ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 55, № 9/2 ФИЗИКА 2013

УДК 535.530.182:621.372.632+537.86.029.65/.79

С.А. БЕРЕЗНАЯ, З.В. КОРОТЧЕНКО*, Ф.В. РУДОВ**, С.Ю. САРКИСОВ*, Ф.Д. САФИУЛЛИН**, В.Н. ТРУХИН****

СРАВНЕНИЕ УСЛОВИЙ СИНХРОНИЗМА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ GaSe И $GaSe_{0,71}S_{0,29}$[1]

Проведен анализ условий синхронизма для процесса генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера в кристаллах GaSe и $GaSe_{0,71}S_{0,29}$. Выполнено экспериментальное сравнение эффективности данного процесса для центральных длин волн лазерного импульса 780–820 нм и спектральных ширин импульсов 10–60 нм. Продемонстрировано узкополосное электрооптическое детектирование в кристалле GaSe d = 8 мм при длительности зондирующих лазерных импульсов ~ 12 фс.

Ключевые слова: *оптическое выпрямление, терагерцовое излучение, селенид галлия, условия синхронизма.*

Введение

В последние 15 лет кристаллы GaSe имеют широкое применение в импульсных терагерцовых спектрометрах (THz-TDS), в качестве генераторов и электрооптических детекторов терагерцового излучения. Для данных приложений GaSe имеет преимущество перед кристаллами-аналогами, например ZnTe, в случаях, когда необходимо получить максимально широкий спектр генерации (детектирования), от 0,1 ТГц до 10–100 ТГц. В настоящей работе сравнивается генерация терагерцового излучения в кристаллах GaSe и $GaSe_{0,29}S_{0,71}$. Последние обладают более высокими твердостью и лучевой стойкостью и сохраняют нецентросимметричную кристаллическую решетку ε-GaSe.

Методы расчета и эксперимента

Кристаллы GaSe и $GaSe_{0,29}S_{0,71}$, которые использовались в настоящем исследовании, выращивались модифицированным методом Бриджмена [1]. При расчетах условий синхронизма использовались дисперсионные уравнения для показателей преломления обыкновенной $n_o(\lambda)$ и необыкновенной $n_e(\lambda)$ волн в GaSe в ИК- и терагерцовом диапазонах частот из [2] (за исключением дисперсионной зависимости $n_{\mathrm{THz}_o}(\lambda)$ для обыкновенной волны в терагерцовом диапазоне, для которой использовано соотношение, полученное в [3]). Аналогично, для показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн в $GaSe_{0,29}S_{0,71}$ в ИК- и терагерцовом диапазонах частот (за исключением $n_{\mathrm{THz}_o}(\lambda)$, которые взяты из [4]) использовались соотношения $n_o(\lambda)$ – 0,08 и $n_e(\lambda)$ – 0,08, где $n_o(\lambda)$ и $n_e(\lambda)$ взяты из [1].

Под диапазоном синхронизма (см. рис. 1) в настоящей работе понимается диапазон терагерцовых частот, для которых при заданной центральной длине волны лазерного импульса λ и угле θ вне кристалла между направлением распространения лазерного импульса и оптической осью кристалла длиной d выполняется условие

$$\left|\Delta k\right| \cdot d \le \pi. \tag{1}$$

В случае типов взаимодействия *eeo*, *eee*, *ooo*, *ooe* (когда в процессе участвуют компоненты лазерного импульса с одинаковой поляризацией) можно перейти к групповому показателю преломления оптического импульса, как это делается в случае недвулучепреломляющих кристаллов (например, ZnTe) [4]. В этом случае волновая расстройка запишется в виде

$$\Delta k(\nu,\lambda,\theta) = [n_{\mathrm{gr}}(\lambda,\theta) - n_{\mathrm{THz}}(\nu,\theta)]2\pi\nu / c. \tag{2}$$

