

## ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Л.-М. Жанг<sup>а</sup>, Д. Гуо<sup>а</sup>, Д.-Д. Ли<sup>а</sup>, Д.-Д. Се<sup>а</sup>, Ю. М. Андреев<sup>б\*</sup>, В. А. Горобец<sup>в</sup>, В. В. Зуев<sup>б</sup>,  
К. А. Кох<sup>г</sup>, Г. В. Ланский<sup>б</sup>, В. О. Петухов<sup>в\*</sup>, В. А. Светличный<sup>д</sup>, А. В. Шайдуко<sup>б</sup>

УДК 535.323-14;621.378.32

<sup>а</sup> Чанчуньский институт оптики, точной механики и физики  
Китайской академии наук; e-mail: lightcoming@ciomp.ac.cn

<sup>б</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской АН,  
634021, Томск, просп. Академический, 10/3; e-mail: yuandreev@imces.ru

<sup>в</sup> Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,  
220072, Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: v.petukhov@ifanbel.bas-net.by

<sup>г</sup> Институт минералогии и геологии Сибирского отделения Российской АН, Новосибирск;  
e-mail: k.a.kokh@gmail.com

<sup>д</sup> Томский государственный университет, Россия; e-mail: v\_svetlichnyi@rambler.ru

(Поступила 10 августа 2010)

Вертикальным методом Бриджмена выращены нелинейные кристаллы твердых растворов  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$ ,  $x \leq 0.4$ . Повышение твердости с  $8 \text{ кг/мм}^2$  при  $x = 0$  до  $\sim 20 \text{ кг/мм}^2$  при  $x = 0.4$  за счет наличия серы в кристаллах  $\text{GaSe}$  позволило изготовить по специальной технологии рабочие образцы с положением оптической оси в плоскости входных поверхностей и впервые провести прямое измерение дисперсионных свойств  $n_e(\lambda)$  для необыкновенной волны и  $n_o(\lambda)$  для обыкновенной в терагерцовом диапазоне спектра методом импульсной терагерцовой спектроскопии. Показана возможность реализации нетрадиционного  $ee-e$  типа взаимодействия при генерации терагерцового излучения.

**Ключевые слова:** нелинейная кристаллооптика, параметрическое преобразование частоты,  $\text{GaSe}$ , кристалл твердых растворов, терагерцовое излучение.

*Non-linear  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$  solid solution crystals,  $x \leq 0.4$ , are grown by the Bridgman vertical method. The increase of hardness (from  $8 \text{ kg/mm}^2$  at  $x = 0$  to  $\sim 20 \text{ kg/mm}^2$  at  $x = 0.4$ ) due to S-doping made it possible, using a special technology, to fabricate crystal samples with optical axes in planes of their faces and for the first time to carry out direct measurements of both  $n_e(\lambda)$  and  $n_o(\lambda)$  dispersions for extraordinary and ordinary waves respectively in the THz range by TDS-spectroscopy method. A possibility to realize a nontraditional  $ee-e$  type of the three-wave interaction is shown.*

**Keywords:** non-linear crystal optics, parametric frequency conversion,  $\text{GaSe}$ , solid solution crystal, terahertz emission.

**Введение.** Уникальный набор физических свойств нелинейных кристаллов  $\text{GaSe}$ , ответственных за эффективность процессов параметрического преобразования частоты излучения

### DISPERSION PROPERTIES OF $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$ IN THz RANGE

Lai-Ming Zhang<sup>а</sup>, Jin Guo<sup>а</sup>, Dian-Jun Li<sup>а</sup>, Ji-Jiang Xie<sup>а</sup>, Yu. M. Andreev<sup>б\*</sup>, V. A. Gorobets<sup>в</sup>, V. V. Zuev<sup>б</sup>,  
K. A. Kokh<sup>г</sup>, G. V. Lanskiy<sup>б</sup>, V. O. Petukhov<sup>в\*</sup>, V. A. Svetlichnyi<sup>д</sup>, and A. V. Shaiduko<sup>б</sup> (<sup>а</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences; e-mail: lightcoming@ciomp.ac.cn;

<sup>б</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk; e-mail: yuandreev@imces.ru; <sup>в</sup> B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, 68 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220072, Belarus; e-mail: v.petukhov@ifanbel.bas-net.by; <sup>г</sup> Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk; e-mail: k.a.kokh@gmail.com;

<sup>д</sup> Tomsk State University, Russia; e-mail: v\_svetlichnyi@rambler.ru)

ближнего и среднего ИК диапазонов в терагерцовый диапазон спектра [1, 2], привлекает пристальное внимание многих исследователей и разработчиков. К сожалению, чрезвычайно низкие механические свойства: почти нулевая твердость по шкале Мооса и легкость расслоения, ограничивают использование этих слоистых кристаллов точечной группы симметрии  $\bar{6}2m$  внутрилабораторными применениями.

