

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

«Белорусский государственный педагогический университет
имени Максима Танка»

**РАЗВИТИЕ
ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ
В БГУ**

*Материалы
научно-практической конференции*

г. Минск, 19 ноября 2015 г.

Минск 2016

В работе исследована динамика светоиндуцированных переходов и последующих релаксационных процессов в кристаллах силиката $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) и титаната $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) висмута при рассмотрении процессов фотопроводимости и фотоиндуцированного поглощения.

The work presents dynamics of the light-induced transitions and of the following relaxation processes in crystals of bismuth silicate $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) and titanate $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO), which are associated with the photoconductivity and photoinduced absorption processes.

Интерес к исследованию фоторефрактивных кристаллов на протяжении последних десятилетий не перестает ослабевать из-за возможности их широкого применения, в том числе при использовании малой (микро- и нановаттной) мощности лазерного излучения. Например, к техническому приложению таких сред относится усиление оптических изображений [1; 2], запись, хранение и обработка информации оптическими методами [3], обращение волнового фронта [4], создание элементов для оптических ассоциативных устройств и нейрокомпьютеров и др.

Под действием неоднородной засветки в фоторефрактивных кристаллах формируется поле пространственного заряда, которое вызывает модуляцию показателя преломления среды вследствие электрооптического эффекта, что позволяет реализовать нелинейные эффекты формирования динамических дифракционных и волноводных структур, включая пространственные фоторефрактивные солитоны. Внимание привлекают и эффекты, связанные с возможностью перекачки энергии между двумя световыми волнами. Такие эффекты реализуются при двухлучковом взаимодействии, а также при взаимодействии пространственных солитонов при параллельной геометрии распространения их в образце.

Для описания физических процессов формирования поля пространственного заряда, происходящих в фоторефрактивных кристаллах, предложено более десятка моделей, каждая из которых наиболее простым способом описывает те или иные экспериментальные эффекты [1; 5]. Одной из наиболее стандартных моделей является модель, разработанная Кухтаревым [6] и др. В ее основе лежат процессы зонного переноса и учет электронной и дырочной проводимости, фотогенерации и рекомбинации носите-

лей заряда на глубоких донорных уровнях. Недостатком модели с глубокими донорами является то, что она не может объяснить ряд динамических эффектов, обнаруженных в фоторефрактивных кристаллах. Сюда можно отнести динамику фотопроводимости в микросекундном временном диапазоне и эффект экспоненциального распада фоторефрактивной решетки в темноте, которые могут быть связаны с наличием в кристалле дополнительного мелкого ловушечного уровня [7].

Объект и методы исследований

В качестве объектов исследования были выбраны фоторефрактивные нелегированные монокристаллы титаната $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) и силиката $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) висмута. В основе взаимодействия света с такими кристаллами лежит фоторефрактивный эффект, который изучается уже более тридцати лет. Кристаллы силленитов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ имеют малую электрооптическую постоянную по сравнению с такими фоторефрактивными кристаллами (ФРК), как титанат бария или барий-стронциевый ниобат. Однако их существенными преимуществами являются работа в широком температурном диапазоне и легкость в технологической обработке. Для повышения фоторефрактивного отклика силленитов используются внешние электрические поля, прикладываемые к фоторефрактивным кристаллам.

Однако, несмотря на все преимущества вышеназванных фоторефрактивных сред, существует некоторая особенность, затрудняющая их применение. Оптически активным центром в таких кристаллах является ион висмута, но свойства реальных монокристаллов оказываются зависящими от окружения иона висмута (а именно, от геометрии расположения, расстояния до иона кислорода, электронной структуры и расположения ионов Ti, Si, Ge для $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ соответственно) [8]. Даже «номинально чистые образцы» обычно содержат большое количество разнообразных дефектов: ассоциации двух центров, к примеру, донорно-акцепторных пар, приводящие к внутрицентровым переходам, которые вызывают уменьшение пропускания и потемнение образца [9], антиструктурные ионы $\text{Bi}_{\text{Si}}^{3+}$ и $\text{Bi}_{\text{Si}}^{5+}$, которые, например, замещают ионы Si^{4+} в кислородных тетраэдрах силиката висмута [10]. При этом именно внутренние дефекты могут непосредственно влиять на образец: так, например, антиструктурные ионы висмута ответственны в основном за желто-коричневую окраску BSO, а фотохромный эффект обусловлен внутрицентровыми оптическими переходами.

