

Н. А. Калинцева, А. В. Копыльцов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Представлен программный комплекс для моделирования нелинейных параметрических преобразователей частоты. Программный комплекс позволяет производить расчет энергетических и пространственно-временных параметров многокаскадных схем параметрических генераторов и проводить их оптимизацию. Показана принципиальная роль учета угловой расходимости взаимодействующих пучков излучения на эффективность преобразования частоты. Проведена верификация расчетов по опубликованным экспериментальным результатам.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, оптическое программное обеспечение.

N. Kalintseva, A. Kopyltsov

MODELING OPTICAL PARAMETRIC FREQUENCY CONVERTORS FOR MID-INFRARED SPECTRAL RANGE

Software for modeling nonlinear frequency convertors has been developed. The software allows to perform calculation and optimization of energy, spatial and temporal parameters of multistage nonlinear frequency convertors. The principal role of angular divergence of interacting beams for conversion efficiency is emphasized. A verification of calculations has been performed on the published experimental results.

Keywords: simulation, optimization, optical software.

1. Введение

Проблема разработки источников излучения, генерирующих в среднем ИК-диапазоне (область 3–5 мкм), приобретает все большую актуальность. Данный диапазон попадает в полосу прозрачности атмосферы (рис. 1) и используется для проведения исследований по экологическому мониторингу сложных органических соединений, газовых и аэрозольных загрязнений атмосферы [4; 7; 14; 17].

Поглощение излучения молекулами воды, углекислого газа и кислорода ограничивает прозрачность атмосферы двумя диапазонами 3–5 мкм и 8–14 мкм (незначительный вклад в поглощение вносят также молекулы озона, оксида азота, оксида углерода и метана). Другой задачей является разработка щадящего лазерного скальпеля в диапазоне 5–8 мкм [3].

В настоящее время в 3–5 мкм спектральном диапазоне отсутствуют мощные импульсные лазеры, обеспечивающие энергию и мощность необходимую для проведения подобных исследований, и этот диапазон перекрывается, главным образом, параметрическими генераторами света, которые включают в себя как нелинейную среду, так и лазер накачки.

Процесс параметрической генерации света (ПГС) основан на физическом явлении параметрического усиления световой волны сигнала в нелинейном кристалле под действием световой волны накачки.

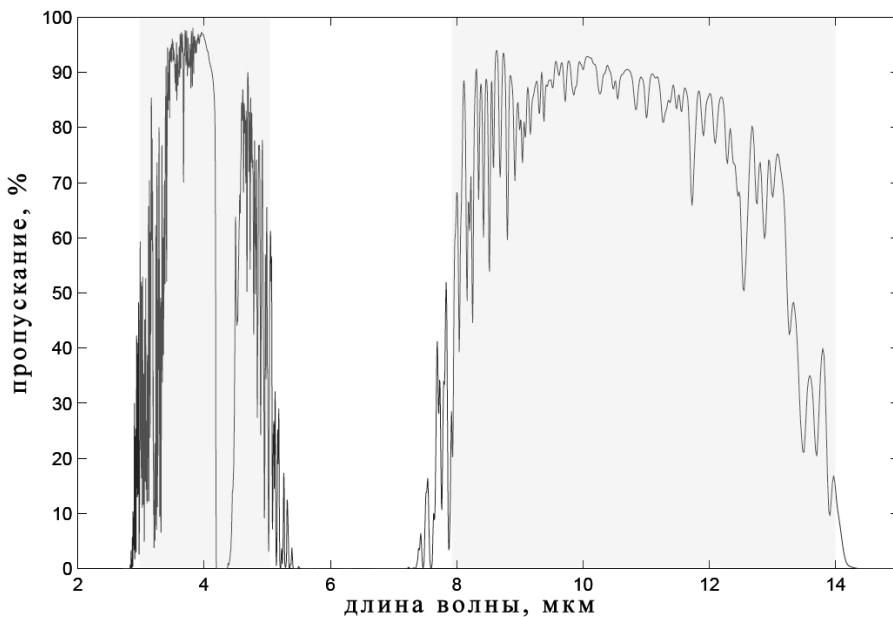


Рис. 1. График пропускания излучения через атмосферу в зависимости от длины волны

Принцип работы ПГС и возможные схемы перестройки частоты генерации были предложены еще в 1962 г., а через несколько лет впервые получена оптическая параметрическая генерация [1; 11; 12]. Сегодня параметрическая генерация реализована практически во всех временных режимах лазера — от непрерывного до генерации ультракоротких фемтосекундных импульсов. Для различных временных диапазонов имеются свои особенности протекания этого процесса, а следовательно, и особенности построения оптической схемы ПГС.

