

УДК 535.215.6

Р.В. Ромашко, А.И. Грачев, А.А. Камшилин, С.С. Голик, Ю.Н. Кульчин

## Линейный фотогальванический эффект в силленитах при облучении фемтосекундными импульсами

Выполнены экспериментальные исследования фотогальванического (ФГ) эффекта, возникающего в неполярных кристаллах со структурой силленита ( $\text{Vt}_{12}\text{TiO}_{20}$  и  $\text{Vt}_{12}\text{SiO}_{20}$ ) при их освещении лазерными импульсами длительностью 100 фс и длиной волны 400 нм. Установлено, что амплитуда импульса ФГ тока линейно зависит от интенсивности излучения в импульсе вплоть до  $45 \text{ ГВт/см}^2$ . Экспериментально исследованы зависимости величины фотогальванического отклика от ориентации плоскости поляризации лазерного излучения. Полученные результаты позволяют заключить, что регистрируемые в кристаллах электрические токи генерируются в результате ФГ-эффекта.

**Ключевые слова:** фотогальванический эффект, ультракороткие световые импульсы, силлениты.

Получение ультракоротких импульсов тока в неполярных полупроводниках при резонансном возбуждении оптическими импульсами привлекает все большее внимание исследователей. Одним из наиболее важных стимулов, побуждающих такие исследования, является возможность использования ультракоротких импульсов тока для генерации терагерцового излучения (ТГИ). Фотогальванический эффект [1, 2] в силу очень короткого времени релаксации нетермализованных электронов (до  $10^{-14}$  с), обладает перспективой по его использованию, в том числе и для эффективной генерации ТГИ [3–6].

В настоящее время спектр материалов, в которых обнаружена генерация фотогальванического тока в фемтосекундном диапазоне, ограничен. В большинстве своем это полупроводники со структурой вюрцита ( $\text{CdS}$ ,  $\text{CdSe}$ ) и цинковой обманки ( $\text{GaAs}$ ) [3, 4], а также гетероструктуры на основе указанных материалов [5, 6]. В этой связи в целях дальнейшего исследования фотогальванического эффекта и разработки приложений на его основе актуальной является задача поиска новых материалов, проявляющих фотогальванический (ФГ) отклик на фемтосекундные импульсы. Среди таких перспективных материалов выделяются кристаллы со структурой силленита (в частности  $\text{Vt}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) и  $\text{Vt}_{12}\text{TiO}_{20}$  (BTO)), в которых был обнаружен ФГЭ при облучении непрерывным излучением [7] и импульсным излучением наносекундной длительности [8].

В настоящей работе представлены результаты исследования детектирования фотогальванического тока, индуцируемого в кристаллах BTO и BSO фемтосекундными импульсами.

**Экспериментальная установка.** В работе проведены экспериментальные исследования фотогальванического эффекта при освещении кубических кристаллов со структурой силленита лазерным излучением фемтосекундной длительности. В качестве объектов исследования были выбраны кристаллы силиката и титаната висмута (BSO и BTO). Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

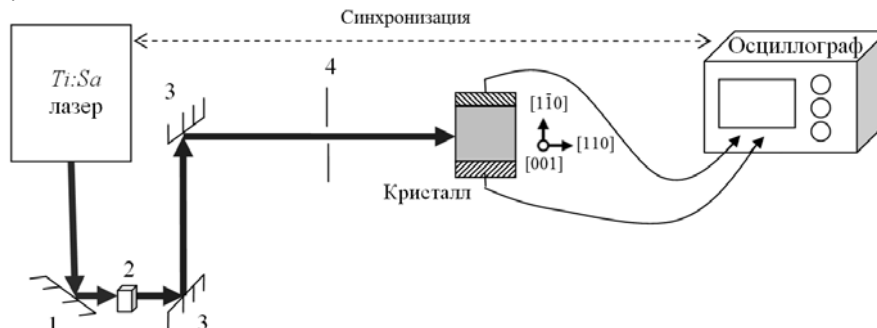


Рис. 1. Схема экспериментальной установки исследования фотогальванического эффекта при освещении образцов лазерными импульсами фемтосекундной длительности:

1 – зеркало с максимальным коэффициентом отражения на длине волны 800 нм;

2 – кристалл ВВО, генерирующий вторую гармонику на длине волны 400 нм;

