

# ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ КЛАССА СИЛЛЕНИТОВ

С.М. Шандаров<sup>1)</sup>, М.Г. Кистенева<sup>1)</sup>, А.С. Акрестина<sup>1)</sup>, Е.С. Худякова<sup>1)</sup>, А.Е. Мандель<sup>1)</sup>,  
А.Л. Толстик<sup>2)</sup>, Т.А. Корниенко<sup>2)</sup>, Ю.Ф. Каргин<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, Томск, пр. Ленина, 40, Россия

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь

<sup>3)</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия  
shand@ed.tusur.ru, m-kisteneva@mail.ru, aka\_83@mail.ru, skleppoffa@mail.ru,  
mae@svch.rk.tusur.ru, tolstikal@gmail.com, tankorni@mail.ru, yu.kargin@rambler.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований изменений в спектральных зависимостях оптического поглощения, наблюдаемых в диапазоне 430 – 1100 нм при комнатной температуре в кристаллах титаната и силиката висмута в результате их облучения импульсным лазерным излучением с длинами волн 532 и 1064 нм и непрерывным лазерным излучением с длиной волны 660 нм. Получено, что облучение кристаллов титаната висмута светом из видимой и ближней ИК области при комнатной температуре приводит к изменению их оптического поглощения в спектральном диапазоне 460 – 900 нм. В кристаллах силиката висмута фотоиндуцированные изменения оптического поглощения при комнатной температуре наблюдаются только после облучения их светом из ближней ИК области. Проведена численная аппроксимация наблюдаемых спектральных зависимостей коэффициента поглощения в рамках модели, учитывающей вклад в примесное поглощение как процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров с нормальным законом распределения концентраций по энергии ионизации, так и внутрицентровых переходов.

## Введение

Кристаллы класса силленитов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO),  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (BGO) и  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (BTO) обладают фоторефрактивными и фотопроводящими свойствами и являются перспективными материалами для применения в качестве функциональной среды в устройствах когерентной оптики и динамической голографии [1]. Оптические и фотоэлектрические свойства кристаллов со структурой силленита определяются дефектными центрами, уровни которых расположены в запрещенной зоне. Фотовозбуждение электронов с этих глубоких центров обуславливает широкое плечо в спектре примесного поглощения силленитов, наблюдаемое в области энергии квантов светового излучения 2,3 – 3,2 эВ [2]. Облучение кристаллов силленитов светом из видимой и ближней ИК области приводит к изменению их оптического поглощения (фотохромному эффекту) [2-4], что связано с перераспределением зарядов по глубоким центрам. Для кристаллов силиката и германата висмута такие фотоиндуцированные изменения поглощения наблюдались при температурах  $T \leq 200 \text{ K}$  [2]. В отличие от этого, в кристаллах BTO фотохромный эффект проявляется и при комнатных температурах [3].

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментальных исследований изменений в спектре оптического поглощения кристаллов титаната и силиката висмута при их облучении светом из видимого и ближнего ИК диапазона. Наблюдаемые зависимости интерпретируются в рамках модели примесного поглощения, учитывающей как фотовозбуждение электронов с глубоких центров в зону проводимости [3], так и внутрицентровые переходы [4].

## Методика эксперимента и

### экспериментальные результаты

Для изучения эффекта фотоиндуцированного поглощения использовались образцы среза (100), вырезанные из монокристаллов номинально не легированного титаната висмута, легированных алюминием (BTO:Al) и кальцием (BTO:Ca) титаната висмута, а также из монокристалла не легированного силиката висмута. Фотоиндуцированные изменения оптического поглощения наводились импульсным лазерным излучением с длиной волны 532 нм, длительность импульсов 50 нс, частотой следования 10 Гц и средней интенсивностью 100 мВт/см<sup>2</sup>; непрерывным лазерным излучением с длиной волны 660 нм и интенсивностью ~25,5 мВт/см<sup>2</sup>; импульсным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм, длительностью импульсов 10 нс, частотой следования 10 кГц и средней интенсивностью излучения ~364 мВт/см<sup>2</sup>. Спектры оптического пропускания в диапазоне 430 – 1100 нм регистрировались для исходного состояния кристалла и непосредственно после его облучения. Все эксперименты проводились в темновых внешних условиях при комнатной температуре.