В последнее время с целью расширения нелинейно-оптических применений механические свойства кристаллов GaSe в значительной степени улучшены за счет легирования элементами III и IV групп периодической системы Д. И. Менделеева (Al [3], S [4], In [5—7], Te [8, 9], Er [10]) и выращивания соответствующих кристаллов твердых растворов (КТР), а также путем выращивания кристаллов из расплавов GaSe:AgGaSe<sub>2</sub> [6] и GaSe:AgGaS<sub>2</sub> [11]. Кристаллы AgGaSe<sub>2</sub> и AgGaS<sub>2</sub> имеют отличную от кристаллов GaSe точечную группу симметрии  $\bar{4}2m$ . Установлено, что выбором содержания серы наряду с механическими контролируемо могут быть модифицированы и другие ключевые физические свойства кристаллов GaSe. Лучшие возможности в этом плане продемонстрировало введение больших (приводящих к изменению параметров решетки) концентраций серы, индия и теллура, другими словами, выращивание нелинейных кристаллов твердых растворов (НКТР) в соответствии с химическими формулами GaSe:GaS  $\rightarrow$  GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> [4], [12—19], GaSe:InSe  $\rightarrow$  Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Se [5, 7] и GaSe:GaTe  $\rightarrow$  GaSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> [8, 9]. Введение малоразмерных ионов серы устраняет дефекты спайности кристаллов GaSe и уменьшает линейные оптические потери в области максимальной прозрачности (оптимальный уровень легирования 2—3 мас. %), а также кратно увеличивает теплопроводность ортогонально слоям роста за счет замещения ионов селена, заполнения вакансий и интеркаляции в межслоевое пространство. В результате этих изменений повышается на 20—30 % лучевая стойкость для наносекундных импульсов накачки. Увеличение отношения смещения до  $x \leq 0.4$  сдвигает коротковолновую границу спектра пропускания НКТР GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> с 0.62 до 0.54 мкм, одновременно сдвигая кривые фазового синхронизма для процессов параметрического преобразования частоты. Сдвиг границы спектра пропускания в коротковолновую сторону значительно уменьшает уровень линейных, а также нелинейных оптических потерь на длинах волн коротковолновой накачки: излучения лазеров на красителях ( $\lambda = 0.60—0.75$  мкм), Nd:YAG (1.06 мкм), фемтосекундных титан-сапфировых (0.7—1.1 мкм) и хром-форстеритовых (1.25—1.32 мкм) лазеров. В свою очередь уменьшение углов фазового синхронизма приводит к соответствующему увеличению эффективной нелинейной восприимчивости отрицательных кристаллов GaSe [4]. По совокупности модифицированных свойств НКТР GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> продемонстрировали в 2.4 раза большую эффективность генерации второй гармоники эрбиевого лазера по отношению к чистым кристаллам GaSe [4], а кристаллы, выращенные из расплава GaSe:AgGaSe<sub>2</sub>, в четыре раза превосходили кристаллы ZnGeP<sub>2</sub> по эффективности удвоения частоты CO<sub>2</sub>-лазера [11].

