

УДК 621.378.325

Д. ГУО, Д.-Д. СИБ*, Л.-М. ЖАНГ*, А.В. ШАЙДУКО**,******МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФАЗОВОГО СИНХРОНИЗМА
ДЛЯ ТГц-ГЕНЕРАТОРОВ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ВОЛН НА КРИСТАЛЛАХ GaSe¹**

Впервые проведен сравнительный модельный анализ условий фазового синхронизма для генераторов прямых и обратных волн терагерцового диапазона в чистых и глубоко легированных серой (GaSe_{1-x}S_x) кристаллах GaSe. Показано сохранение возможностей фазосогласования, вплоть до предельно возможного содержания серы $x = 0,5$. Установлено, что легирование позволяет частично перекрыть диапазон генерации, недоступный генераторам на основе кристаллов GaSe. Определен коэффициент качества легированных серой кристаллов.

Ключевые слова: *нелинейная оптика, фазовый синхронизм, ТГц, GaSe_{1-x}S_x, генератор обратных волн.*

Введение

Исследованию генерации обратных волн методами параметрического преобразования частоты (ППЧ) в нелинейных кристаллах (НК) вообще и в НК GaSe в частности [1–3] посвящено немало работ. Согласно [4], для параметрической генерации обратных волн (ПГОВ) требуется огромное двулучепреломление и интенсивность накачки, отсутствие фундаментальных полос поглощения между генерируемыми длинами волн сигнальной и холостой полос излучения. С другой стороны, ПГОВ, в принципе, может быть реализована без использования обратной связи (резонаторов) и просветляющих покрытий, целесообразность использования которых исключается противоположным направлением распространения холостой волны по отношению к пучку накачки. При этом из-за большого двулучепреломления и соответствующего ему большого угла сноса достижение приемлемого усиления требует использования длинных импульсов накачки. Перечисленные жесткие условия генерации приводят к узкой ширине линии излучения реальной ПГОВ по отношению к параметрической генерации прямых волн (ПГПВ). Имеющаяся возможность создания безрезонаторных параметрических генераторов с узкой шириной линии излучения обуславливает повышенный интерес к получению ПГОВ.

Наиболее благоприятной ситуации при реализации ПГОВ следует ожидать при генерации холостой волны терагерцового (ТГц) диапазона. В этом случае незначительная длина волнового вектора (в пределе – близость частоты холостой волны к нулевому значению) позволяет радикально снизить и сделать выполнимыми требования к востребованному значению двулучепреломления. Это следует из закона сохранения энергии (одного из условий фазового синхронизма (ФС), обеспечивающего высокую эффективность ППЧ) $h\nu_p = h\nu_s + h\nu_i$, где h – постоянная Планка, ν_p , ν_s и ν_i – соответственно частоты излучения накачки, сигнальной и холостой волн. Если длины волн излучения накачки и сигнальной волны близки, то требуемые значения показателей преломления для ФС будут также близкими по величине, т.е. необходимое значение двулучепреломления для выполнения условий ФС оказывается невысоким. При накачке ПГОВ предпочтительным является использование длинноволновых (≥ 5 мкм) источников, что, в силу меньшего различия энергии квантов накачки и холостой волны, обеспечивает большую потенциальную эффективность ППЧ по энергетическим характеристикам. В наибольшей степени, из числа известных НК, требованиям к спектру пропускания и величине двулучепреломления для ПГОВ удовлетворяют НКGaSe, характеризующиеся диапазоном прозрачности 0,62–20 и ≥ 50 мкм и $B = 0,35$ в среднем ИК-, 0,79 в ТГц-диапазонах спектра [5]. В качестве источника накачки ПГОВ наибольший интерес представляет использование хорошо отработанных в техническом плане CO₂-лазеров ($\lambda = 9,2$ –10,8 мкм). Интересным представляется также анализ характеристик генерации ТГц-излучения методом генерации разностных частот (ГРЧ) излучения широко распространенных твердотельных лазерных систем на основе Nd:YAG-лазеров ($\lambda = 1,064$ мкм).

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Проектом VIII.80.2.4 и МИП № 46 СО РАН, грантами РФФИ №.12-08-00482-а, 12-02-33174 и 13-02-00667.

Основной недостаток чистых слоистых НК GaSe – чрезвычайно низкие механические свойства (почти нулевая твердость по шкале Мооса и легкость расслоения) – сдерживает их применение в устройствах прикладной спектроскопии, но в значительной степени устраняется легированием изовалентными примесями. Наилучший результат дает легирование серой, позволяющее эффективно управлять спектром пропускания и условиями ФС, а также значительно (до 5-кратного значения при оптимальном уровне легирования) увеличивающее порог лучевой стойкости [6–8]. Исследование возможностей реализации и потенциальных характеристик генераторов прямых и обратных волн на основе легированных кристаллов GaSe не проводилось.