3 – зеркало с максимальным коэффициентом отражения на длине волны 400 нм; 4 – диафрагма

Фемтосекундные импульсы, полученные с помощью лазерной установки Spitfire Pro XP Ultrafast Ti:Sapphire Amplifier на длине волны 400 нм (при генерации второй гармоники на кристалле ВВО), имеющие длительность 100 фс, направлялись в кристалл вдоль оси [110]. Поворотом кристалла вокруг оси [110] задавался угол между плоскостью поляризации излучения и осью кристалла [001]. Электрический ток, возникающий в результате ФГ-эффекта в такой конфигурации, приводил к возникновению на электродах, нанесенных на грани кристалла ( $1\bar{1}0$ ), электрической разности потенциалов, которая регистрировалась дифференциальным методом. Размер использованных образцов составил  $1,9 \times 5,0 \times 6,4 \text{ мм}^3$  (для BSO) и  $1,97 \times 1,95 \times 5,48 \text{ мм}^3$  (для ВТО), где первый размер – толщина образца в направлении распространения света, а второй – расстояние между электродами.

На рис. 2, а приведены осциллограммы фотогальванического отклика, возникающего в кристалле BSO, облучаемого единичным лазерным импульсом.

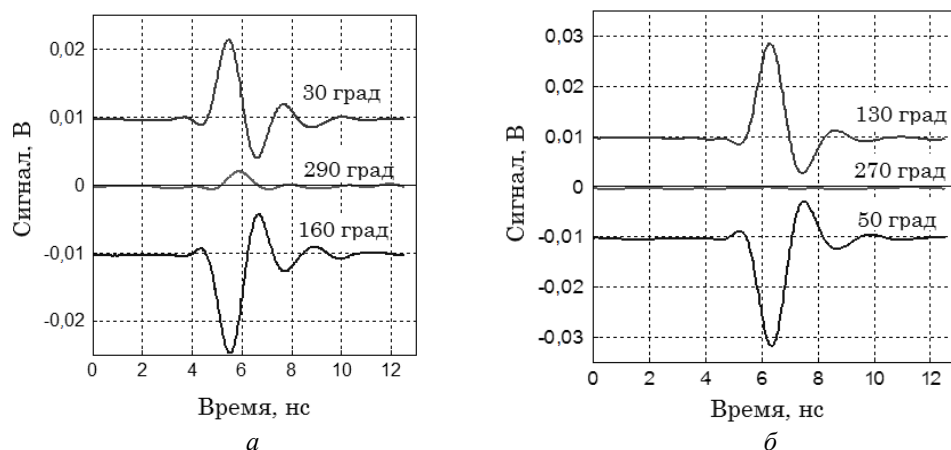


Рис. 2. ФГ-сигнал в образцах кристаллов BSO (а) и ВТО (б) при разных ориентациях вектора поляризации падающего излучения с длительностью импульсов 100 фс

Видно, что как величина, так и знак ФГ-тока зависят от ориентации плоскости поляризации по отношению к оси [001], при этом знак изменяется на противоположный при повороте плоскости поляризации на 90 град, что находится в полном соответствии с результатами работ [1, 7]. При этом, однако, в «нулевом» положении плоскости поляризации (при угле 160°), когда происходит смена знака ФГ-тока, последний не исчезает полностью, что свидетельствует о наличии в исследуемом образце электрических токов, имеющих отличную от фотогальванической природу. Иная картина наблюдается в кристалле ВТО (рис. 2, б). Как видно, в этом кристалле в «нулевом» положении плоскости поляризации (при угле 270°) электрический сигнал практически полностью исчезает, что подтверждает его связь с ФГ-эффектом.

В работе выполнено исследование зависимости ФГ-отклика в кристалле от энергии в импульсе. Как видно из рис. 3, в диапазоне энергий до 0,2 мДж (плотность мощности до 45 ГВт/см<sup>2</sup>) зависимость линейна.

**Заключение.** Таким образом, в работе выполнено исследование процесса генерации коротких импульсов электрического тока в кристаллах со структурой силленита ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ ) при их освещении лазерными фемтосекундными импульсами на длине волны 400 нм. Установлена зависимость ФГ тока от поляризации излучения. Высокая амплитуда регистрируемого ФГ-тока и линейность зависимости его величины от плотности оптической мощности насыщения (в диапазоне до 45 ГВт/см<sup>2</sup>) делают эти материалы перспективными для применения в области сверхбыстрой оптоэлектроники.