Эффективное использование НКТР GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> в составе параметрических преобразователей частоты, в том числе для преобразования частоты в ТГц-диапазон спектра, невозможно без знания дисперсионных свойств, определение которых затруднено из-за ряда причин. Выражение для определения дисперсионных свойств КТР по известным дисперсионным свойствам исходных кристаллов [20], записанное применительно к рассматриваемому случаю в виде

$$n_{o,e}^2(\text{НКТР GaSe}_{1-x}\text{S}_x) = (1-x)n_{o,e}^2(\text{GaSe}) + xn_{o,e}^2(\text{GaS}),$$

не может использоваться на практике из-за различия политипной структуры объемных кристаллов  $\epsilon$ -GaSe и  $\epsilon$ -GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> ( $x \leq 0.4$ ) [4], с одной стороны, и  $\beta$ -GaS [21] — с другой, выращиваемых единственно возможным методом Бриджмена. В силу этого лишь для  $\epsilon$ -политипа GaSe [22] и  $\beta$ -политипа GaS [23] определены дисперсионные свойства. Из известных данных следует, что, существуя в чистом виде как  $\beta$ -политип, кристаллы GaS подстраиваются под структуру  $\epsilon$ -GaSe и трансформируются в возможный для них  $\epsilon$ -политип, входя в состав твердого раствора  $\epsilon$ -GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>,  $x \leq 0.4$ . Применение предложенного в работе [16] оригинального нелинейно-оптического метода для определения дисперсионных свойств НКТР  $\epsilon$ -GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>,  $x \leq 0.4$ , с использованием откорректированных данных о дисперсионных свойствах кристаллов  $\beta$ -GaS оправдало

себя. Установлена область их применимости 0.63—20 мкм [23] и только для ео—е-взаимодействия — ТГц-диапазон [16].

Отметим, что широко используемые данные о дисперсионных свойствах кристаллов  $\epsilon$ -GaSe в ИК диапазоне [10], полученные непрямыми методами, недостаточно корректны и продолжают уточняться. В одной из последних работ [24] сообщается о прямых измерениях показателей преломления  $n_e$  и  $n_o$  кристаллов GaSe с использованием призм, изготовленных после заливки в полимеризующийся компаунд. Методом наименьших отклонений определены значения  $n_e$  и  $n_o$  в поддиапазонах 0.7—1.4 и 2.4—5.0 мкм. Таким образом, отсутствие данных прямых измерений дисперсионных свойств исходных кристаллов  $\epsilon$ -GaSe и отсутствие объемных кристаллов  $\epsilon$ -GaS не позволили до настоящего времени получить адекватные сведения о дисперсионных свойствах НКТР  $\epsilon$ -GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> в ТГц-диапазоне, используя выражение (1).

С учетом того что НКТР GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> продемонстрировали высокие эксплуатационные характеристики в составе прикладных устройств среднего ИК диапазона [15—19] и в большей степени пригодны для механической обработки, чем кристаллы GaSe и GaS, целью данной работы является изготовление рабочих образцов и прямое определение дисперсионных свойств  $n_e(\lambda)$  и  $n_o(\lambda)$  НКТР  $\epsilon$ -GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>,  $x \leq 0.4$ , в ТГц-диапазоне спектра.

**Изготовление и характеристики кристаллов.** Основными исходными элементами для кристаллов GaSe, выращенных вертикальным методом Бриджмена, были особо чистые Ga (99.9999) и Se (99.9999). Сера (99.9) вводилась в пределах 0.1—10 мас. % ( $x \leq 0.412$ ) добавлением непосредственно в закладку селена. Температурный градиент фронта кристаллизации составил 10 град/см при скорости протяжки 6 мм/день. После ростовой обработки кристаллы не подвергались.

Характеризация выращенных кристаллов по методике [4] показала, что они имеют асимметричную структуру  $\epsilon$ -политипа и пригодны для нелинейно-оптических применений. Уровень коэффициента оптических потерь в окне максимальной прозрачности среднего ИК диапазона  $\alpha \leq 0.1—0.2 \text{ см}^{-1}$  соответствует современному состоянию технологии выращивания чистых [2] и легированных серой [4] кристаллов GaSe. Микротвердость поверхности (001) выращенных кристаллов измерена с помощью микротвердомера ПМТ-3. Установлено, что за счет введения серы твердость увеличивается с 8 кг/мм<sup>2</sup> при  $x = 0$  до ~20 кг/мм<sup>2</sup> при  $x = 0.4$ .