В работе исследовались сравнительные модельные возможности выполнения условий ФС для создания ПГОВ и ПГПВ на основе НК GaSe и GaSe_{1-x}S_x с накачкой CO₂-лазером, а также ГРЧ-излучения Nd:YAG-лазера и излучения с рамановским сдвигом на длину волны 1,180 мкм [9], коэффициента качества кристаллов как критерия потенциальной эффективности ППЧ.

Базовые аналитические выражения и алгоритмы расчетов

Условия ФС в НК GaSe рассчитаны с использованием адекватных дисперсионных уравнений из числа известных [10,11] для волн обыкновенной (о) и необыкновенной (е) поляризации:

$$\begin{aligned} n_o(\lambda) &= \sqrt{7,443 + \frac{0,050}{\lambda^2} + \frac{0,0186}{\lambda^4} + \frac{0,0061}{\lambda^6} + \frac{3,1485 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 2194}}, \\ n_e(\lambda) &= \sqrt{5,760 + \frac{0,3879}{\lambda^2} - \frac{0,2288}{\lambda^4} + \frac{0,1223}{\lambda^6} + \frac{1,8550 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 1780}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Эти уравнения пригодны для применения и в ТГц-диапазоне спектра [7]. Оценки углов ФС в НК GaSe_{1-x}S_x рассчитаны по уравнениям (1) и данным прямых измерений дисперсионных свойств НК GaSe_{0,6}S_{0,4} [12], аппроксимированных в виде дисперсионных уравнений

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 9,550489 + 0,303723/(\lambda^2 - 0,054331) + 3738,138/(\lambda^2 - 1408,38), \\ n_e^2 &= 97,335355 + 0,247335/(\lambda^2 - 0,037580) + 2580,856/(\lambda^2 - 1268,56). \end{aligned} \quad (2)$$

Дисперсионные свойства для НК промежуточных составов определялись по предложенному алгоритму [13]. Условия ФС для генерации прямых и обратных волн ТГц-излучения и волн на разностной частоте рассчитывались по стандартным выражениям, имеющим для преобразований по I (е-оо) типу трехволновых взаимодействий соответственно следующий вид:

$$\frac{n_e(\lambda_p, \theta)}{\lambda_p} = \frac{n_o(\lambda_s)}{\lambda_s} \pm \frac{n_o(\lambda_i)}{\lambda_i}, \quad (\text{ППЧ}); \quad (3)$$

$$\frac{n_o(\lambda_p)}{\lambda_p} - \frac{n_o(\lambda_s)}{\lambda_s} = \pm \frac{n_e(\lambda_i, \theta)}{\lambda_i}, \quad (\text{ГРЧ}); \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad n_e(\lambda, \theta) = \frac{n_o(\lambda) n_e(\lambda)}{\sqrt{n_e^2(\lambda) \cos^2(\theta) + n_o^2(\lambda) \sin^2(\theta)}}, \quad (5)$$

где $\lambda_{p,s,i}$ – соответственно длины волн накачки, сигнальной и холостой волн. Для сравнительной оценки потенциальной эффективности ППЧ рассчитывался эффективный коэффициент качества НК $M_{\text{eff}} = d_{\text{eff}}^2 / (n_p \cdot n_s \cdot n_i)$, где n_p, n_s, n_i – значения показателей преломления на соответствующих длинах волн. Значение коэффициента эффективной нелинейной восприимчивости второго порядка d_{eff} для е→о+о, е→о+е, е→е+е и о→о+о типов взаимодействия определялось соответственно по выражениям $d_{\text{eff}} = -d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi$, $d_{\text{eff}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\varphi$, $d_{\text{eff}} = d_{22} \cos^3 \theta \sin 3\varphi$, $d_{\text{eff}} = -d_{22} \cos 3\varphi$. Значение d_{22} кристаллов GaSe для ТГц-диапазона принято равным 24,3 пм/В [14]. Уменьшение значения d_{22} с легированием серой определено по предложенной авторами методике в [15]. В частности, $d_{22}(\text{GaSe}_{0,6}\text{S}_{0,4})$ определено равным $0,8d_{22}(\text{GaSe})$ или 19,44 для ТГц-диапазона спектра.

Результаты расчетов

Двулучепреломление в ТГц-диапазоне очень высокое (до 0,79 у НК GaSe), что дает широкие возможности реализации условий ФС как для ПГОВ, так и ПГПВ. Заметим, что установленное в расчетах существенное падение двулучепреломления с ростом уровня легирования позволяет управлять углом ФС на стадии технологических процессов выращивания НК и таким образом оптимизировать условия генерации. На рис. 1 и 2 приведены примеры рассчитанных зависимостей условий ФС и значений коэффициента качества для рассматриваемых ПГПВ, ПГОВ и ГРЧ.

