

УДК 535.417

М.Г. Кистенева, А.С. Акрестина, Д.О. Сивун, Р.В. Киселев, С.М. Шандаров,
С.В. Смирнов, А.Л. Толстик, И.Н. Агишев, А.В. Станкевич, Ю.Ф. Каргин

Динамика фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах силленитов при облучении импульсами пикосекундной длительности

Представлены результаты экспериментальных исследований динамики фотоиндуцированного поглощения света в нелегированных кристаллах силиката и титаната висмута при облучении лазерными импульсами пикосекундной длительности с длиной волны 532 нм. Наблюдаемые зависимости динамики фотоиндуцированного поглощения интерпретируются в рамках модели примесного поглощения, предполагающей наличие в запрещенной зоне кристаллов глубоких дефектных центров двух типов.

Ключевые слова: фоторефрактивные кристаллы, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, фотоиндуцированное поглощение, лазерные импульсы.

Интерес к фоторефрактивным кристаллам класса силленитов $\text{Bi}_{12}(\text{Si}, \text{Ge}, \text{Ti})\text{O}_{20}$ связан с возможностью их применения в устройствах динамической голографии [1]. Фоторефрактивный эффект в этих кристаллах обусловлен захватом на глубокие центры фото-возбужденных носителей заряда [2]. Кристаллы силленитов имеют сложную структуру энергетических уровней в запрещенной зоне, включающую глубокие центры и мелкие ловушки [3, 4], оказывающие сильное влияние на их оптические свойства [3–6]. В [6] показано, что облучение кристалла титаната висмута наносекундными лазерными импульсами на длине волны $\lambda_i = 532$ нм приводит к увеличению оптического поглощения в диапазоне 492–840 нм, что связано с заполнением электронами центров с энергиями ионизации $\sim 1,6$ и $2,57$ эВ.

В настоящей работе представлены результаты исследования динамики фотоиндуцированного оптического поглощения, наблюдаемой в кристаллах силиката ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, BSO) и титаната висмута ($\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, BTO) на фиксированной длине волны $\lambda_p = 633$ нм при воздействии на них лазерными импульсами пикосекундной длительности с $\lambda_i = 532$ нм.

В экспериментах использовались нелегированные кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ среза (001) с толщиной $d = 6$ мм и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (срез (110), $d = 3$ мм). Фотоиндуцированные изменения оптического поглощения наводились лазерными импульсами с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм (вторая гармоника лазера на алюмоиттриевом гранате с неодимом), длительностью 70 пс, частотой следования 5–10 Гц и средней энергией одного импульса 50 мДж. Средняя интенсивность индуцирующего излучения на входе в кристалл составляла ~ 300 мВт/см². Для зондирования изменений в наведенном поглощении использовалось излучение непрерывного He-Ne лазера с длиной волны 633 нм, интенсивность которого в кристалле не превышала 100 мВт/см².

Во всех экспериментах засветка кристаллов BTO и BSO приводила к уменьшению интенсивности проходящего через них зондирующего излучения с $\lambda_p = 633$ нм. Временная эволюция оптического пропускания для этой длины волны, наблюдаемая экспериментально на начальном участке после воздействия индуцирующего импульса в кристаллах BTO и BSO, представлена точками на рис. 1,а и 2,а, соответственно. Для обоих кристаллов наблюдается рост фотоиндуцированного поглощения света за время, составляющее около 90 нс. Далее наблюдалось восстановление коэффициентов пропускания кристаллов BTO и BSO для светового пучка с длиной волны 633 нм, динамика которых после воздействия импульса представлена на рис. 1,б для кристалла BTO и на рис. 2,б для кристалла BSO. Возвращение поглощения к начальному уровню в кристалле BTO происходило за период, составляющий 0,2 с, а для кристалла BSO время восстановления поглощения гораздо меньше и составило величину $\sim 0,03$ с.

Для описания наблюдаемой динамики фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах BTO и BSO была использована модель [7], предполагающая наличие двух типов глубоких дефектных центров, каждый из которых содержит пару в виде донора (D) и ловушки (T), и компенсирующих акцепторов A . Один тип центров сопоставлен донорам $D1$ и ловушкам $T1$, второй тип центров соответствует донорам $D2$ и ловушкам $T2$ и энерге-

тическому положению ближе к дну зоны проводимости, чем для первого. Близко расположенные пространственно доноры и ловушки в каждом центре разделены, в соответствии с моделью [7, 8], потенциальным барьером, сквозь который электрон, локализованный на таком центре, может туннелировать с некоторой вероятностью, зависящей от температуры кристалла. Сечения фотоионизации для электрона, находящегося в состояниях D и T , предполагаются различными.