Оптическая ось в слоистых чистых и легированных кристаллах GaSe направлена ортогонально слоям роста. Увеличение твердости значительно упрощает механическую обработку, однако она все еще приводит к сколам кристаллов. Для их исключения перед изготовлением рабочих элементов из GaSe и GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> с оптической осью в плоскости входных поверхностей монокристаллические були заливались в легко удаляемый (при необходимости) силиконовый герметик, а затем покрывались слоем эпоксидной смолы высокой прочности. В другом варианте использован специально подобранный полимеризующийся компаунд с небольшим (доли процента) коэффициентом усадки при затвердевании. Лучшие результаты показала резка булей алмазным штрипсом толщиной 10 мкм под собственным весом и нитью с подсыпкой мелкодисперсного порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которым проводилась и полировка поверхностей среза (рис. 1, А). В отличие от алмазного порошка остатки порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> легко удаляются непродолжительным химическим травлением. Дополнительная доводка рабочих поверхностей нагретых до 300 °С кристаллов осуществлялась в вакуумированном контейнере с остаточным давлением  $3 \cdot 10^{-6}$  Торр при помощи лазерной абляции с использованием эксимерного КгF-лазера (частота повторения импульсов 3 Гц, энергия в импульсе 0.5 Дж при диаметре пучка на 10 %-ном уровне 4 см). С помощью атомно-силового микроскопа Solver HV установлено, что высота неоднородностей на отполированных поверхностях не превышает 15—20 нм. Это примерно на порядок больше, чем у поверхностей кристаллов, изготовленных методом отслоения.

**Эксперимент.** Для определения дисперсионных свойств исследуемых кристаллов собрана традиционная установка для импульсно-временной ТГц-спектроскопии, работающая на пропускание (рис. 1).

Суть работы ТГц-спектрометра заключается в следующем. В качестве основного источника излучения используется фемтосекундный титан-сапфировый лазер ( $\lambda_{\text{изл}} = 800 \text{ нм}$ , длительность

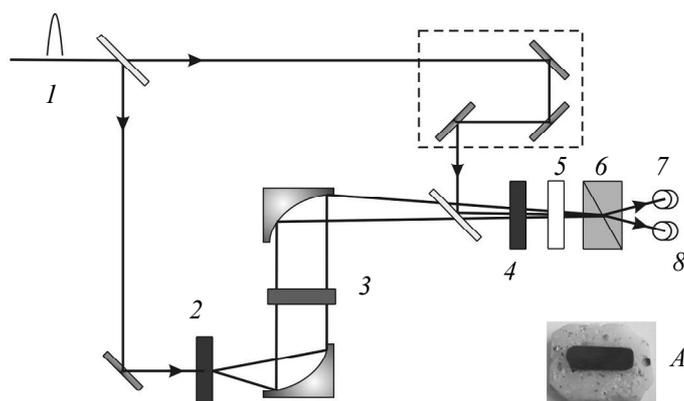


Рис. 1. Оптическая блок-схема спектрометра терагерцового диапазона: 1 — импульс фемтосекундного лазера (штриховыми линиями показана оптическая линия задержки), 2 — дипольная антенна на основе кристалла InP размерами  $10 \times 10 \times 1$  мм, 3 — исследуемый образец  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$ , 4 — электрооптический детектор из ZnTe (110) размерами  $10 \times 10 \times 2$  мм, 5 — четвертьволновая пластинка, 6 — призма Волластона, 7, 8 — Si-диоды; A — отполированный образец кристалла  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$

импульса 120 фс, частота повторения импульсов 1 кГц, энергия одиночного импульса 400 мкДж), выходной линейно поляризованный пучок которого разделен на две части. Первый пучок возбуждает дипольный источник ТГц-излучения на основе кристалла InP, а оптическая система из внеосевых параболических зеркал направляет выделенное ТГц-излучение на исследуемый кристалл и далее на электрооптический детектор из ZnTe. Кристалл InP является одновременно заградительным фильтром для остаточного излучения первого пучка. Второй пучок после пропускания через управляемую компьютером линию оптической задержки также подается на вход электрооптического детектора. После совмещения его в объеме электрооптического детектора с ТГц-излучением путем регулировки времени задержки и последующего взаимодействия второй пучок изменяет направление поляризации пропорционально амплитуде ТГц-излучения за счет электрооптического эффекта. Это происходит потому, что длина волны ТГц-излучения значительно превосходит длину волны излучения титан-сапфирового лазера и воспринимается им как статическое электрическое поле. На выходе установленной далее четвертьволновой пластинки этот пучок излучения на  $\lambda = 800$  нм становится эллиптически поляризованным. Две его ортогональные компоненты разделяются в призме Волластона и подаются на вход дифференциальной Si-диодной системы. Электрический сигнал с выхода дифференциальной системы, также пропорциональный амплитуде ТГц-излучения, подается на вход синхросилителя и далее в систему отображения.

