

УДК 537.862:535.14:535.15

## ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНОГО ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ В $ZnGeP_2$ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ НАКАЧКЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА<sup>#</sup>

© 2020 г. Д. М. Лубенко<sup>1, \*</sup>, В. Ф. Лосев<sup>1</sup>, Д. М. Ежов<sup>2</sup>, Ю. М. Андреев<sup>3</sup>,  
Г. В. Ланский<sup>3</sup>, А. А. Лисенко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники  
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский Томский государственный университет”, Томск, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических  
и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева  
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

\*E-mail: lubenkodm@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Исследуется возможность генерации мощного терагерцового излучения в нелинейном кристалле германо-фосфида цинка ( $ZnGeP_2$ ) с накачкой в пределах коротковолнового плеча поглощения 0.67–2.5 мкм. Мощные фемтосекундные титан-сапфировые лазерные системы, работающие на длинах волн 800 и 950 нм, рассмотрены в качестве источника накачки. Получена пиковая мощность терагерцового излучения ~1 кВт.

DOI: 10.31857/S0367676520070157

### ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовое (ТГц) излучение, благодаря большой длине волн, а значит низкой энергии квантов, имеет уникальный потенциал для создания безопасных систем мониторинга окружающей среды, контроля качества различных материалов, изделий из них, продуктов питания и фармацевтической продукции, для медицинских приложений и биологических исследований, а также для систем получения изображений [1–3]. С другой стороны, наиболее перспективные для практического использования источники узкополосного перестраиваемого по частоте ТГц излучения, созданные методами нелинейной кристаллооптики на основе часто используемых нелинейных кристаллов, имеют недостаточно высокие энергетические и эксплуатационные характеристики. К таковым относятся, например, источники на основе кристаллов GaSe [4] и сложных в эксплуатации (из-за потребности в криогенном охлаждении и использования сложных узлов перестройки частоты) кристаллов  $LiNbO_3$  [5], имеющих невысокие экс-

плуатационные характеристики [6]. Это существенно ограничивает область их применения.

Положительный нелинейный кристалл  $ZnGeP_2$  (ZGP) точечной группы симметрии  $\bar{4}2m$  имеет диапазон пропускания по нулевому уровню 0.74–12 мкм, высокие нелинейные, механические и термические свойства, а также самый высокий среди полупроводниковых нелинейных кристаллов порог лучевой стойкости [6]. Благодаря наличию уникальных свойств, этот кристалл широко используется для генерации мощного импульсно-периодического излучения среднего ИК-диапазона наносекундной длительности при комнатной температуре [7], а также высокоэнергетических наносекундных импульсов ТГц диапазона при накачке излучением редко используемых в мобильных системах лазеров диапазона 2.5–10.7 мкм [8]. Использование в качестве источников накачки излучения наиболее привлекательных по выходным и эксплуатационным характеристикам твердотельных лазеров диапазона 0.67–2.5 мкм сдерживается наличием интенсивного “плеча” поглощения с коэффициентом потерь от 0.6 до 5 см<sup>-1</sup> и более. В работе [9] отмечено, что абсолютная величина показателя преломления в районе 1 мкм не изменяется при отжиге, а изменение коэффи-

<sup>#</sup> Данная статья была представлена для опубликования в тематическом выпуске “Люминесценция и лазерная физика” (см. № 7, том 84, 2020).

