

ШИРОКОПОЛОСНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ $ZnGeP_2$

А. А. Ионин, И. О. Киняевский, Ю. М. Климачев

В работе проведён расчёт и анализ условий фазового синхронизма в кристалле $ZnGeP_2$ с точки зрения широкополосного преобразования частоты излучения в среднем ИК диапазоне. Проведен расчёт преобразования частоты излучения $Cr:ZnS$ лазера в кристалле $ZnGeP_2$, демонстрирующий возможность создания широкополосного лазерного источника, спектр которого перекрывает интервал длин волн 3.2 – 9.5 мкм.

Ключевые слова: параметрическая генерация, лазер среднего ИК диапазона, широкополосный лазер.

Введение. Источники когерентного излучения среднего ИК диапазона (длина волны излучения 2–20 мкм) представляют большой интерес для широкого спектра научных и технологических применений, таких как спектроскопия, фотохимия, фотобиология и многие другие. Несмотря на широкое развитие лазерных технологий, в настоящее время ведутся активные разработки лазерных источников среднего ИК диапазона с целью расширения спектральных диапазонов генерации и повышения мощности излучения [1]. Особый интерес представляют широкополосные лазерные источники среднего ИК диапазона, спектр которых охватывает важные “окна прозрачности атмосферы” и полосы поглощения многочисленных молекулярных газов [2–5]. В лаборатории Газовых лазеров ФИАН был разработан широкополосный лазерный источник, действующий на ~700 спектральных линиях одновременно в диапазоне длин волн от 2.5 до 8.3 мкм, основанный на совместной генерации суммарных и разностных частот неселективного излучения CO лазера в кристалле $ZnGeP_2$ [4, 5]. При этом эффективность преобразования частоты излучения CO лазера в кристалле $ZnGeP_2$ может достигать 25%–37% [6, 7]. В данной работе вопрос возможности широкополосного преобразования частоты излучения в кристалле $ZnGeP_2$ рассматривается подробнее, в том числе предлагается

метод создания широкополосного оптического параметрического генератора среднего ИК диапазона.

Методика и результаты расчётов. В работах [4, 5] совместная генерация суммарных и разностных частот неселективного излучения СО лазера в одном кристалле ZnGeP_2 происходила благодаря совпадению углов фазового синхронизма (ФС) этих процессов при угле ФС, близком к углу некритичного спектрального ФС генерации второй гармоники по I типу (46.5°). Поэтому в данной работе проведены расчёты диаграмм ФС (рис. 1) кристалла ZnGeP_2 для углов 47.0° , 48.0° и 49.0° , близких к углу некритичного спектрального ФС генерации второй гармоники по I типу. Диаграммы рассчитывались по системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{n_1^e}{\lambda_1} + \frac{n_2^e}{\lambda_2} = \frac{n_3^o}{\lambda_3} \\ \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_3}, \end{cases} \quad (1)$$

где n_1, n_2, n_3 – показатели преломления для излучения “e” или “o” поляризации на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, соответственно. Показатели преломления рассчитывались по дисперсионным уравнениям из [8].

Диаграммы на рис. 1(а) демонстрируют следующее: излучение с какими длинами волн $\lambda_{1,2}$ образуется при накачке кристалла ZnGeP_2 коротковолновым излучением с длиной волны λ_3 при заданном угле ФС. Левая ветвь диаграмм при рассматриваемых углах ФС почти вертикальная. Это означает, что, например, при накачке кристалла излучением с длиной волны $\lambda_3 \sim 2.7$ мкм под углом фазового синхронизма 47.0° , возможно формирование излучения в широком диапазоне длин волн от 4.5 мкм до 7.0 мкм.

Отклонение левой ветви диаграмм от вертикали увеличивается с ростом угла ФС, однако оно может быть компенсировано спектральной шириной ФС и использованием излучения накачки с широким спектром. На рис. 1(б) представлена диаграмма ФС для угла ФС 49.0° , учитывающая спектральную ширину ФС. Уменьшение мощности преобразованного излучения при отстройке от точного ФС обозначено изменением тона. Зависимость эффективности преобразования от волновой расстройки в приближении плоских волн и заданного поля определяется по формуле [9]:

$$A = \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k \cdot L}{2}\right), \quad (2)$$

где $\text{sinc}x = \sin(x)/x$, Δk – волновая расстройка, L – длина кристалла (10 мм).