Поэтому вместе с поиском применений фоторефрактивных кристаллов класса силленитов все еще остается актуальной задача исследования их внутренней структуры. Целью выполненной работы являлось исследование динамик светоиндуцированных переходов и последующих релаксационных процессов в кристаллах силиката $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) и титаната $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

(ВТО) висмута при рассмотрении процессов фотопроводимости и фотоиндуцированного поглощения.

Результаты и их обсуждение

Из анализа спектров оптической плотности фотоиндуцированных образцов, снятых в различные моменты после лазерной засветки, можно оценить фотоиндуцированные изменения оптического поглощения кристаллов титаната висмута в условиях наносекундного импульсного облучения (рисунок 1). Также из рисунка 1 следует, что релаксация ловушек является медленным процессом и поглощение, инициированное в кристалле лазерным излучением, сохраняется на протяжении нескольких (3–4) суток.

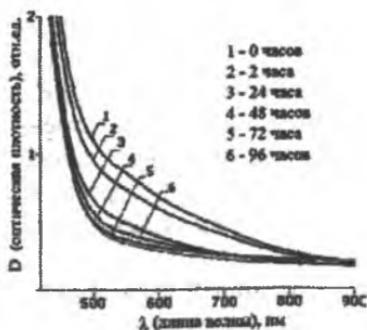


Рисунок 1 — Спектры оптической плотности кристалла титаната висмута (ВТО) в различные моменты времени после лазерной засветки

Зачастую интерес представляет изучение не только глубоких ловушечных центров, но и мелких ловушек, а также описание процессов зарядового переноса по уровням кристалла в целом. Исследование транспортных процессов фотогенерированных электронов как функция от длины волны имеет важное значение для работы устройств голографической записи изображения, обращения волнового фронта и пространственно-временных модуляторов света.

Поэтому следующим этапом работы стало исследование фотопроводимости и фотоиндуцированного поглощения фоторефрактивных легированных монокристаллов силиката и титаната висмута при экспозиции наносекундными лазерными импульсами.

Для случая фотопроводимости в качестве источника излучения был выбран импульсный твердотельный лазер на иттрий-алюминиевом гранате в режиме генерации второй гармоники (длина волны 532 нм), который равномерно освещал образец. Интенсивность и поляризацию экспонирующего излучения можно было варьировать с помощью системы светофильтров и поляризаторов. Для регистрации сигнала фотопроводимости от высокоомного образца последний включался в электрическую схему последова-

тельно с сопротивлением нагрузки, с которого регистрировался сигнал на двухканальном цифровом осциллографе TDS 2022B. В результате были получены совокупности откликов кристаллов при разных длинах волн и разных интенсивностях экспонирующего излучения, которые представляли собой зависимости напряжения на нагрузочном сопротивлении от времени. Такие кинетики можно пересчитать в зависимости тока на кристалле и его сопротивления от времени, что и представлено на рисунке 2.

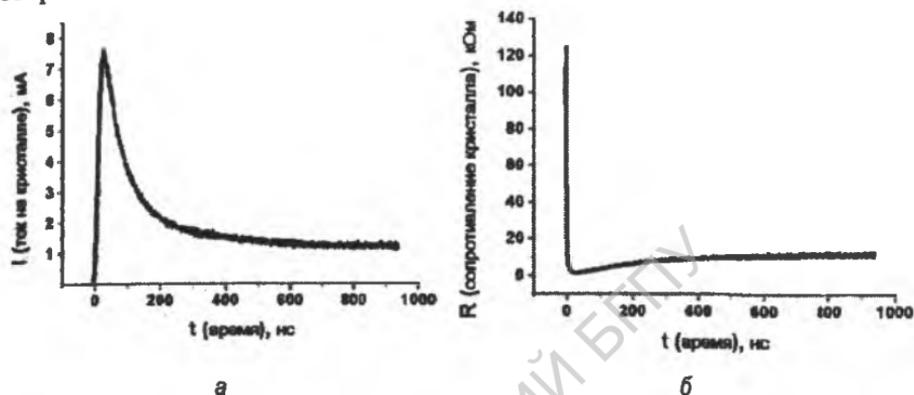


Рисунок 2 – Типичная характеристика отклика фоторефрактивного кристалла силиката висмута при засветке наносекундным лазерным излучением и соответствующая кинетика электрического сопротивления

В общем случае кинетики, представленные на рисунке 2, описываются сложной неоднoэкспоненциальной функцией вида:

$$U = U_0 + U_1 e^{-(t-t_0)/\tau_1} + U_2 e^{-(t-t_0)/\tau_2} + U_3 e^{-(t-t_0)/\tau_3} + \dots + U_i e^{-(t-t_0)/\tau_i}, \quad (1)$$

где t_0 , U , U_0 , U_1 , U_2 , U_3 , U_i – математические коэффициенты аппроксимации;

τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_i – времена релаксации.