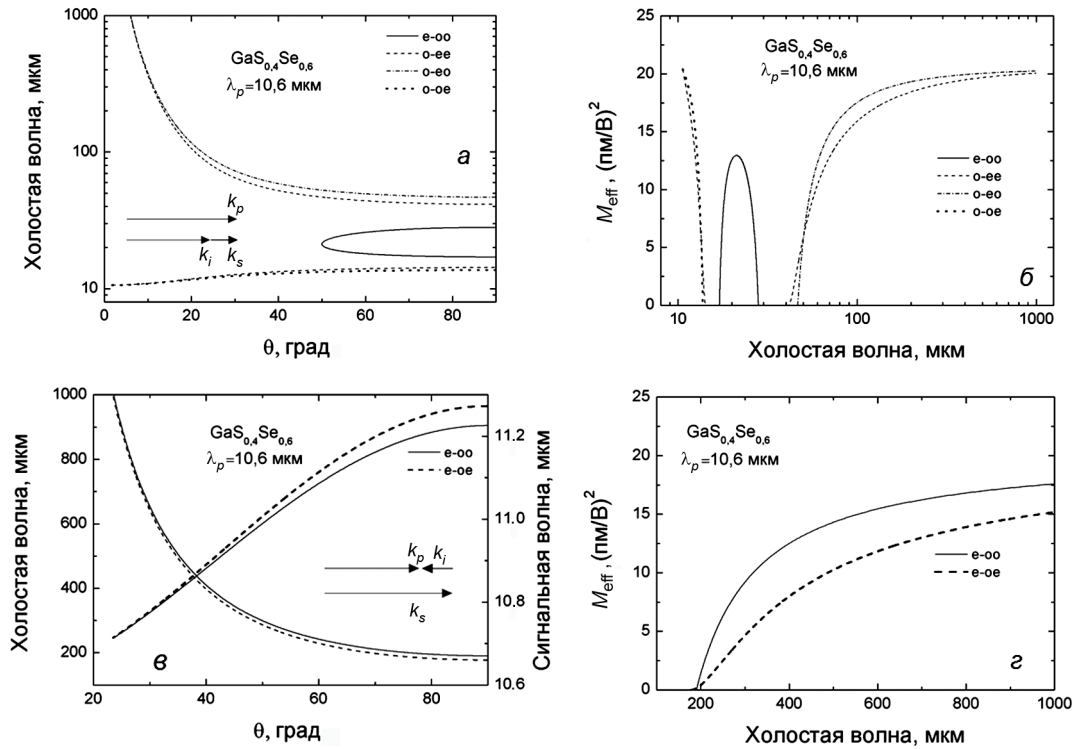


Рис. 1. Условия ФС (а, в) и коэффициент качества (б, з) для ПГПВ (а, б) и ПГОВ (в, з). На вставках идентифицированы рассматриваемые НК, типы трехволновых взаимодействий и показаны векторные схемы рассматриваемых процессов генерации: k_p , k_s и k_i – волновые векторы накачки, сигнальной и холостой волн соответственно

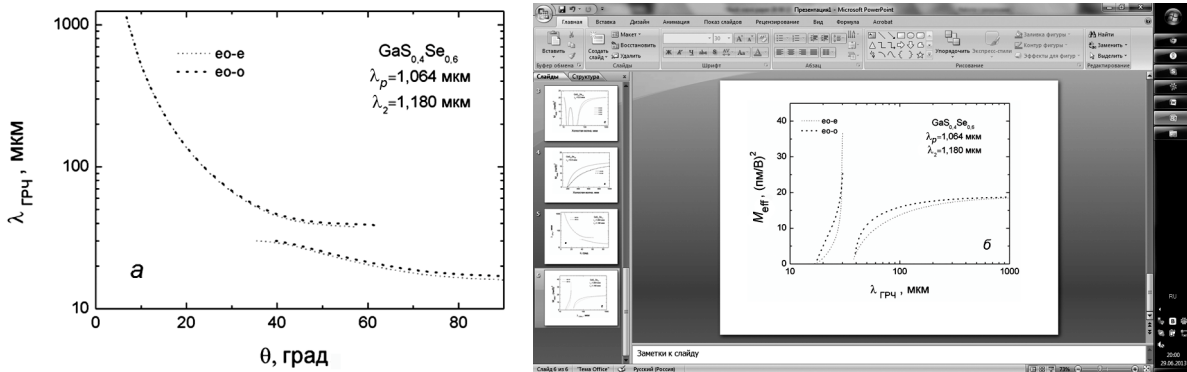


Рис. 2. Условия ФС (а) и коэффициент качества (б) для обратного режима генерации разностной частоты. На вставках идентифицированы рассматриваемые НК и типы трехволновых взаимодействий