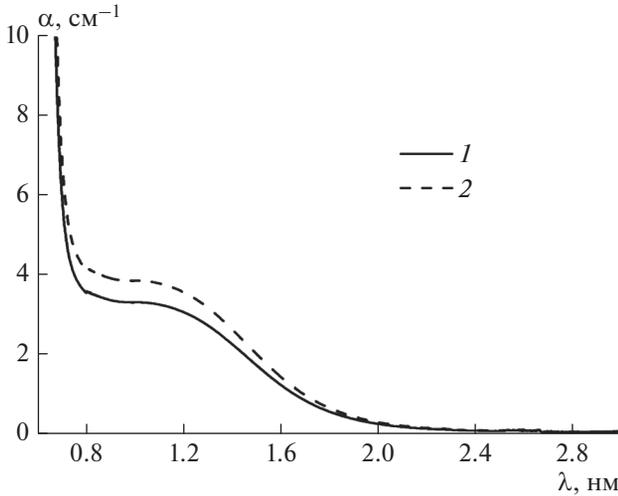


Рис. 1. Коэффициент поглощения кристалла ZGP в поляризованном свете в области основного окна прозрачности (1 –  $\alpha_o$ , 2 –  $\alpha_e$ ).

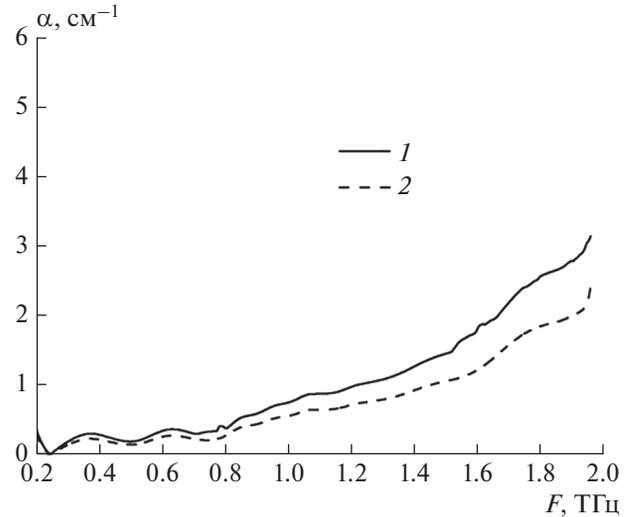


Рис. 2. Коэффициент поглощения кристалла ZGP в ТГц диапазоне (1 –  $\alpha_o$ , 2 –  $\alpha_e$ ).

коэффициента поглощения определяется лишь уменьшением количества примесей. Эти факты определили слабый интерес к созданию источников ТГц излучения на основе распространенных кристаллов ZGP при накачке лазерами с коротковолновым излучением. В последнее время появился ряд статей, посвященных изучению возможности генерации ТГц излучения при накачке кристаллов ZGP излучением фемтосекундных лазеров, в том числе и в пределах коротковолнового плеча поглощения [10–12].

В данной работе приводятся результаты исследований, направленные на создание мощного источника ТГц излучения на основе кристалла ZGP при его накачке излучением фемтосекундных Ti:Sapphire лазерных комплексов, работающих на длинах волн 800 и 950 нм.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА ZGP

Оптические свойства кристалла ZGP на границах основного окна пропускания существенно разнятся от кристалла к кристаллу. Причиной такого положения дел оказался высокий интерес к использованию лазеров накачки ближнего ИК диапазона и CO<sub>2</sub>-лазеров, излучение которых лежит в спектральной области высоких коэффициентов фононного поглощения, что приводило к разогреву кристаллов и изменению коэффициентов поглощения в процессе измерений в длинноволновой области и влиянию технологии роста и отжига кристаллов в коротковолновой. Различия в выходной мощности используемых в исследованиях лазеров приводило к существенному различию результатов от измерения к измерению. Использование маломощных лазеров позволило

получить корректные данные о спектрах поглощения и дисперсионных свойствах для кристаллов, находящихся при комнатной температуре [13]:

$$n_o^2 = 4.47330 + \frac{5.2657\lambda^2}{\lambda^2 - 0.13381} + \frac{1.49058\lambda^2}{\lambda^2 - 662.55}, \quad (1)$$

$$n_e^2 = 4.63318 + \frac{5.34215\lambda^2}{\lambda^2 - 0.14255} + \frac{1.45795\lambda^2}{\lambda^2 - 662.55}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны в мкм. Адекватность данных выражений показана в работе [14].