Ранее экспериментально было обнаружено увеличение оптического поглощения в не легированном кристалле титаната висмута в спектральной области 492 – 840 нм [3] и в легированном кальцием кристалле титаната висмута в спектральном диапазоне 460 – 900 нм [5] после воздействия импульсным лазерным излучением с длиной волны 532 нм при комнатной температуре. Нами установлено, что облучение легированного кальцием кристалла титаната висмута не-

прерывным лазерным излучением с длиной волны 660 нм также приводит к увеличению его оптического поглощения, наблюдаемому в спектральном диапазоне 500 – 900 нм. Уменьшение наведенных изменений в этих кристаллах в темновых условиях наблюдалось уже в течение 1 часа. Релаксация оптического поглощения облученных образцов к исходному состоянию происходила в темновых условиях при комнатной температуре в течение ~ 2 дней.

В экспериментах с кристаллом ВТО:Al было получено, что облучение этого кристалла непрерывным лазерным излучением с длиной волны 660 нм приводит к уменьшению поглощения в спектральной области от 460 до 900 нм. Зависимости 1 и 2 для коэффициента поглощения  $k(\lambda)$ , измеренные соответственно для исходного состояния кристалла и после его облучения в течение 45 мин., показаны кружками на рис. 1,а. Спектральная характеристика  $\Delta k_R(\lambda)$ , полученная вычитанием экспериментальных данных для зависимостей 1 и 2 (рис. 1,б), демонстрирует резонансный характер некоторых переходов, дающих вклад в поглощение необлученного кристалла. В этом спектре выделяются четыре полосы с интенсивным максимумом при  $\lambda = 550$  нм и более слабыми максимумами при  $\lambda = 680, 740$  и  $820$  нм, которые можно сопоставить с внутрицентровыми переходами для некоторого структурного дефекта. Максимальное изменение оптического поглощения, наблюдаемое на длине волны  $\lambda_m = 550$  нм, составило  $\sim 0,36$  см<sup>-1</sup>, при значении коэффициента поглощения для исходного состояния  $0,86$  см<sup>-1</sup>.

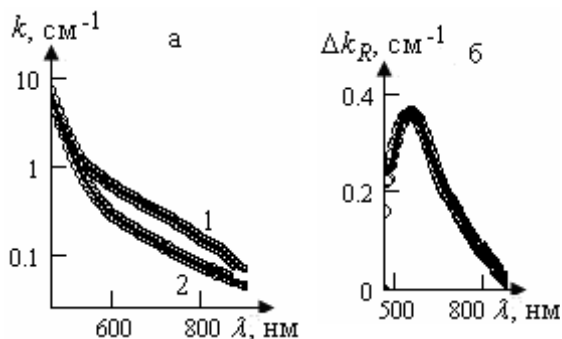


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента поглощения и его фотоиндуцированных изменений в кристалле ВТО:Al: 1 – до облучения; 2 – после облучения лазерным излучением с длиной волны 660 нм. Кружки – экспериментальные данные, сплошные линии – расчетные зависимости.

В нелегированных кристаллах силиката висмута изменения оптического поглощения, индуцированные излучением с длиной волны 532 и 660 нм, не были зафиксированы при комнатной температуре. Экспериментальные исследования по влиянию излучения ближнего ИК-диапазона на оптическое поглощение показали, что облучение кристалла BSO лазерными ИК импульсами с длиной волны 1064 нм приводит к уменьшению его

оптического поглощения в спектральной области от 480 до 900 нм.