В процессе измерений путем регулировки времени задержки оптической линии определены временная форма ТГц-импульсов и время прохождения  $\Delta t$  основного пика ТГц-импульса через измерительную трассу в отсутствие (опорный сигнал) и при установленном на измерительной трассе исследуемом образце кристалла. По измеренному времени прохождения в нем основного пика излучения с использованием выражения

$$n_g = 1 + (c\Delta t/d), \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света,  $d$  — толщина кристалла, вычислен групповой показатель преломления исследуемых кристаллов  $n_g$ .

В принципе, метод импульсно-временной ТГц-спектроскопии позволяет получать в одном эксперименте спектральную зависимость комплексного показателя преломления

$$\tilde{n} = n + ik, \quad (2)$$

где  $n$  — вещественный показатель преломления;  $k$  — коэффициент ослабления. Найдя методом обратного преобразования Фурье спектральное распределение амплитуд  $E_0(\omega)$  и  $E_T(\omega)$  опорного и прошедшего через объект ТГц-импульсов, можно определить спектральную зависимость коэффициента пропускания  $T$  и разность фаз  $\Delta$  между спектральными компонентами сигнального и опорного импульсов. Тогда

$$\frac{E_T(\omega)}{E_0(\omega)} = T \frac{e^{i\tilde{n}\omega d/c}}{e^{i\omega d/c}} = \frac{4\tilde{n}}{(\tilde{n}+1)^2} e^{i(\tilde{n}-1)\omega d/c}, \quad (3)$$

$$E_T(\omega)/E_0(\omega) = A e^{-i\Delta}, \quad (4)$$

где  $A$  — отношение амплитуд регистрируемых ТГц-импульсов. В случае малого поглощения ( $n \gg k$ ) из выражений (3) и (4) дисперсионные свойства в ТГц-диапазоне определяются как

$$n(\nu) \approx 1 + (c\Delta)/(\omega d) = 1 + (c\Delta/2\pi\nu d). \quad (5)$$

Пример дисперсионных зависимостей для чистых и легированных серой кристаллов GaSe в ТГц-диапазоне, рассчитанных по выражению (5) с учетом полученных результатов измерений, показан на рис. 2. Здесь же приведены результаты модельных расчетов с использованием известных дисперсионных уравнений [22, 25]. Спектральные зависимости диэлектрических свойств кристаллов GaSe и GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> получены в диапазоне частот 0.2—2.0 ТГц.

**Обсуждение результатов.** Из рис. 2 видно, что результаты измерения дисперсии  $n_o(\lambda)$  хорошо согласуются как с численными оценками, проведенными на основе дисперсионных уравнений [26], так и с ее средним значением 3.26, рассчитанным по формуле (1). Положение фоновой моды скольжения в области 0.59 ТГц также хорошо соответствует известным данным [10]. Имеется заметное различие измеренных значений  $n_o(\lambda)$  и результатов оценок по дисперсионным выражениям [23] при достаточно хорошем совпадении с расчетными данными [10]. Следует отметить, что в [10] результаты получены для легированных эрбием кристаллов GaSe с признаками деградации кристаллической решетки: имеются элементы трансформации спектра пропускания и уширение кривой качания. Скорее всего именно эти данные должны больше отличаться от полученных результатов. Однако на практике и те и другие выражения дают достаточно близкие значения при определении углов фазового синхронизма для процессов параметрического преобразования частоты в ТГц-диапазон спектра. Это можно объяснить уменьшением влияния вектора  $\mathbf{k}_1$  (с максимальной длиной волны) в сумме векторов  $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3$ , определяющих одно из условий фазового синхронизма — закон сохранения импульса (здесь  $\mathbf{k}_2$  и  $\mathbf{k}_3$  — волновые векторы волн с промежуточной и максимально короткой длиной волны). Поэтому заметное различие дисперсионных зависимостей в ТГц-диапазоне слабо влияет на результаты расчета условий фазового синхронизма и дает большую ошибку при обратном процессе — определении дисперсионных свойств по измеренным углам фазового синхронизма.