Исследование выполнено при поддержке Президиума ДВО РАН и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-02-12087).

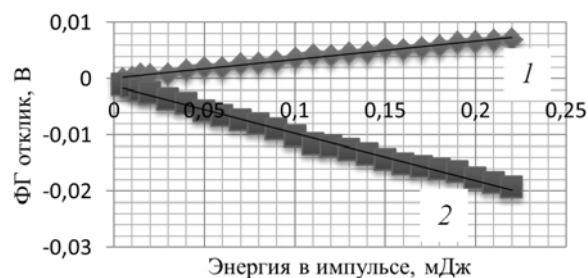


Рис. 3. Энергетическая зависимость ФГ-отклика в кристалле ВТО:  
1 – максимум отклика; 2 – минимум отклика

*Литература*

1. Белиничер В.И. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии / В.И. Белиничер, Б.И. Стурман // УФН. – 1980. – Т. 130. – С. 415–458.
2. Sturman B.I. The photovoltaic and photorefractive effect in noncentrosymmetric materials / B.I. Sturman, V.M. Fridkin. – Philadelphia: Gordon and Breach, 1993. – 238 p.
3. Côté D. Rectification and shift currents in GaAs / D. Côté, N. Laman, H.M. van Driel // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 80. – P. 905–907.
4. Laman N. Ultrafast shift and injection currents observed in wurtzite semiconductors via emitted terahertz radiation / N. Laman, M. Bieler, H.M. van Driel // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 98. – P. 103507.
5. Ultrafast spin-polarized electrical currents injected in a strained zinc blende semiconductor by single color pulses / M. Bieler, N. Laman, H.M. van Driel, A.L. Smirl // Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 86. – P. 061102.
6. Bieler M. Simultaneous generation of shift and injection currents in (110)-grown GaAs/AlGaAs quantum wells / M. Bieler, K. Pierz, U. Siegner // J. Appl. Phys. – 2006. – Vol. 100. – P. 083710.
7. Петров М.П. Фотогальванические эффекты в силикате висмута  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  / М.П. Петров, А.И. Грачев // Письма в ЖЭТФ. – 1979. – Т. 30. – С. 18–21.
8. Fast photogalvanic response of a  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  crystal / R.V. Romashko, A.I. Grachev, Y.N. Kulchin, A.A. Kamshilin // Opt. Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 27142.

**Ромашко Роман Владимирович**

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. теоретической и экспериментальной физики  
Дальневосточного федерального университета;  
вед. науч. сотрудник лаб. прецизионных оптических методов измерений  
Института автоматизации и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН, г. Владивосток  
Тел.: +7 (423) 255-51-74  
Эл. почта: romashko@iacp.dvo.ru

**Грачев Александр Иванович**

Канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник  
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург  
Тел.: +7 (812) 515-91-95  
Эл. почта: grach.shuv@mail.ioffe.ru

**Камшилин Алексей Александрович**

Д-р физ.-мат. наук, профессор, руководитель лаб. оптических сенсорных технологий  
Университета Восточной Финляндии, г. Куопио, Финляндия  
Тел.: +35-840-355-25-61  
Эл. почта: alexei.kamchilin@uef.fi

**Голик Сергей Сергеевич**

Канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток  
Тел.: +7-902-483-07-96  
Эл. почта: golik\_s@mail.ru

**Кульчин Юрий Николаевич**

Академик, д-р физ.-мат. наук, профессор, руководитель отдела оптоэлектронных методов исследования  
газообразных и конденсированных сред ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток  
Тел.: +7 (423-2) 31-04-39  
Эл. почта: director@iacp.dvo.ru

Romashko R.V., Grachev A.I., Kamshilin A.A., Golik S.S., Kulchin Yu.N.

**Linear photogalvanic current excited in sillenite crystals by femtosecond laser pulses**

We have observed electric pulses generated in sillenite crystals ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  and  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ ) by 100 fs laser pulses at the wavelength of 400 nm. Direction of the induced current depends on the polarization state of the laser pulse. High photogalvanic response and its linear dependency on light power density in a wide range (up to 45  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ) makes sillenite crystals promising materials for ultra-fast optoelectronics devices.

**Keywords:** photogalvanic effect, ultra-short laser pulses, sillenites.