Задача получения генерации в указанном спектральном диапазоне имеет ряд трудностей, которые можно подразделить на два больших класса. Во-первых, это проблемы, связанные с выбором нелинейного кристалла с учетом его характеристик. Во-вторых, актуальной проблемой является проектирование источника накачки параметрического генератора. Обе эти проблемы тесно взаимосвязаны и должны решаться совместно.

Параметрическое преобразование в среднем ИК-диапазоне может быть осуществлено на весьма ограниченном количестве нелинейных кристаллов, прозрачных в этой области спектра, при этом использование данных кристаллов также имеет свою специфику. Например, важным достоинством кристаллов семейства КТР (KTiOPO_4) и его изоморфов KTiOAsO_4 (КТА), RTiOAsO_4 (РТА) является возможность работы с неодимовыми лазерами накачки при некритическом фазовом синхронизме, что важно при работе с мощными многомодовыми лазерами, а высокая лучевая стойкость кристаллов (более 400 МВт/см²) позволила получить максимальную энергию до 450 мДж [15; 16] с использованием КТА. Однако перестройка длины волны может быть получена только до 3,5 мкм.

Для ПГС с возможностью генерации длины волны в диапазоне более 3,5 мкм сегодня наиболее эффективны прозрачные в этом диапазоне халькопириты: кадмийселен (CdSe), кристалл германиевого фосфида цинка ZnGeP_2 (ZGP) и селеногаллат серебра AgGaSe_2 . Кристалл AgGaS_2 позволяет осуществлять непрерывную перестройку длины волны до 5 мкм при накачке непосредственно от неодимового лазера [13]. Однако применение AgGaS_2 ограничено низкой лучевой стойкостью поверхности кристалла (~ 25 МВт/см²).

Наибольший интерес представляет кристалл ZGP. Интерес к этому кристаллу основан на его характеристиках: высокий коэффициент нелинейности, величина порога разрушения, малое поглощение в диапазоне источника накачки (около 2 мкм) и высокая теплопроводность. Спектр пропускания германиевого фосфида цинка представлен на рис. 2 [2; 10].

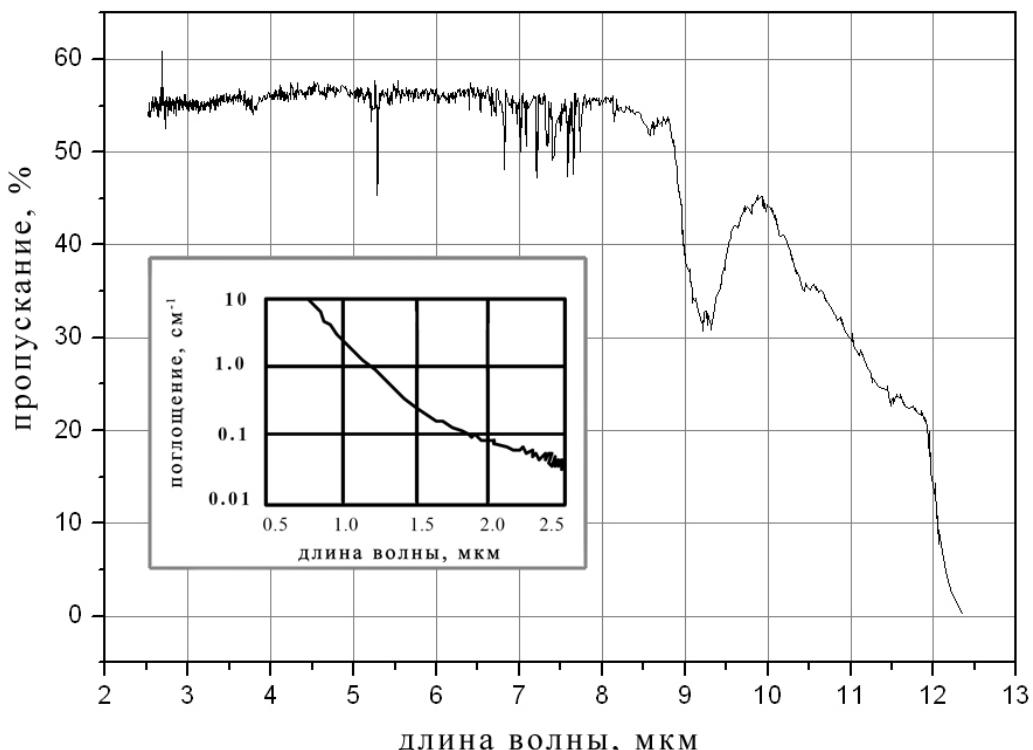


Рис. 2. Спектр пропускания германиевого фосфида цинка (ZGP)