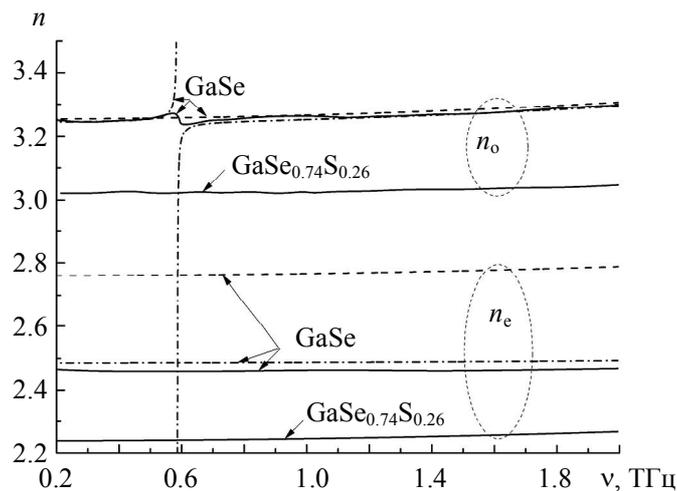


Рис. 2. Дисперсионные зависимости для обыкновенной  $n_o$  и необыкновенной  $n_e$  волн в кристаллах GaSe и GaSe<sub>0.74</sub>S<sub>0.26</sub>: сплошные линии — экспериментальные данные, штриховая и штрихпунктир — данные модельных расчетов с использованием известных дисперсионных уравнений из работ [22, 25]

На зависимости  $n_e(\lambda)$  пик поглощения фоновой моды скольжения для кристаллов GaSe не наблюдался так же, как и на обеих зависимостях  $n_o(\lambda)$  и  $n_e(\lambda)$  для НКТП  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$ . Последнее обстоятельство указывает на усиление межслоевых связей, которые увеличивают межслоевое взаимодействие и гасят фоновую моду скольжения, что способствует увеличению эффективности генерации ТГц-излучения е-поляризации. Из рис. 2 также видно, что с увеличением содержания серы двулучепреломление НКТП  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$  практически не изменяется и составляет  $\sim 0.77$ .

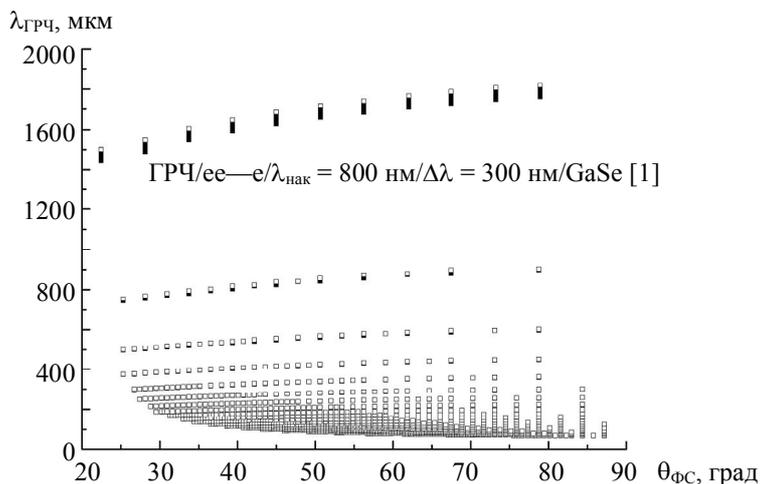


Рис. 3. Условия фазового синхронизма для генерации разностной частоты различных спектральных участков титан-сапфирового лазера в кристаллах GaSe