Наши измерения оптического качества кристалла ZGP в диапазоне коротковолнового плеча поглощения 0.7–3 мкм проведены с помощью спектрофотометра Agilent Cary 5000 (Agilent Technologies, США) (спектральный диапазон 175–3300 нм). Результат измерений представлен на рис. 1. Для измерений использовали кристалл размерами 12 × 12 мм и толщиной 1.9 мм.

Дисперсионные и оптические свойства кристалла ZGP, используемого в эксперименте измерений при комнатной температуре с помощью ТГц спектрометра с временным разрешением Zomega Z-3 (Zomega, США), (спектральный диапазон 0.2–3.5 ТГц), результаты приведены на рис. 2 и 3. Полученные результаты хорошо совпадают с данными авторов [15]. Установлено, что дисперсионные свойства, аппроксимированные в виде уравнения Сельмейера и описанные в [16], не в полной мере коррелируют с экспериментальными результатами. Более корректным следует считать следующий вид уравнений:

$$n_o^2 = 10.897 + \frac{0.60675\lambda^2}{\lambda^2 - 2570}, \quad (3)$$

$$n_e^2 = 11.043 + \frac{0.60675\lambda^2}{\lambda^2 - 2230}. \quad (4)$$

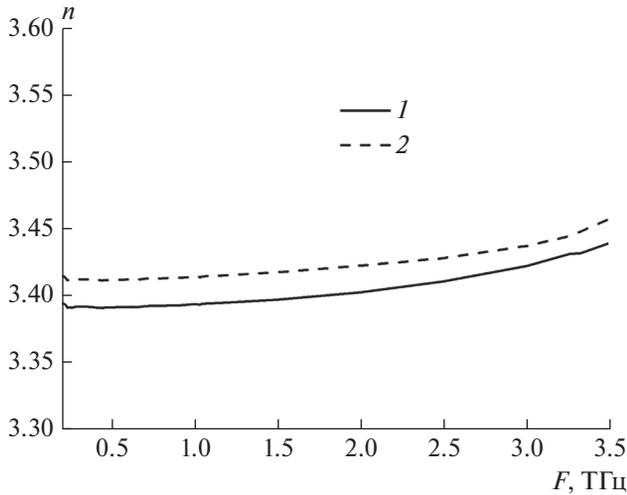


Рис. 3. Дисперсионные свойства кристалла ZGP при комнатной температуре (1 –  $n_o$ , 2 –  $n_e$ ).

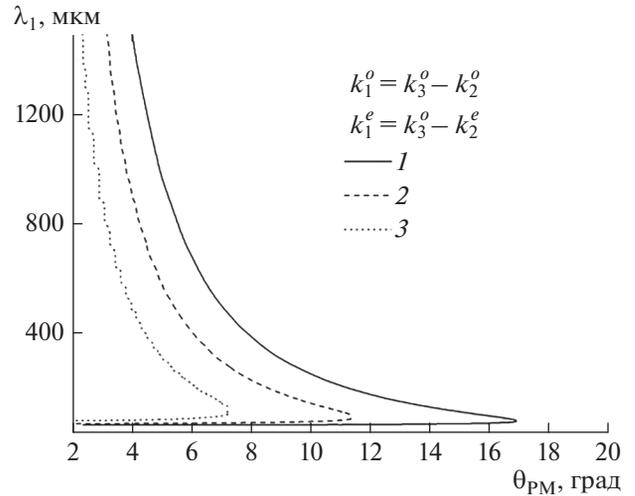


Рис. 4. Расчет углов фазового синхронизма при накачке лазерами с длинами волн 800 (1), 950 (2), 1064 нм (3).

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

С использованием дисперсионных уравнений (1)–(4) были определены углы фазового синхронизма для накачки в диапазонах 0.78–0.82, 0.93–0.97, а также 1.064–1.044 мкм. Последний расчет показал полное соответствие с экспериментальными данными, полученными в [9], что дополнительно подтверждает правильность проведенных расчетов. Всего возможны только два типа взаимодействия:  $oe \rightarrow e$  и  $oe \rightarrow o$ . Результаты расчета представлены на рис. 4.