Рис. 1(б) демонстрирует, что в кристалле ZnGeP_2 при угле ФС 49.0° возможна сверхширокополосная параметрическая генерация излучения в интервале длин волн

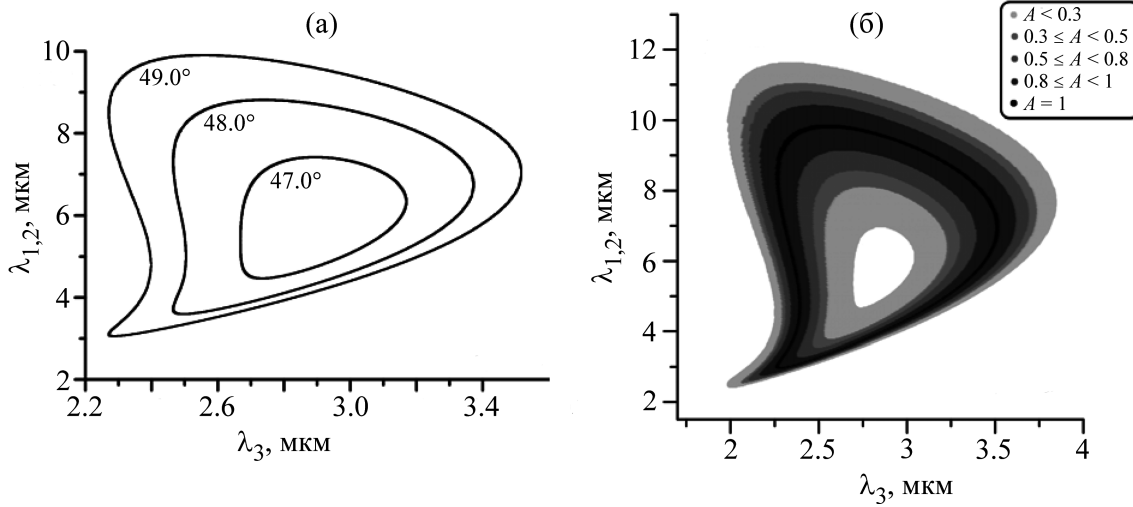


Рис. 1: Зависимость формируемых длин волн $\lambda_{1,2}$ от длины волны λ_3 излучения накачки в кристалле ZnGeP_2 при углах ΦC 47.0° , 48.0° и 49.0° (а); при угле ΦC 49.0° с учетом спектральной ширины ΦC (б).

$\lambda_{1,2} = 3 - 10$ мкм, при накачке кристалла излучением с длиной волны $\lambda_3 \approx 2.3$ мкм. Более детально зависимость коэффициента A от длины волны λ_1 или λ_2 при фиксированных значениях $\lambda_3 = 2.3$ мкм и $\lambda_3 = 2.4$ мкм представлена на рис. 2. На рис. 2 наглядно продемонстрировано, какие длины волн $\lambda_{1,2}$ преобразованного излучения можно получить при накачке монохроматическим излучением с соответствующей длиной волны λ_3 .

Зависимость коэффициента A от длины волн $\lambda_{1,2}$ имеет форму пиков, связанных с изгибами левой ветви диаграммы ΦC (рис. 1(б)). Для каждого значения длины волны λ_3 пики зависимости $A(\lambda_{1,2})$ заполняют интервал длин волн 3–10 мкм лишь частично. Несмотря на это, полного заполнения интервала длин волн $\lambda_{1,2} = 3 - 10$ мкм можно достичь, подбирая ширину спектра излучения накачки.

Для осуществления широкополосной генерации излучения среднего ИК диапазона в качестве лазера накачки кристалла ZnGeP_2 может применяться излучение Cr:ZnS лазера. Проведено моделирование параметрического преобразования частоты излучения фемтосекундного Cr:ZnS лазера, описанного в работе [10]. Расчёты осуществлены для спектра излучения Cr:ZnS лазера, имеющего гауссову форму с центральной длиной волны 2.385 мкм и спектральной шириной 91 нм, взятого из работы [10] (рис. 3). Расчёт осуществлялся в приближении плоских волн и заданного поля.