Область пропускания ZGP лежит в диапазоне 2–8 мкм. Вставка рис. 2 демонстрирует значения коэффициента поглощения в диапазоне 0,5–2,5 мкм. Также необходимо добавить, что за счет применения особой технологии обработки можно достичь величины лучевой стойкости поверхности кристалла более 130 МВт/см² [18].

С учетом особенностей кристаллов сейчас применяются следующие схемы накачки параметрических преобразователей:

- накачка Ho:YLF лазером (2,06 мкм), накачиваемого непрерывным Tm лазером (1,94 мкм);
- накачка Ho: YAG лазером (2,09 мкм), накачиваемого непрерывным Tm лазером (1,908 мкм);
- накачка ПГС на кристалле ZGP другим параметрическим генератором (например, построенным на кристалле KTP).

Описание этих схем можно найти в источниках [5; 6; 9].

В последнее время актуальными становятся более сложные схемы с использованием параметрических усилителей [8], которые наиболее перспективны для получения излучения в среднем ИК-диапазоне необходимой мощности при малой угловой расходимости.

Построение таких схем является не только сложной технической задачей, но и требует весомых финансовых затрат. В связи с этим на первый план выходит задача математического моделирования сложных многокаскадных схем параметрических усилителей. Необходимо оптимизировать несколько каскадов преобразования, учитывая различные параметры излучения и нелинейных кристаллов. Кроме того, необходимо обеспечить оптимальное пространственное перекрытие взаимодействующих пучков, а также обеспечить их временное совпадение в нелинейном кристалле.

В данной статье представлен программный комплекс, предназначенный для анализа оптической схемы преобразователя частоты, оптимизации параметров пучков и нелинейных кристаллов. Расчеты, проведенные с помощью представляемого программного комплекса, позволят значительно уменьшить набор возможных альтернативных вариантов решения поставленной задачи. Комплекс включает в себя модули для расчета нелинейно-оптических устройств, таких как параметрический генератор света, параметрический усилитель, генераторы суммарных частот и второй гармоники.

2. Теоретический базис и математическое моделирование процесса ПГС

2.1. Теоретические аспекты проблемы

При ПГС происходит усиление в нелинейном кристалле световой волны сигнала (ω_s) в поле мощной световой волны накачки (ω_p). При этом кроме усиления волны сигнала происходит генерация холостой волны (ω_i). Частоты взаимодействующих волн связаны соотношением $\omega_p = \omega_s + \omega_i$, а волновые вектора удовлетворяют условию синхронизма $k_p = k_s + k_i$. Здесь и далее индексы s — сигнальная волна, i — холостая волны, p — волна накачки.

Метод расчета ПГС основан на решении системы укороченных дифференциальных уравнений в геометрооптическом приближении:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_s}{\partial z} + \delta_s A_s + \beta_s \frac{\partial A_s}{\partial x} &= i\omega_s A_p A_i^* \exp(i\Delta kz) \\ \frac{\partial A_i}{\partial z} + \delta_i A_i + \beta_i \frac{\partial A_i}{\partial x} &= i\sigma_i A_p A_s^* \exp(i\Delta kz) \\ \frac{\partial A_p}{\partial z} + \delta_p A_p + \beta_p \frac{\partial A_p}{\partial x} &= i\sigma_p A_s A_i \exp(-i\Delta kz), \end{aligned}$$

где A_i — комплексные амплитуды взаимодействующих волн, δ_i — коэффициенты диссипативных потерь σ_i — коэффициенты нелинейной связи, связанные с эффективной нелинейностью среды d_{eff} , β_i — величина угла двулучепреломления.

В расчетах учитывается временная форма импульса излучения, пространственное распределение интенсивности и угловая расходимость лазерного пучка. Также учитываются диссипативные потери в нелинейной среде и френелевские потери на апертурных гранях кристаллов. Для каждого из вышеуказанных нелинейных процессов разработан программный модуль.

2.2. Интерфейс программы и задание расчетных параметров

Программный комплекс позволяет анализировать математические модели как параметрического усилителя, так и схемы параметрический генератор — параметрический усилитель.