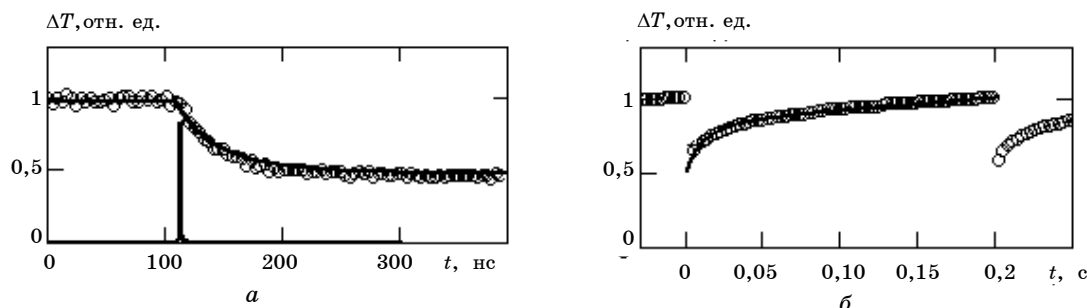


Рис. 1. Экспериментальные (кружки) и расчетные (сплошная кривая) временные зависимости изменений коэффициента пропускания на длине волны 633 нм, индуцированные в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ лазерными импульсами пикосекундной длительности на длине волны 532 нм. Момент воздействия первого лазерного импульса показан на рисунке вертикальной линией (a); период повторения импульсов – 0,2 с

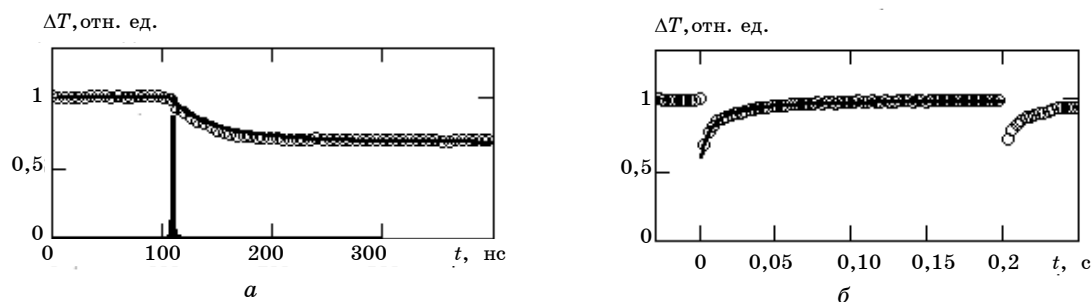


Рис. 2. Экспериментальные (кружки) и расчетные (сплошная кривая) временные зависимости изменений коэффициента пропускания на длине волны 633 нм, индуцированные в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ лазерными импульсами пикосекундной длительности на длине волны 532 нм. Момент воздействия первого лазерного импульса показан на рисунке вертикальной линией (a); период повторения импульсов – 0,2 с

Часть таких центров считается ионизированными в темновых условиях, а их заряд – компенсированным нефотоактивными акцепторами A . Под действием света происходит генерация электронов в зону проводимости с неионизированных центров, которые затем рекомбинируют на ионизированные глубокие центры в состоянии D или T . С ловушек $T2$ захваченные электроны также могут туннелировать на ловушки $T1$ с некоторой скоростью. Коэффициент поглощения для света с длиной волны 532 нм, энергия кванта которого $\hbar\omega_G$ позволяет возбуждать электроны в зону проводимости и с более глубоких центров ($D1-T1$), в рамках данной модели определяется выражением

$$\alpha_G = \hbar\omega_G(S_{1D}N1 + S_{1T}M1 + S_{2D}N2 + S_{2T}M2), \quad (1)$$

где $N1$ и $N2$, $M1$ и $M2$ – концентрации неионизированных доноров $D1$ и $D2$ и заполненных электронами ловушек $T1$ и $T2$ соответственно; S_{1D} и S_{2D} , S_{1T} и S_{2T} – сечения фотоионизации для донорных и ловушечных центров первого и второго типа. Для света с длиной волны 633 нм коэффициент поглощения определяется выражением

$$\alpha_R = \hbar\omega_R(S_{2D}N2 + S_{2T}M2). \quad (2)$$

Проведенный численный анализ динамики фотоиндуцированного изменения поглощения света на основе модели [7] и уравнения (2) позволил подобрать материальные параметры кристаллов ВТО и BSO. Сравнение с экспериментальными данными полученных в результате расчетных зависимостей, представленных на рис. 1 и 2 сплошными линиями, показывает, что предложенная модель удовлетворительно описывает динамику развития и «темновой» (точнее, в отсутствие индуцирующего излучения) релаксации фото-

индуцированного поглощения света в кристаллах ВТО и BSO. Отметим, что меньшее время восстановления пропускания в кристалле BSO обусловлено большим значением для него скорости туннельных переходов электронов с ловушек $T2$ на ловушки $T1$, по сравнению с ВТО.