Некоторые из светоиндуцированных процессов в фоторефрактивных кристаллах могут также отлично описываться затянутой экспоненциальной функцией (stretched-exponential function) [11]:

$$U = U_0 \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right]. \quad (2)$$

Однако довольно хорошее согласование с экспериментальными данными уже показывает аппроксимация двухэкспоненциальной функцией. Аппроксимируя кинетики фотопроводимости двумя экспонентами, можно выделить быструю и медленную составляющие. Для кристалла силиката висмута время медленной компоненты зависит от длины волны и мощности излучения, как показано на рисунке 3, и находится в диапазоне от 10 до

50 мкс, в то время как время жизни быстрой компоненты – порядка 100 нс. Для кристалла титаната висмута времена быстрой компоненты сигнала лежат в диапазоне значений от 15 до 40 нс, а времена медленной компоненты – от 1 до 4 мкс.

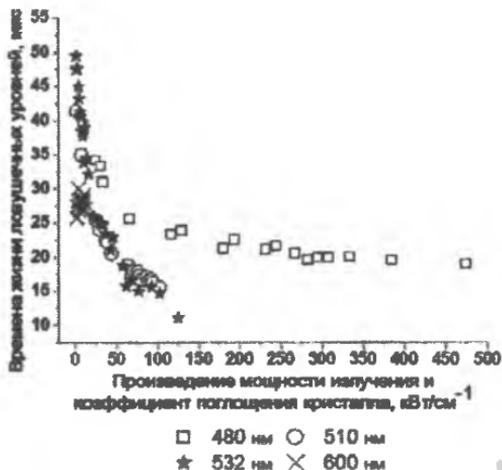


Рисунок 3 – Характерные времена медленной компоненты при двухэкспоненциальном разложении в кристалле силиката висмута в зависимости величины, пропорциональной количеству электронов в зоне проводимости, и длины волны излучения засветки образца

При изучении динамики фотоиндуцированного поглощения показано, что получаемые кинетические зависимости также состоят из двух компонент – быстрой и медленной. Однако времена релаксационных переходов на более низкие ловушечные уровни и в валентную зону оказываются на три-четыре порядка медленнее. Рекомбинация электронов с таких уровней происходит с характерными временами, лежащими для кристаллов ВТО и BSO соответственно в микро- и миллисекундных диапазонах.

Зависимости измеренного сигнала фотопроводимости от интенсивности и длины волны лазерной засветки представлены на рисунках 4 а, б. Спектральные зависимости фотопроводимости при лазерном облучении изменяется плавно в диапазоне от 500 нм до 700 нм. Наблюдаемый при этом спад сигнала фотопроводимости в коротковолновой области спектра связан с резким увеличением коэффициента поглощения образца, что иллюстрирует рассчитанная спектральная зависимость глубины проникновения излучения в исследуемый образец (сплошная линия на рисунке 4). Как видно из рисунка, для исследуемого кристалла спектральные зависимости фотопроводимости имеют максимум вблизи длины волны 500 нм.