Здесь ν – терагерцовая частота; n_{gr} – групповой показатель преломления. Функция

$$n_{\mathrm{vis}} = (n(\nu_{\mathrm{opt}})\nu_{\mathrm{opt}} - n(\nu_{\mathrm{opt}} - \nu)(\nu_{\mathrm{opt}} - \nu))/\nu, \tag{3}$$

представленная на рис. 1, *в* является эффективным аналогом группового показателя преломления оптического импульса в случае различных поляризаций взаимодействующих компонент лазерного импульса. На графиках (рис. 1) серая область показывает где должны находиться кривые $n_{\mathrm{THz}}(\theta)$ (рис. 1, *а* и *б*) или $n_{\mathrm{vis}}(\theta)$ (рис. 1, *в*) для выполнения условия (1). Следует отметить, что исследуемые в настоящей работе процессы детектирования терагерцового излучения в кристаллах GaSe идут за счет генерации разностных и суммарных частот между спектральными компонентами зон-

[1] Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-02-90882_мол_рф_нр, гранта Президента РФ НШ-512.2012.2 и проекта 2.4885.2011, финансируемого в рамках Государственного задания.

дирующего оптического импульса и терагерцовым импульсом. При этом поляризация генерируемого излучения в оптическом диапазоне должна отличаться от поляризации излучения зондирующего импульса. То есть эффективны только процессы *eoo*, *eoe*, *oeo*, *oee*.

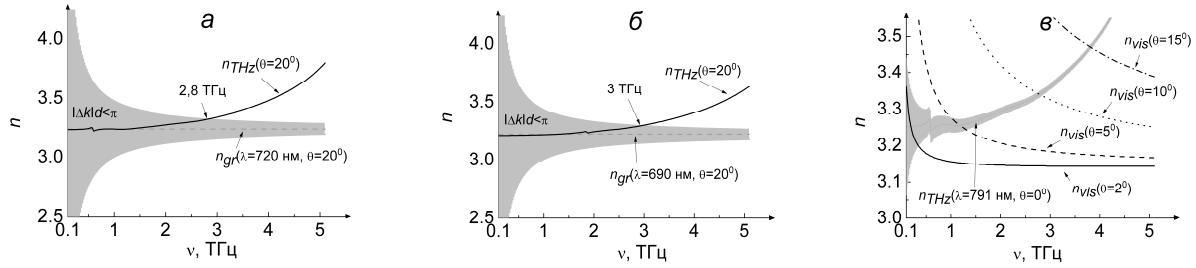

Рис. 1. Диапазоны синхронизма для генерации терагерцового излучения путем оптического выпрямления по типу *eee* [4] в кристаллах GaSe d = 630 мкм (*а*) и $GaSe_{0,29}S_{0,71}$ d = 700 мкм (*б*); для детектирования в кристалле GaSe d = 8 мм (*в*) по *oeo*-типу взаимодействия

В настоящей работе эксперименты по генерации терагерцовых импульсов проводились с использованием стандартных схем THz-TDS спектрометров. Источником лазерных импульсов являлись лазеры на титан-сапфире Mai Tai SP (Spectra-Physics, США; λ = 780–820 нм, τ ~ 25–100 фс) и лазер FS SYNERGY (FemtoLasers, Австрия; λ = 791 нм, τ ~ 12 фс).