Модельные исследования показали, что неординарные дисперсионные свойства всех исследованных кристаллов позволяют реализовать нетрадиционный е-е-тип трехволнового взаимодействия для коротковолновых источников накачки (рис. 3). В расчетах зависимостей длины волны излучения на разностной частоте  $\lambda_{\text{ГРЧ}}$  от угла фазового синхронизма  $\theta_{\text{ФС}}$  (рис. 3) принято, что длина волны титан-сапфирового лазера 800 нм, спектральная ширина полосы излучения 30 нм, спектр излучения разбит на 200 участков, принятых за спектральную ширину независимых источников излучения, генерация разностных частот которых осуществляется в кристаллах GaSe. Проанализированы все возможные варианты генерации разностных частот; их общее число равно числу сочетаний из 200 по 2. Из рис. 3 видно, что в данном случае е-е-тип смешения частот позволяет перекрыть широкие спектральные участки 80—900 и 1410—1800 мкм. Установлено также, что введение серы, как и более тяжелых элементов — индия и теллура, обогащает фоновый спектр поглощения, но в отличие от последних сдвигает их в коротковолновую сторону. Во всех случаях коэффициент поглощения для необыкновенной волны существенно (в 10 раз и более) превосходит коэффициент поглощения обыкновенной волны. Различие увеличивается с уменьшением длины волны.

**Заключение.** Закрепление образцов нелинейных кристаллов твердых растворов  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$  в обойме из полимеризующихся компаундов и последующая механическая обработка по созданной технологии позволили изготовить образцы кристаллов твердых растворов с оптической осью, находящейся в плоскости входных поверхностей. С помощью импульсной терагерцовой спектроскопии (по нашим данным, впервые) исследованы дисперсионные свойства нелинейно-оптических кристаллов GaSe и  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$  для обыкновенной и необыкновенной волн в диапазоне частот 0.2—2.0 ТГц. Хорошее соответствие результатов численного моделирования с использованием известных выражений для дисперсионных свойств чистых кристаллов GaSe и экспериментальных данных подтверждает адекватность полученных результатов и для кристаллов  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$ , входные отполированные поверхности которых характеризуются более высоким оптическим качеством благодаря большей твердости. Полученные данные могут быть использованы при разработке дисперсионных уравнений для кристаллов  $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$ . Впервые установлено,

что в чистых кристаллах GaSe и нелинейных кристаллах твердых растворов GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> возможна реализация нетрадиционного е-е-типа взаимодействия.

Авторы выражают благодарность за частичную финансовую поддержку Президиуму НАН Беларуси и Сибирскому отделению РАН в рамках совместного проекта фундаментальных исследований НАН Беларуси и СО РАН № 10 от 2010 г., Российскому фонду фундаментальных исследований в рамках проекта №10-02-01452-а, Федеральной целевой программе “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” в рамках ГК № 02.740.11.0444, ИИП-4297.2010.2, Jilin Provincial Science and Technology Department, Grant 2008070.