Интерфейс для задания необходимых параметров расчета представлен на рис. 3.

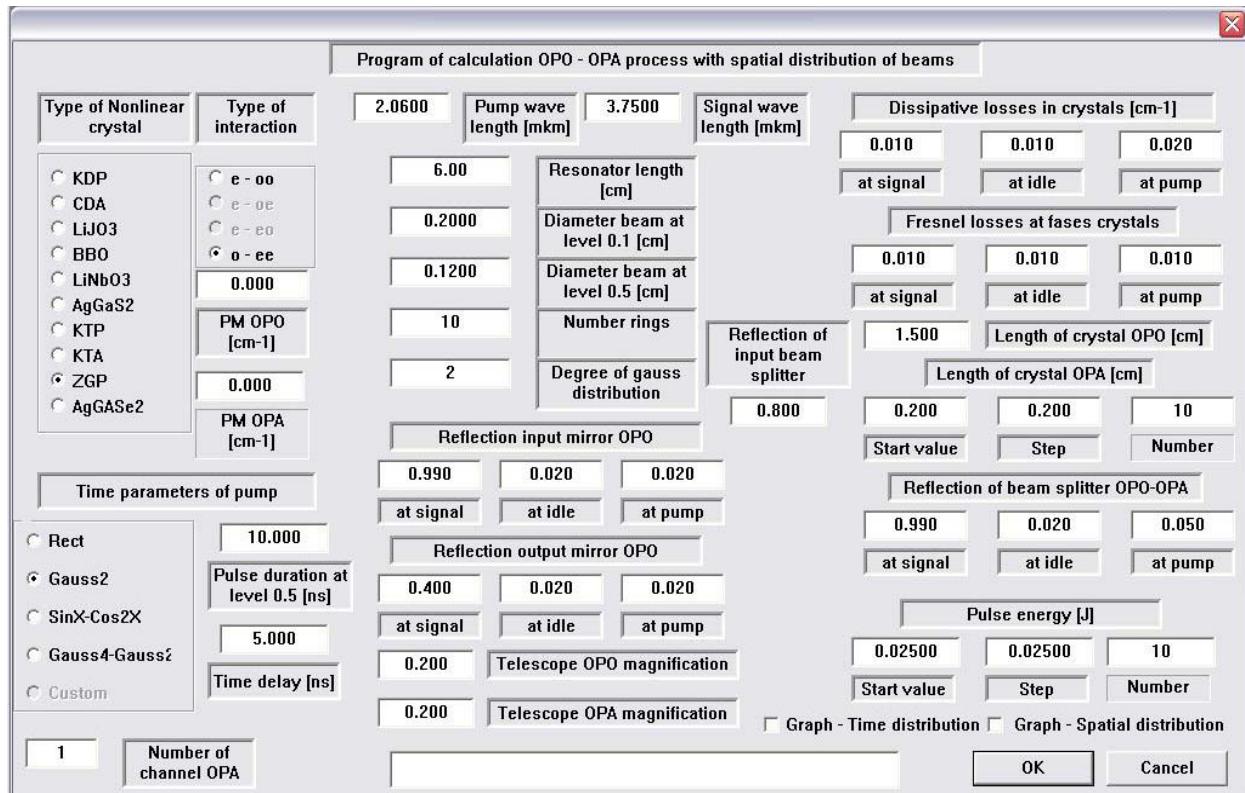


Рис. 3. Интерфейс программного комплекса для расчета моделей типа «параметрический генератор/(параметрический генератор — параметрический усилитель)»

Как видно из рис. 3, программный комплекс позволяет проводить расчеты для 10 нелинейных кристаллов.

Входные пучки взаимодействующих волн задаются в виде дискретных распределений по времени и по поперечному сечению пучков. Распределение временного хода может быть задано различным функциями для переднего и заднего фронтов, а также оцифрованным экспериментальным распределением. Предусмотрено задание поперечного распределения интенсивности пучков в виде распределения Гаусса с различной величиной степени экспоненты, а также в виде распределения, соответствующего реальной экспериментальной ситуации.

Нелинейный кристалл описывается следующими параметрами:

- коэффициенты нелинейной связи s_i , соответствующими величине эффективной нелинейности для рассматриваемого типа синхронизма;
- коэффициенты поглощения d_i на соответствующих длинах волн;
- величиной угла двулучепреломления β_i для «е»-волны и $b_i = 0$ для «о»-волны;
- коэффициенты френелевского отражения на входной и выходной гранях кристалла;
- угловые дисперсионные коэффициенты, связывающие угловую ширину синхронизма с величиной угловой расходимости пучков.