Результаты и их обсуждение

Генерация терагерцового излучения по *eee*-типу оптического выпрямления в кристаллах GaSe и $GaSe_{0,29}S_{0,71}$ близкой длины проводилась при внешних углах θ = 20°. При этих углах наблюдался максимум сигнала, что связано с отсутствием точного синхронизма для данного типа взаимодействия при доступных длинах волн лазеров (необходимы более короткие длины волн [4]), а также зависимостями отражения и эффективной нелинейности ($\sim \cos^3\theta$) от угла падения θ. На рис. 1, *а* и *б* показаны диапазоны синхронизма для длин волн лазера, обеспечивающих достижение точного синхронизма ($\Delta k = 0$) для кристаллов GaSe d = 630 мкм и $GaSe_{0,29}S_{0,71}$ d = 700 мкм. При таких длинах волн условие (1) выполнялось бы до частот 2,8 и 3 ТГц соответственно. В случае длины волны лазера λ = 780 нм условие (1) выполняется до частот 1,34 и 1,9 ТГц, λ = 800 нм – 1,19 и 1,7 ТГц, λ = 820 нм – 1,05 и 1,55 ТГц соответственно для кристаллов $GaSe_{0,29}S_{0,71}$ d = 700 мкм и GaSe d = 630 мкм. Таким образом, применение кристалла $GaSe_{0,29}S_{0,71}$ требует или менее коротких длин волн лазера или больших углов падения, что менее выгодно. Результаты данных оценок можно сопоставить с экспериментальными спектрами (рис. 2).

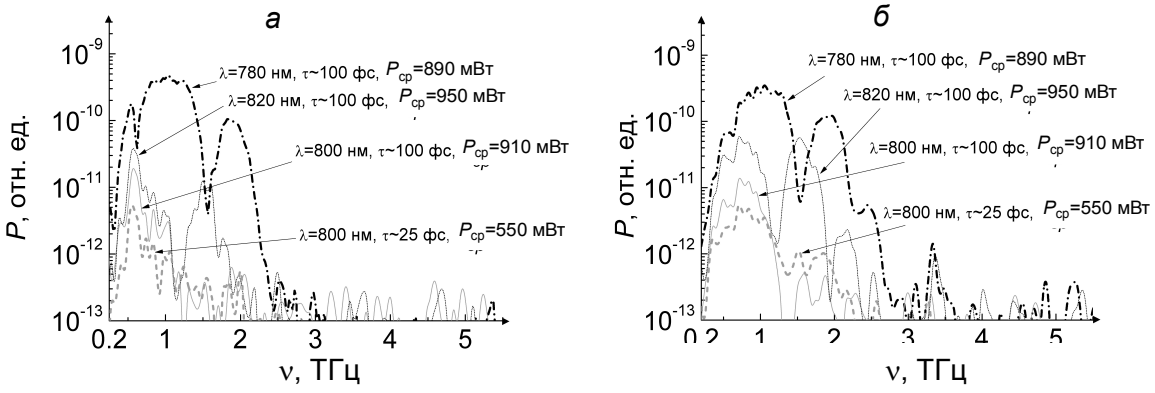

Рис. 2. Спектры терагерцовых импульсов, генерированных путем оптического выпрямления по типу *eee* [4] в кристаллах GaSe d = 630 мкм (*а*) и $GaSe_{0,29}S_{0,71}$ d = 700 мкм (*б*)

В случае протяженного кристалла диапазон частот, в котором выполняется условие (1), сужается (рис. 1, *в*). Экспериментально это наблюдалось для детектирования в кристалле GaSe d = 8 мм при использовании лазерных импульсов с λ = 791 нм и τ ~ 12 фс (рис. 3). Эволюция временных форм при смещении диапазона детектируемых частот в более высокочастотную область видна на вставках (рис. 3, *а–г*).