- [1] V.G.Dmitriev, G.G.Gurzadyan, D.N.Nikogosyan. Handbook for Nonlinear Optical Crystals, Berlin, Springer (1999)
- [2] Y.-S.Lee. Principle of Terahertz Science and Technology, New York, Springer (2008)
- [3] A.A.Tikhomirov, Yu.M.Andreev, G.V.Lanskii, O.V.Voevodina, S.Yu.Sarkisov. Proc. SPIE, **6258** (2006) 64—72
- [4] H.-Z.Zhang, Z.-H.Kang, Yu.Jiang, J.-Yu.Gao, F.-G.Wu, Z.-S.Feng, Yu.M.Andreev, G.V.Lanskii, A.N.Morozov, E.I.Sachkova, S.Yu.Sarkisov. Opt. Express, **16**, N 13 (2008) 9951—9957
- [5] D.R.Suhre, N.B.Singh, V.Balakrishna, N.C.Fernelius, F.K.Hopkins. Opt. Lett., **22**, N 11 (1997) 775—777
- [6] N.B.Singh, D.R.Suhre, W.Rosch, R.Meyer, M.Marable, N.C.Fernelius, F.K.Hopkins, D.E.Zelmon, R.Narayanan. J. Cryst. Growth, **198** (1999) 588—592
- [7] Z.-S.Feng, Z.-H.Kang, F.-G.Wu, J.-Yu.Gao, Yu.Jiang, H.-Z.Zhang, Yu.M.Andreev, G.V.Lanskii, V.V.Atuchin, T.A.Gavrilova. Opt. Express, **16**, N 13 (2008) 9978—9985
- [8] K.C.Mandal, S.H.Kang, M.Choi, J.Chen, Xi-Ch.Zhang, J.M.Schleicher, C.A.Schmuttenmaer, N.C.Fernelius. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **14**, N 2 (2008) 284—288
- [9] Yu.M.Andreev, G.V.Lanskii, S.N.Orlov, Yu.N.Polivanov. Abstr. 17<sup>th</sup> Int. Conf. Advanced Laser Technologies, 26 September—1 October 2009, Kosaeli, Turkey (2009) 55
- [10] Y.-K.Hsu, C.-W.Chen, J.Y.Huang, C.-L.Pan, J.-Y.Zhang, C.-S.Chang. Opt. Express, **14**, N 12 (2006) 5484—5491
- [11] O.Yu.Khyzhun, Yu.M.Andreev, V.V.Atuchin, N.F.Beizel, L.D.Pokrovsky. Abstr. XI Int. Conf. Crystal Growth of Intermetallic Compounds, Lvov, Ukraine, 30 May—2 June 2010, ICDD, Lvov (2010) 103
- [12] Yu.M.Andreev, V.V.Atuchin, G.V.Lanskii, A.N.Morozov, L.D.Pokrovsky, S.Yu.Sarkisov, O.V.Voevodina. Mater. Sci. Eng. B, **128** (2006) 205—210
- [13] S.Das, C.Ghosh, O.Voevodina, Yu.M.Andreev, S.Yu.Sarkisov. Appl. Phys. B, **81**, N 8 (2006) 43—46
- [14] Т.-Дж.Ванг, Дж.-Ю.Гао, Ю.М.Андреев, В.В.Атучин, Т.Н.Копылова, Г.В.Ланский, Т.Д.Малиновская, Л.Д.Покровский, С.Ю.Саркисов. Изв. вузов. Физика, № 6 (2007) 35—40
- [15] Y.Qu, Z.-H.Kang, T.-J.Wang, Y.Jiang, J.-Y.Gao, Yu.M.Andreev. Laser Phys. Lett., **4**, N 3 (2007) 238—241
- [16] И.Чу, Ж.-Х.Кан, Т.-Дж.Ванг, Ю.М.Андреев, Г.В.Ланский, А.Н.Морозов, С.Ю.Саркисов. Опт. атм. и океана, **21**, № 2 (2008) 170—175
- [17] Ш.-А.Ку, Ч.-В.Лье, С.-Л.Лью, К.-С.Бу, Д.-И.Джуанг, А.И.Потекаев, О.П.Толбанов, С.Ю.Саркисов, Ю.М.Андреев, Г.В.Ланский. Изв. вузов. Физика, **51**, № 10 (2008) 80—85
- [18] Г.В.Майер, Т.Н.Копылова, Ю.М.Андреев, В.А.Светличный, Е.Н.Тельминов. Изв. вузов. Физика, № 6 (2009) 83—88
- [19] Ю.М.Андреев, М.Н.Балдин, В.М.Грузнов, В.А.Капитанов, А.Л.Макась, Ю.Н.Пономарев, Е.Л.Счастливец, О.В.Тайлаков, А.А.Тихомиров, М.Л.Трошков. Опт. атм. и океана, **22**, № 1 (2009) 74—81
- [20] M.S.Webb, D.Eimerl, S.P.Velsko. J. Opt. Soc. Am. B, **9**, N 7 (1992) 1118—1127
- [21] N.C.Fernelius. Prog. Cryst. Growth and Charact., **28** (1994) 275—353
- [22] K.L.Vodopyanov, L.A.Kulevskii. Opt. Commun., **118** (1995) 375—378
- [23] К.Р.Аллахвердиев, Р.И.Гулиев, Э.Ю.Салаев, В.В.Смирнов. Квант. электрон., **9**, № 7 (1982) 1483—1485
- [24] K.R.Allakhverdiev, T.Baykara, A.Kulibekov Gulubayov, A.A.Kaya, J.Goldstein, N.Fernelius, S.Hanna, Z.Salaeva. J. Appl. Phys., **98** (2005) 093515-1-6
- [25] C.-W.Chen, T.-T.Tang, S.-H.Lin, J.Y.Huang, C.-S.Chang, P.-K.Chung, S.-T.Yen, C.-L.Pan. J. Opt. Soc. Am. B, **26**, N 9 (2009) A58—A65
- [26] W.Shi, Y.J.Ding. Appl. Phys. Lett., **84**, N 10 (2004) 1635—1637