В расчетный комплекс входит модуль для пространственной трансформации пучков при прохождении телескопических оптических систем и светоделительных устройств.

Также разработан программный модуль для введения временной задержки между взаимодействующими импульсами.

2.3. Область применения метода

Область применения разработанного метода ограничивается достаточно «длинными» импульсами (не короче 0,1 нс). В этом случае на длине кристалла не происходит разбегание импульсов взаимодействующих волн из-за эффекта различия групповых скоростей импульсов. Для абсолютного большинства нелинейных взаимодействий указанный эффект проявляется только при взаимодействии пикосекундных и более коротких импульсов.

При расчете поперечного распределения взаимодействующих пучков пренебрегается дифракцией, но учитывается диафрагменный апертурный эффект. Данное ограничение не играет практического значения, так как на реальных длинах кристаллов (порядка нескольких сантиметров) и диаметрах пучков более 1 мм дифракция не проявляется.

Значительно более важным фактором, приводящим к существенному снижению эффективности преобразования, является угловая расходимость пучков излучения. Для эффективного преобразования необходимым условием является малость угловой расходимости излучения взаимодействующих входных пучков относительно угловой ширины синхронизма нелинейного кристалла. Для многих кристаллов при критичном угловом синхронизме взаимодействующих волн выполнить требуемое условие часто не представляется возможным. В рассматриваемом методе угловая расходимость учитывается путем решения системы укороченных уравнений при различных фазовых расстройках в пределах угловой расходимости пучков. Далее производится интегрирование полученных результатов с учетом весовых коэффициентов.

Комбинируя программные модули, можно провести расчет и оптимизацию параметров практически любого многокаскадного нелинейно-оптического устройства, работающего в наносекундном диапазоне длительностей импульсов. Ниже приводятся две схемы параметрического преобразования, на примере которых проводилась верификация разработанного метода.

3. Верификация численного расчета

На рис. 4 приведена схема преобразователя частоты излучения непрерывного Тм-лазера в излучение среднего ИК-диапазона с длиной волны 3,4 мкм [18]. В рассматриваемой схеме используется тулиевый лазер (Tm) для накачки гольмииевого задающего лазера (Ho: YLF MO) и гольмииевого усилителя (Yo:YLF Amp). Излучение гольмииевого лазера имеет следующие характеристики: длина волны 2,055 мкм, энергия в импульсе до 60 мДж. Данное излучение является излучением накачки для параметрического генератора (ZGP OPO). Для накачки параметрического усилителя (ZGP OPA) используется излучение с энергией в импульсе порядка 100 мДж. Используя представленный ранее программный комплекс, была рассчитана каскадная схема параметрического генератора — параметрического усилителя с накачкой гольмииевым лазером с заданными параметрами [18].

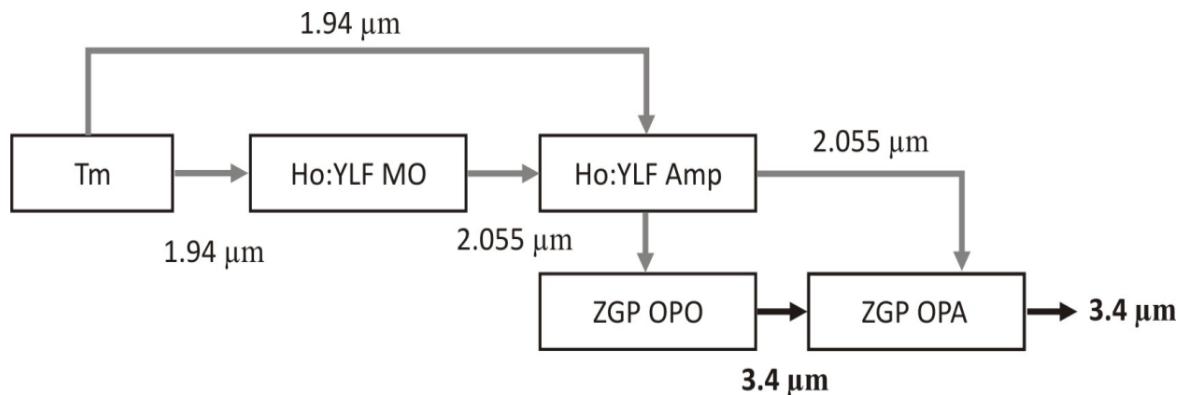


Рис 4. Схема преобразователя частоты излучения непрерывного Тм-лазера в излучение среднего ИК-диапазона (пояснения в тексте)

