V.Podlipensky, V.G.Shcherbitsky, N.V.Kuleshov, V.I.Levchenko, V.N.Yakimovich, M.Mond, E.Heumann, G.Huber, H.Kretschmann, S.Kück. Appl. Phys. B, 72 (2001) 253—255
- [12] I.T.Sorokina, E.Sorokin, S.Mirov, V.Fedorov, V.Badikov, V.Panyutin, K.I.Schaffers. Opt. Lett., 27, N 12 (2002) 1040—1042
- [13] A.V.Podlipensky, V.G.Shcherbitsky, N.V.Kuleshov, V.P.Mikhailov, V.I.Levchenko, V.N.Yakimovich, L.I.Postnova, V.I.Konstantinov. Opt. Lett., 24 (1999) 960—962
- [14] T.Y.Tsai, M.Birnbaum. J. Appl. Phys., 87, N 1 (2000) 25—29
- [15] V.G.Shcherbitsky, A.V.Podlipensky, N.V.Kuleshov, V.I.Levchenko, V.N.Yakimovich, A.Diening, M.Mond, E.Heumann, S.Kück, G.Huber. CLEO/Europe — EQEC Focus Meeting, Techn. Digest (2001) 51
- [16] V.I.Levchenko, V.N.Yakimovich, L.I.Postnova, V.I.Konstantinov, V.P.Mikhailov, N.V.Kuleshov. J. Crystal Growth, 198-199 (1999) 980—983
- [17] J.J.Adams, C.Bibeau, R.H.Page, D.M.Krol, L.H.Furu, and S.A.Payne. Opt. Lett., 24, N 23 (1999) 1720—1722
- [18] V.G.Shcherbitsky, S.Girard, M.Fromager, R.Moncorge, N.V.Kuleshov, V.I.Levchenko, V.N.Yakimovich, B.Ferrand. Appl. Phys. B, 74, N 4-5 (2002) 367—374
- [19] N.Hodgson, H.Weber. Optical Resonators: Fundamentals, Advanced Concepts, and Applications, Springer-Verlag London Limited (1997)