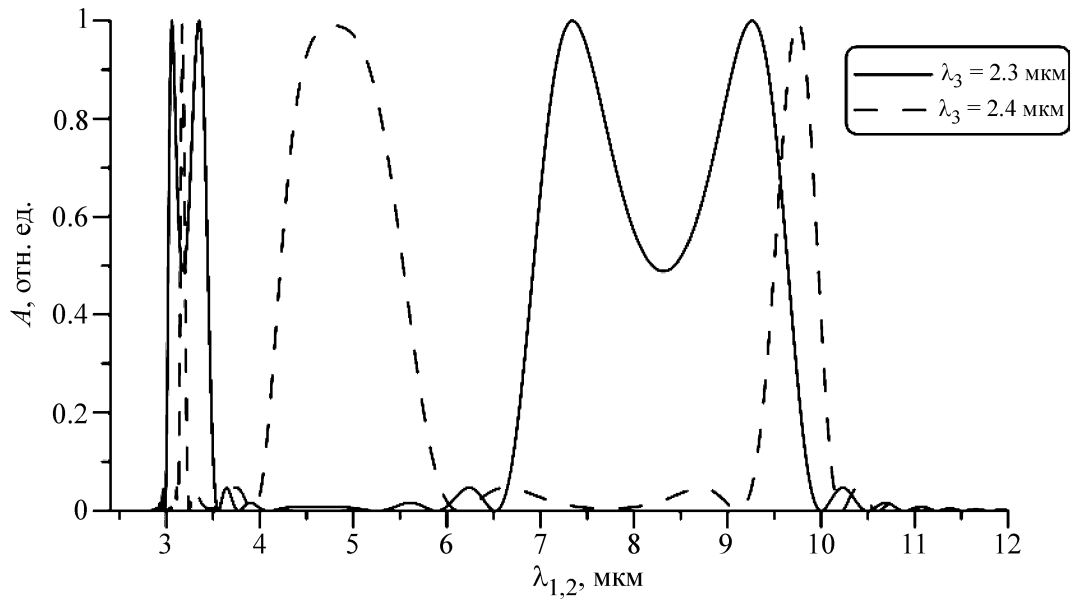


Рис. 2: Коэффициент A в зависимости от длины волны $\lambda_1(\lambda_2)$ для $\lambda_3 = 2.3$ мкм и $\lambda_3 = 2.4$ мкм.

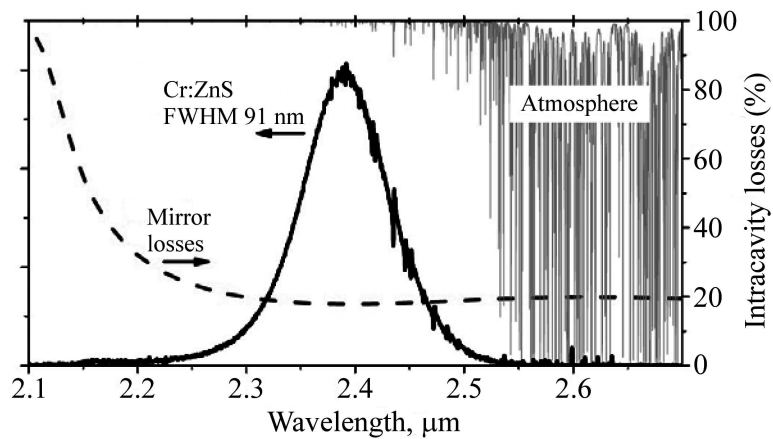


Рис. 3: Спектр излучения Cr:ZnS лазера [10].

Спектр накачки разбивался на монохроматические компоненты, далее для каждой монохроматической компоненты излучения накачки проводился расчёт спектра преобразованного излучения, полный спектр преобразованного излучения получался суммой спектров от каждой компоненты. В расчёте учитывалось уменьшение мощности длинноволновой части преобразованного спектра, связанное с уменьшением энергии фотонов. Оптимальный по эффективности преобразования угол ФС в кристалле ZnGeP₂ для спектра излучения накачки, показанного на рис. 3, составил 48.6°.