Эффективность генерации ТГц излучения в нелинейных кристаллах определяется из выражения [17]:

$$P_{\omega_3} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \frac{4\pi^2 (2d_{eff})^2 L^2 (P_{\omega_1} P_{\omega_2})}{n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 (\pi r^2)} \times (T_1 T_2 T_3 \exp^{-\alpha_3 L}) \times \frac{1 + \exp^{-\Delta\alpha L} - 2 \exp^{-\frac{1}{2}\Delta\alpha L} \cos(\Delta k L)}{(\Delta k L)^2 + \left(\frac{1}{2}\Delta\alpha L\right)^2}, \tag{5}$$

где  $\mu_0, \epsilon_0$  – магнитная и диэлектрическая восприимчивость вакуума, соответственно;  $\omega_3$  – частота выходного ТГц излучения;  $d_{eff}$  – эффективный нелинейный коэффициент;  $L$  – толщина кристалла;  $P_{\omega_1}, P_{\omega_2}, P_{\omega_3}$  – пиковая мощность излучения взаимодействующих волн;  $\pi r^2$  – площадь перекрытия двух пучков накачки;  $n_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – показатели преломления для взаимодействующих длин волн;  $T_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – коэффициент пропускания, определяемый выражением  $T_i = 4n_i/(n_i + 1)^2$ ;  $\Delta\alpha = |\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3|$  – дифференциальный коэффи-

циент поглощения для взаимодействующих длин волн,  $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1$  – фазовая расстройка, где  $k$  – соответствующее волновое число.

Если учесть высокую лучевую стойкость ZGP, то основным фактором, ограничивающим эффективность генерации ТГц излучения, является уровень оптических потерь на длинах волн излучений накачки. Выходом из положения является использование короткоимпульсного излучения накачки, для которого резко увеличивается и предельная интенсивность накачки. В связи с этим для проведения экспериментов были выбраны Ti:Sapphire лазерные установки (Avesta, Россия), работающие на длинах волн 800 и 950 нм, с энергией в импульсе 12 мДж, длительностью импульса 50 фс и частотой повторения импульсов 10 Гц. Ширина спектра на полувысоте амплитуды у обеих установок составляла 25–30 нм, что позволяло получить генерацию разностной частоты, лежащей в ТГц диапазоне. Излучение лазера дополнительно фокусировалось на поверхность кристалла для достижения плотности мощности 1 ТВт · см<sup>-2</sup>. В ходе эксперимента были реализованы оба типа взаимодействия, для чего кристалл устанавливался так, чтобы воспринимать  $o$ - и  $e$ -компоненты излучения накачки, а поляризация выходного излучения контролировалась посредством поляризатора (Tydex, Россия). Регистрация сигнала велась посредством программно-аппаратного комплекса на основе ячейки Голея GC-1P. В коротковолновой части ТГц диапазона излучение дополнительно обрезалось фильтром LPF-14.3-25 (Tydex, Россия), в длинноволновой полоса частот была ограничена характеристиками детектора – 0.04 ТГц. В результате была получена генерация ТГц излучения. При этом значение пиковой мощности при накачке

с длиной волны 800 нм составило  $E_{\text{THz}}^{800} = 1$  кВт, а для 950 нм —  $E_{\text{THz}}^{950} = 1.12$  кВт, что хорошо согласуется с оценкой эффективности, рассчитанной по вышеприведенной формуле (5) с учетом измеренных коэффициентов поглощения. Так же была определена лучевая стойкость образца. Она составила  $1.8 \text{ ТВт} \cdot \text{см}^{-2}$ . Стоит отметить, что используемый авторами кристалл имеет не самый низкий коэффициент поглощения, при использовании высококачественных образцов [18] возможно увеличение эффективности преобразования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследована возможность получения генерации ТГц излучения в нелинейном кристалле германо-фосфида цинка (ZGP) с накачкой излучением фемтосекундной Ti:Sapphire лазерной системы, работающей в пределах коротковолнового плеча поглощения  $0.67\text{--}2.5$  мкм. Получена генерация с пиковой мощностью  $\sim 1$  кВт.