На рис. 1, а видно, что с уменьшением двулучепреломления в кристаллах GaSe при легировании серой возможность реализации параметрической генерации не исчезает вплоть до уровней легирования близких к предельному значению $x = 0,5$. Аналогичный результат получен и для ГРЧ. Диапазон параметрической генерации на основе НК $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$ сдвигается с легированием в коротковолновую область, позволяя частично перекрыть провал в спектре параметрических генераторов

на основе HGaSe . Коэффициент качества кристаллов при этом изменяется незначительно: уменьшение нелинейного коэффициента частично компенсируется уменьшением значений показателей преломления. Это дает основание предположить, что эффективность реальных параметрических генераторов обратных волн может быть выше из-за отсутствия необходимости использования диэлектрических зеркал и просветляющих покрытий, вносящих дополнительные оптические потери.

Заключение

Впервые проведен сравнительный модельный анализ условий фазового синхронизма для генерации прямых и обратных волн терагерцового диапазона в легированных серой нелинейных кристаллах GaSe . Продемонстрирована возможность реализации параметрических генераторов света и генераторов разностных частот прямых и обратных волн вплоть до предельно возможного содержания серы $x = 0,5$ в кристаллах $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$. Показано, что легирование позволяет частично перекрыть диапазон генерации, недоступный генераторам на основе чистых кристаллов GaSe . Определены спектральные зависимости коэффициента качества кристаллов, легированных серой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ding Yu.J. and Khurgin J.B. // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1998. – V. 15. – No. 5. – P. 1567–1571.
2. Shi W. and Ding Yu.J. // *QELS.* – 2005. – P. QTuF7.
3. Shi Wei and Ding Yujie J. // *Opt. Lett.* – 2005. – V. 30. – No. 14. – P. 1861–1863.
4. Harris S.E. // *Appl. Phys. Lett.* – 1966. – V. 9. – No. 3. – P. 114–116.
5. Жанг Л.-М., Гуо Д., Ли Д.-Д. и др. // *Журн. прикл. спектр.* – 2010. – Т. 77. – № 6. – С. 916–922.
6. Zhang H.-Z., Kang Z.-H., Jiang Yu., et al. // *Opt. Express.* – 2008. – V. 16. – No. 13. – P. 9951–9957.
7. Xie Ji-Jiang, Guo Jin, Zhang Lai-Ming, et al. // *Basic Problems of Material Science (BPMS).* – 2012. – V. 9. – No. 4. – P. 486–494.
8. Guo Jin, Xie Jijiang, Zhang Laiming, et al. // *Proc. SPIE.* – 2013. – V. 8796. – P. 87962D-1.
9. Bai F., Wang Q., Liu Z., et al. // *Opt. Lett.* – 2011. – V. 36. – No. 6. – P. 813–815.
10. Андреев Ю.М., Вайтулевич Е.А., Зуев В.В. и др. // *Изв. вузов. Физика.* – 2011. – Т. 54. – № 9/2. – С. 124–131.
11. Vodopyanov K.L. and Kulevskii L.A. // *Opt. Commun.* – 1995. – V. 118. – P. 375–378.
12. Petrov V., Panyutin V.L., Tyazhev A., et al. // *Laser Phys.* – 2011. – DOI: 10.1134/S1054660X11070255.
13. Ку Ш.-А., Лье Ч.-В., Лью С.-Л. и др. // *Изв. вузов. Физика.* – 2008. – Т. 51. – № 10. – С. 80–85.
14. Tochitsky S.Ya., Sung Ch., Trubnick S.E., et al. // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2007. – V. 24. – No. 9. – P. 2509–2516.
15. Feng Z.-S., Guo J., Kang Z.-H., et al. // *Appl. Phys. B.* – 2010. – V. 108. – No. 3. – P. 545–552.

*Чангчунский институт оптики, точной механики и физики Китайской АН,
г. Чанчунь, КНР

Поступила в редакцию 09.10.13.

**Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
г. Томск, Россия

***Сибирский физико-технический институт Национального исследовательского
Томского государственного университета, г. Томск, Россия
E-mail: An1579@yandex.ru

Дзин Гуо, доктор, зав. лабораторией;
Дзи-Дзянь Сие, доктор, профессор, руководитель группы;
Лай-Минг Жанг, доктор, доцент;
Шайдуко Анна Валерьевна, к.ф.-м.н., науч. сотр.