Спектральная зависимость наведенных изменений в поглощении, полученная вычитанием коэффициентов поглощения в исходном состоянии и после облучения кристалла, показанная на рис. 2, демонстрирует резонансный характер  $\Delta k(\lambda)$ . В этом спектре можно выделить четыре полосы с экстремумами при  $\lambda_e = 560, 690, 750$  и  $820$  нм, проявляющиеся в результате облучения образца. Максимальные изменения оптического поглощения  $\Delta k_m$ , зафиксированные на длинах волн 560 и 700 нм, составили  $\sim 0,10$  и  $0,08$  см<sup>-1</sup>, при значениях коэффициента поглощения для исходного состояния  $0,61$  и  $0,27$  см<sup>-1</sup>, соответственно.

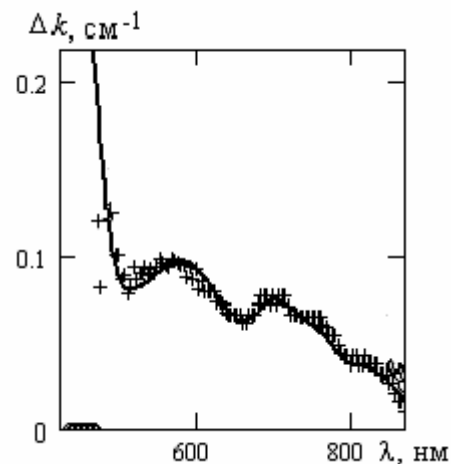


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные спектральные зависимости изменений в оптическом поглощении в кристалле BSO ( $d = 2,64$  мм): после облучения лазерными импульсами ( $\lambda = 1064$  нм) в течение 40 минут. Кружки и крестики – экспериментальные данные, сплошные линии – расчет-

Данные фотоиндуцированные изменения сохранились в темновых условиях при комнатной температуре в течение более чем 10 дней. После облучения кристалла излучением с длиной волны 660 нм со средней интенсивности  $1,6$  мВт/см<sup>2</sup> в течение 15 мин происходила релаксация оптического поглощения облученного образца BSO к исходному состоянию.

### Анализ и обсуждение результатов

Для описания наблюдаемых в кристаллах силленитов спектральных зависимостей коэффициента поглощения мы предположили, что вклад в примесное поглощение дает как фотовозбуждение электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров с нормальным законом распределения концентраций по энергии ионизации [3], так и внутрицентровые переходы [4].

Представленные на рис. 1 сплошные кривые для кристалла ВТО:Al учитывают пять внутрицентровых переходов с гауссовскими спектральными характеристиками с максимумами при энергиях кванта, равных 1,48; 1,62; 1,77; 2,17 и 2,44 эВ.

Для переходов электронов в зону проводимости в рамках модели [3] были учтены три глубоких донорных центра со средними энергиями ионизации 1,18; 2,05 и 2,71 эВ. Расчеты показывают, что вызываемое излучением из красной области спектра с энергией кванта  $\sim 1,88$  эВ уменьшение поглощения в диапазоне от 460 нм до 900 нм в кристалле ВТО:Al может быть связано с уменьшением вкладов в него всех внутрицентровых переходов и с уменьшением заполнения электронов центров с энергией ионизации 1,18 эВ.

Сплошные кривые на рис. 2 для кристалла BSO учитывают пять внутрицентровых переходов с гауссовскими спектральными характеристиками с максимумами при энергиях 1,50; 1,63; 1,77; 2,15; и 2,41 эВ. Для переходов электронов в зону проводимости нами учтены шесть центров со средними значениями энергии ионизации 0,82; 1,22; 1,60; 1,91, 2,16 и 2,70 эВ. Получено, что просветление кристалла BSO в результате ИК-засветки может быть в основном обусловлено уменьшением вклада в поглощение внутрицентровых переходов.

### Заключение

Таким образом, облучение нелегированных и легированных кальцием кристаллов титаната висмута светом с длиной волны 532 и 660 нм приводит к увеличению их оптического поглощения в спектральном диапазоне 460 – 900 нм. Релаксация оптического поглощения облученных образцов к исходному состоянию происходит в течение  $\sim 2$  дней в темновых условиях при комнатной температуре.

Облучение кристалла ВТО:Al излучением светом с длиной волны 660 нм приводит к просветлению кристалла, а наведенные изменения в спектре оптического поглощения демонстрируют резонансный характер.