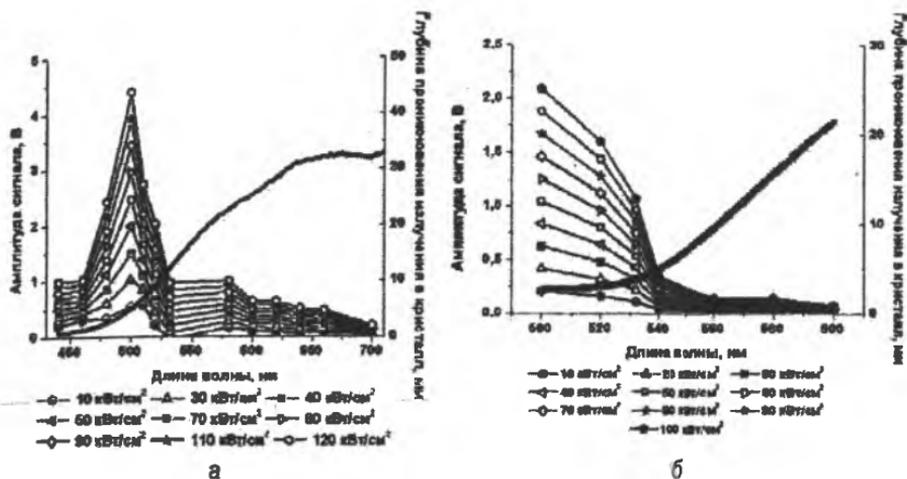


Рисунок 4 – Спектральная зависимость фотопроводимости фоторефрактивных монокристаллов силиката висмута (а) и титаната висмута (б)

Физические механизмы, ответственные за процессы зарядового переноса под воздействием света, могут быть описаны следующим образом. Когда фоторефрактивный кристалл подвергается экспозиции видимым или ближним ультрафиолетовым светом, электроны возбуждаются из валентной зоны и донорных уровней в зону проводимости, оставляя положительно заряженные дырки. Такие свободные электроны дрейфуют под действием электрического поля, приложенного к кристаллу, и захватываются на ловушки после прохождения некоторого среднего расстояния. Особенностью же проявления светоиндуцированных процессов в кристаллах семейства силленитов является участие ловушечных центров с существенно различающимися временами жизни – от сотен наносекунд до нескольких суток.

Таким образом, установлены характеристики релаксационных кинетик фотопроводимости и фотоиндуцированного поглощения, а также приведены их спектральные особенности для фоторефрактивных кристаллов силиката и титаната висмута. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют необходимость учета мелких и глубоких ловушечных уровней для описания динамики фотопроводимости и наведенного поглощения и будут использованы при построении комплексной теоретической модели, адекватно описывающей светоиндуцированные переходы в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Photorefractive Materials and Their Applications 1: Basic Effects (Springer Series in Optical Sciences) / Edited by P. Günter, J. P. Huignard // Springer, 2006. – 426 p.

2. Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – СПб. : Наука, 1992.
3. Yen, P. Photorefractive nonlinear optics and optical computing / P. Yen, A. E. Chiou, J. Hong, P. Beckwith, T. Chang, M. Khoshnevisan // *Opt. Eng.*, 1989. – Vol. 28. – P. 328-343.
4. Marrakchi, A. Dynamic holographic interconnects with analog weights in photorefractive crystals / A. Marrakchi, W. M. Hubbard, S. F. Habiby, J.S. Patel // *Opt. Eng.*, 1990. – Vol. 28. – P. 215-224.
5. Photorefractive Optics: Materials, Properties, and Applications / Edited by Francis T.S. Yu, Shizuhuo Yin // Academic Press: 1999. – 570 p.
6. Brost, G. A. Intensity-dependent absorption and photorefractive effects in barium titanate / G. A. Brost, R. A. Motes, J. R. Rotge // *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988. – Vol. 5, Is. 9. – P. 1879-1885.
7. Temple, D. A. Photoinduced absorption effects in BaTiO₃ / D. A. Temple, C. Warde // *OSA Annual Meeting*, 1988. – Vol. 11. – P. 137.
8. Lima, A. F. Structural, electronic, optical, and magneto-optical properties of Bi₁₂MO₂₀ (M = Ti, Ge, Si) sillenite crystals from first principles calculations / A. F. Lima, S. A. S. Farias, M. V. Lalic // *Journal of applied physics*, 2011. – Vol. 110. – P. 083705-1-083705-9.
9. Kisteneva, M. G. Photo- and thermoinduced changes of the optical absorption in Bi₁₂SiO₂₀ crystals / M. G. Kisteneva, A. S. Akrestina, S. M. Shandarov, S. V. Smimov, O. N. Bikeev, K. P. Lovetskii, Yu. Kargin // *Journal of Holography and Speckle*, 2009. – Vol. 5. – P. 1-6.
10. Панченко, Т. В. Фотохромный эффект в кристаллах Bi₁₂SiO₂₀, легированных Cu и Ag / Т. В. Панченко // *Физика твердого тела*, 2008. – Т. 50, В. 10. – С. 1824-1830.
11. Berben, D. Lifetime of small polarons in iron-doped lithium-niobate crystals / D. Berben, K. Buse, S. Wevering // *Journal of applied physics*, 2000. – Vol. 87, Is. 3. – P. 1034-1041.