Таким образом, в настоящей работе показано, что при облучении нелегированных кристаллов титаната и силиката висмута импульсами пикосекундной длительности с длиной волны 532 нм наблюдается обратимое уменьшение оптического пропускания на длине волны 633 нм. Проведенное численное моделирование показало, что использование модели, учитывающей два типа глубоких центров, содержащих пары донор–ловушка, позволяет удовлетворительно описать экспериментально наблюдаемую динамику фотоиндуцированного поглощения в кристаллах класса силленитов со сложной структурой дефектных центров, к которому относятся исследованные образцы титаната и силиката висмута.

Работа выполнена при поддержке программ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» и ФАНИ (ГК 02.740.11.0553).

Литература

1. Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. – СПб.: Наука, 1992. – 318 с.
2. Growth and holographic characterization of nonstoichiometric sillenite-type crystals / H. Vogt, K. Buse, E. Kraetzig et al. // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 90. – P. 3167–3173.
3. Фотоиндуцированные явления в силленитах / В.К. Малиновский, О.А. Гудаев, В.А. Гусев, С.И. Деменко. – Новосибирск: Наука, 1990. – 160 с.
4. Oberschmid R. Absorption centers of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals // Phys. Status Solidi A. – 1985. – Vol. 89. – P. 263–270.
5. Кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{M}_x\text{O}_{20-\delta}$ со структурой силленита. Синтез строение, свойства / Ю.В. Каргин, В.И. Бурков, А.А. Марьин, А.В. Егорышева. – М.: ИОНХРАН, 2004. – 312 с.
6. Спектральная зависимость фотоиндуцированного поглощения, наведенного в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ импульсным излучением с длиной волны 532 нм / А.Л. Толстик, А.Ю. Матусевич, М.Г. Кистенева и др. // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 11. – С. 1027–1032.
7. Динамика фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах титаната висмута / С.М. Шандаров, А.Е. Мандель, М.Г. Кистенева и др. // Химия высоких энергий. – 2008. – Т. 42, № 4 (приложение). – С. 58–60.
8. Temperature dependences of optical absorption and its light-induced changes in sillenite crystals / S.M. Shandarov, L.E. Polyakova, A.E. Mandel et al. // Proc. SPIE. – 2007. – Vol. 6595. – P. 124–131.

Кистенева Марина Григорьевна

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. КУДР ТУСУРа

Тел.: (382-2) 51-23-27

Эл. почта: m-kisteneva@mail.ru

Акрестина Анна Сергеевна

Аспирант каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-87

Эл. почта: aka_83@mail.ru

Сивун Дмитрий Олегович

Студент каф. электронных приборов ТУСУРа

Эл. почта: dmeet@sibmail.com

Киселев Роман Вячеславович

Студент каф. электронных приборов ТУСУРа

Шандаров Станислав Михайлович

Д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-87

Эл. почта: shand@ed.tusur.ru

Смирнов Серафим Всеволодович

Д-р техн. наук, проф. каф. Физической электроники ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-48-61

Толстик Алексей Леонидович

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. лазерной физики и спектроскопии
Белорусского государственного университета, г. Минск
Тел.: (10-375-17) 209-51-20
Эл. почта: tolstikal@gmail.com

Агишев Игорь Николаевич

Зав. лаб. каф. лазерной физики и спектроскопии
Белорусского государственного университета, г. Минск
Тел.: (10-75-17) 209-51-18
Эл. почта: agishev@bsu.by

Станкевич Андрей Владимирович

Магистрант каф. лазерной физики и спектроскопии
Белорусского государственного университета, г. Минск

Каргин Юрий Федорович

Д-р хим. наук Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
Тел.: (499) 955-48-02
Эл. почта: yu.kargin@rambler.ru

Kisteneva M.G., Akrestina A.S., Sivun D.O., Kiselev R.V., Shandarov S.M., Smirnov S.V.,
Tolstik A.L., Agishev I.N., Stankevich A.B., Kargin Yu.F.

Dynamics of photoinduced light absorption in sillenite crystals exposed to picosecond pulse radiation

The results of experimental investigations of dynamics of photoinduced light absorption in undoped bismuth silicon ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) and bismuth titanium oxide ($\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$) crystals, which are exposed to picosecond laser pulse radiation at the wavelength $\lambda = 532$ nm, are presented. The observed dependences of the light-induced absorption evolution are interpreted within the framework of the impurity absorption model taking into account presence of two kinds of deep centres in the crystal band gap.

Keywords: photorefractive crystals, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, photoinduced absorption, laser pulses.