Облучение кристаллов силиката висмута лазерными импульсами с длиной волны 1064 нм приводит к уменьшению коэффициента поглоще-

ния в спектральном диапазоне 480 – 900 нм. Наведенные изменения в спектре примесного оптического поглощения, как и для кристалла ВТО:Al при засветке непрерывным излучением с длиной волны 660 нм, обнаруживают резонансный характер. Эти фотоиндуцированные изменения сохраняются в темновых условиях в течение более чем 10 дней, в то время как засветка кристалла BSO видимым излучением с длиной волны 660 нм приводит к быстрой релаксации поглощения к исходному состоянию.

Наблюдаемый в экспериментах резонансный характер примесного поглощения свидетельствует о присутствии в исходном состоянии в кристаллах силленитов дефектов, для которых возможны внутрицентровые переходы между различными уровнями.

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ на 2013 г. (проект № 7.2647.2011) и при поддержке РФФИ (грант № 12-02-90038-Бел\_а) и БРФФИ (грант № Ф12Р-222).

### Список литературы

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фото-рефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – СПб.:Наука, 1992. – 320 с.
2. Малиновский В.К., Гудаев О.А., Гусев В.А., Деменко С.И. Фотоиндуцированные явления в силленитах – Новосибирск: Наука, 1990 – 160 с.
3. Толстик А.Л., Матусевич А.Ю., Кистенева М.Г., Шандаров С.М., Иткин С.И., Мандель А.Е., Каргин Ю.Ф., Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В. // Квантовая электроника – 2007. – 37, №11. – С. 1027.
4. Kisteneva M.G., A.S. Akrestina A.S., Shandarov S.M., Smirnov S.V., Bikeev O.N., Lovetskii K.P., Kargin Yu. // J. Holography and Speckle. – 2009. – 5. – P.280.
5. Кистенева М.Г., Шандаров С.М., Акрестина А.С., Толстик А.Л., Азишев И.Н., Вилейшикова Н.П., Егорышева А.В. // Сборник научных трудов VII международной научной конференции «Лазерная физика и оптические технологии». Минск, 17-19 июня 2008 г. Под ред. Н.С. Казака, П.А. Апанасевича, В.В. Кабанова и др. – Минск, 2008. – Т. 3. – С. 155.

## EFFECT OF VISIBLE AND NEAR-IR RANGE LASER IRRADIATION ON THE SPECTRAL DEPENDENCES OF OPTICAL ABSORPTION IN SILLENITE TYPE CRYSTALS

Stanislav Shandarov<sup>1</sup>, Marina Kisteneva<sup>1</sup>, Anna Akrestina<sup>1</sup>, Elena Khudyakova<sup>1</sup>, Arkady Mandel<sup>1</sup>, Alexey Tolstik<sup>2</sup>, Tatyana Komienko<sup>2</sup> and Yuriy Kargin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State University of Control System and Radioelectronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk 634050, Russia

<sup>2</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Prosp., 220030 Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of the RAS, Moscow 119991, Russia  
shand@ed.tusur.ru, m-kisteneva@mail.ru, aka\_83@mail.ru, skleppoffa@mail.ru, mae@svch.rk.tusur.ru, tolstikal@gmail.com, tankorni@mail.ru, yu.kargin@rambler.ru

Experimental results of variation of optical absorption in the spectral range of 430 - 1100 nm in bismuth titanium and bismuth silicon oxide crystals exposed to both pulsed laser light with a wavelengths of 532 nm and 1064 nm and continuous laser light with a wavelength of 660 nm at room temperature are presented. Irradiation of bismuth titanium oxide crystals by visible and near infrared light at room temperature causes the optical absorption variation in the in the spectral range of 460 - 900 nm. But in bismuth silicate crystals photoinduced changes of the absorption at room temperature are observed only after near infrared light irradiation. We took into account contribution to impurity absorption of both the process of photoexcitation of electrons to conduction band from deep donor center with a normal ionization energy distribution of concentrations and intracenter transitions for approximation of the spectral dependence of absorption coefficient and its changes.