Проведены исследования коэффициента поглощения в ближней ИК области спектра и дисперсионных свойств кристалла ZGP в ТГц диапазоне, что позволило уточнить уравнения Сельмейера и провести модельные исследования, показывающие хорошую корреляцию с экспериментальными данными. Определена лучевая стойкость образца, которая составила  $1.8 \text{ ТВт} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Применение фемтосекундных лазеров ближнего ИК диапазона в качестве источников накачки может позволить создавать на основе кристаллов ZGP эффективные широкополосные генераторы ТГц излучения, несмотря на высокое поглощение этих кристаллов в области  $0.67\text{--}2.5$  мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00241).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Humphreys K., Loughran J.P., Gradziel M. et al.* // Proc. of the 26th IEEE Eng. Med. Biol. Soc. V. 1. (San Francisco, 2004). P. 1302.
2. *Hu B.B., Nuss M.C.* // Opt. Lett. 1995. V. 20. № 16. P. 1716.
3. *Johnson J.B., Mourou M., Whitaker J.F. et al.* // Opt. Commun. 2008. V. 281. № 4. P. 527.
4. *Shi W., Ding Y.J.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. № 10. P. 1635.
5. *Hoffmann M.C., Fülöp J.A.* // J. Phys. D. 2011. V. 44. № 8. Art. № 083001.
6. *Nikogosyan D.N.* Nonlinear optical crystals: a complete survey. New York: Springer, 2005. P. 428.
7. *Ketteridge P., Budni P., Lee I. et al.* // Proc. Adv. Sol. St. Laser. (San Francisco, 1996). Art. № OP8.
8. *Boyd G.D., Bridges T.J., Patel C.K.N., Buehler E.* // Appl. Phys. Lett. 1972. V. 21. № 11. P. 553.
9. *Shi W., Ding Y.J.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 5. P. 848.
10. *Rowley J.D., Pierce J.K., Brant A.T. et al.* // Opt. Lett. 2012. V. 37. № 5. P. 788.
11. *Rowley J.D., Wahlstrand J.K., Zawilski K.T. et al.* // Opt. Expr. 2012. V. 20. № 15. P. 16968.
12. *Piyathilaka H.P., Sooriyagoda R., Dewasurendra V. et al.* // Opt. Expr. 2019. V. 27. № 12. P. 16958.
13. *Бхар Г.С., Саманта Л.К., Гхосх Д.К., Дас С.* // Квант. электрон. 1987. Т. 14. № 7. С. 1361; *Bhar G.C., Samanta L.K., Ghosh D.K., Das S.* // Sov. J. Quant. Electron. 1987. V. 17. № 7. P. 860.
14. *Андреев Ю.М., Геико Л.Г., Геико П.П.* // Изв. вузов. Физ. 2002. Т. 45. № 10. С. 85; *Andreev Y.M., Geiko L.G., Geiko P.P.* // Russ. Phys. J. 2002. V. 45. № 10. P. 1019.
15. *Zhong K., Liu C., Wang M. et al.* // Opt. Mater. Expr. 2017. V. 7. № 10. P. 3571.
16. *Kumbhakar P., Kobayashi T., Bhar G.C.* // Appl. Opt. 2004. V. 43. № 16. P. 3324.
17. *Shen Y.R.* Nonlinear infrared generation. Topics in applied physics. V. 16. N.Y.: Springer, 1977. P. 28.
18. *Creeden D., McCarthy J.C., Ketteridge P.A. et al.* // IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron. 2007. V. 13. № 3. P. 732.