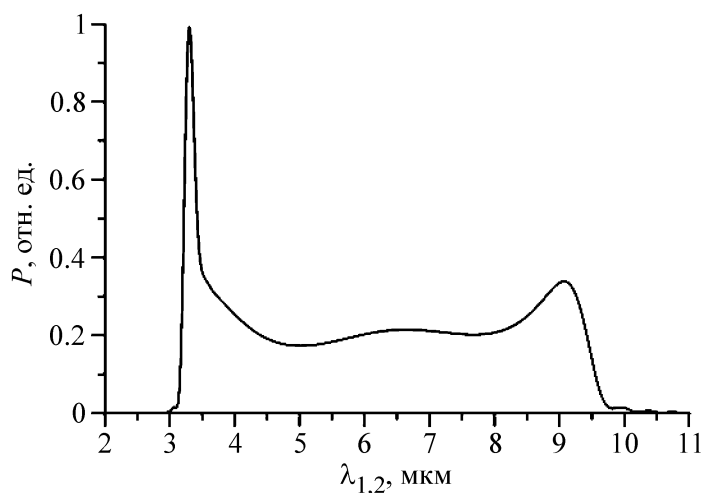


Рис. 4: Спектр излучения, преобразованного в кристалле ZnGeP_2 , при накачке излучением со спектром, представленным на рис. 3.

Нормированный спектр преобразованного излучения, полученный для описанных выше условий, представлен на рис. 4.

Спектр на рис. 4 перекрывает широкий интервал длин волн от 3.2 мкм до 9.5 мкм. Стоит отметить, что описанный вариант сверхширокополосной параметрической генерации излучения среднего ИК диапазона в кристалле ZnGeP_2 может быть осуществлён и при других условиях. Для этого, варьируя угол ФС кристалла ZnGeP_2 по крайней мере от 47° до 49° , требуется подобрать лазер с подходящим спектром излучения накачки (см. рис. 1(a)).

Заключение. Рассчитанные диаграммы фазового синхронизма в кристалле ZnGeP_2 для углов, близких к углу не критичного спектрального ФС генерации второй гармоники по I типу, показывают возможность широкополосной параметрической генерации излучения среднего ИК диапазона. Численное моделирование показало, что при накачке кристалла ZnGeP_2 под углом фазового синхронизма 48.6° излучением Cr:ZnS лазера [10] возможна широкополосная генерация излучения, перекрывающая интервал длин волн 3.2–9.5 мкм.

Работа частично поддержана Учебно-научным комплексом ФИАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Majid Ebrahim-Zadeh and Irina T. Sorokina, *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications, NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics* (Springer, 2008).

- [2] Fritz Keilmann and Sergiu Amarie, J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves **33**, 479 (2012).
- [3] Nick Leindecker, Alireza Marandi, Robert L. Byer and Konstantin L. Vodopyanov, Opt. Exp., **19**(7), 6297 (2011).
- [4] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Yu. M. Klimachev, et al., Optics Letters **37**, 2838 (2012).
- [5] Ю. М. Андреев, А. А. Ионин, И. О. Киняевский и др., Квантовая электроника **43**(2), 139 (2013).
- [6] A. A. Ionin, J. Guo, L.-M. Zhang, et al., Laser Physic. Letters **8**(10), 723 (2011).
- [7] О. В. Будилова, С. П. Деревяшкин, А. А. Ионин и др., Тезисы докладов III международной молодежной научной школы "Современные проблемы физики и технологий", НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, 2014 (НИЯУ МИФИ, МОСКВА 2014) (в печати).
- [8] D. N. Nikogosyan, *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey* (New York, Springer, 2005).
- [9] Э. С. Воронин, В. Л. Стрижевский, Успехи физических наук **127**(1), 99 (1979).
- [10] Nikolai Tolstik, Evgeni Sorokin and Irina T. Sorokina, Optics Letters **38**(3), 299 (2013).

Печатается по материалам III Международной молодежной научной школы-конференции "Современные проблемы физики и технологий", Москва, МИФИ, апрель 2014 г.

Поступила в редакцию 8 мая 2014 г.