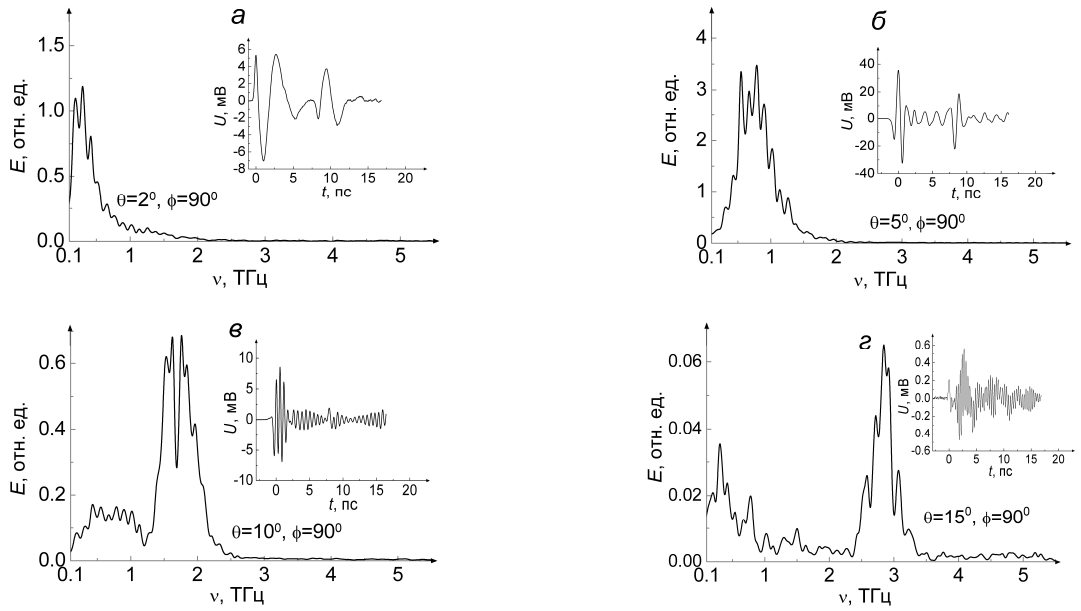

Рис. 3. Спектральные и временные формы (на вставках) терагерцового излучения, генерированного от поверхности InAs и детектированного в кристалле GaSe d = 8 мм при различных углах θ

Заключение

В результате выполненной работы продемонстрирована возможность осуществления узкополосного детектирования терагерцового излучения в протяженных кристаллах GaSe. Путем расчета условий синхронизма и экспериментов показано преимущество кристаллов GaSe перед $GaSe_{0,29}S_{0,71}$ по достижимости условий синхронизма и эффективности преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисов С.Ю., Атучин В.В., Гаврилова Т.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 4. – С. 21–26.
2. Chen C.-W., Tang T.-T., Lin S.-H., et al. // JOSA B. – 2009. – V. 26. – No. 9. – P. A58–65.
3. Nazarov M.M., Sarkisov S.Yu., Shkurinov A.P., and Tolbanov O.P. // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 99. – No. 8. – P. 081105-1–3.
4. Nazarov M.M., Sarkisov S.Yu., Shkurinov A.P., and Tolbanov O.P. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 100. – No. 13. – P. 136104-1–2.

*Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия
**Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
***Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sarkisov@elefot.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.07.13.

Березная Светлана Александровна, вед. технолог;
Коротченко Зоя Владимировна, вед. технолог;
Рудов Федор Валентинович, мл. науч. сотр.;
Саркисов Сергей Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией;
Сафиуллин Фарит Дигангереевич, студент;
Трухин Валерий Николаевич, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.

S.A. BEREZNAYA, Z.V. KOROTCHENKO, F.V. RUDOV, S.Yu. SARKISOV F.D. SAFIULLIN, V.N. TRUKHIN

COMPARISON OF PHASE-MATCHING CONDITIONS AND EFFICIENCIES OF TERAHERTZ GENERATION IN GaSe AND $GaSe_{0.71}S_{0.29}$

Analysis of phase-matching conditions for terahertz generation via optical rectification of femtosecond pulses of Ti:Sa laser in GaSe and $GaSe_{0.71}S_{0.29}$ crystals was done. Experimental study of efficiencies of this process for laser pulse central wavelengths 780–820 nm and spectral bandwidths 10–60 nm was performed. Narrowband electrooptic detection in d = 8 mm GaSe crystal at probe pulse duration of 12 fs was demonstrated.

Keywords: *optical rectification, terahertz generation, gallium selenide, phase-matching conditions.*