На рис. 5 приводится схема генерации излучения среднего ИК-диапазона путем применения тандемной схемы параметрических преобразований на кристаллах КТР и кристаллах ZGP при накачке излучением импульсного Nd:YAG лазера [3]. В представленной на рис. 5 схеме излучение импульсного неодимового лазера (Nd:YAG Laser) и усилителя (Nd:YAG Amp) является излучением накачки для параметрического генератора и усилителя на кристаллах КТР (энергия порядка 100–120 мДж на длине волны 2,08 мкм). Излучение с длиной волны 2,08 мкм накачивает параметрический генератор — параметрический усилитель на кристаллах ZGP (длина волны излучения 3–5 мкм).

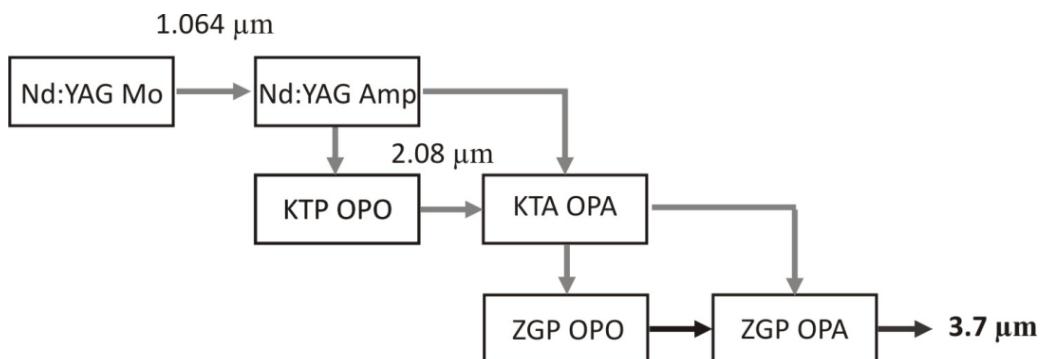


Рис 5. Многокаскадная схема преобразования излучения в средний ИК-диапазон (пояснения в тексте)

На основе анализа приведенных данных о параметрах излучения и параметров нелинейных кристаллов, используемых в эксперименте, составлялся набор исходных данных для расчета. Полученные в результате расчета параметры выходного излучения сравнивались с экспериментальными результатами. Для указанных выше работ наблюдалось как качественное поведение параметров выходного излучения от различных факторов, так и количественное соответствие расчетных и экспериментальных значений. К сожалению, о некоторых параметрах, необходимых для проведения расчетов, в указанных публикациях данные отсутствовали. В этих случаях приходилось отсутствующие данные дополнять, исходя из физических закономерностей.

4. Заключение

Разработан программный комплекс для расчета нелинейно-оптических устройств, таких как ПГС, параметрический усилитель, генераторы суммарных частот и второй гармоники при взаимодействии наносекундных импульсов в нелинейной квадратичной среде.

Метод расчета основан на решении системы укороченных дифференциальных уравнений в геометрооптическом приближении. В расчетах учитывается временная форма импульса излучения, пространственное распределение интенсивности в лазерном пучке. Также учитываются диссипативные потери в нелинейной среде и френелевские потери на апертурных гранях кристаллов. Разработаны также программные модули для пространственной трансформации пучков при прохождении телескопических оптических систем и светоделительных устройств.

Для каждого из указанных выше нелинейных процессов разработан программный модуль. Комбинируя программные модули, можно провести расчет и оптимизацию параметров практически любого многокаскадного нелинейно-оптического устройства, работающего в наносекундном диапазоне длительностей импульсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахманов С. А., Хохлов Р. В. Об одной возможности усиления световых волн // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. № 1. С. 351–353.
2. Кристаллы ZnGeP₂ для параметрического преобразования частоты лазерного излучения лазеров среднего ИК диапазона // Каталог Института оптического мониторинга СО РАН. Томск, 2005.
3. Серебряков В. А., Бойко Э. В., Петрищев Н. Н., Ян А. В. Медицинские применения лазеров среднего инфракрасного диапазона. Проблемы и перспективы // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 1. С. 9–23.
4. Barnes N. P., Murray K. E., Jani M. G., Schunemann P. G., Pollak T. M. ZnGeP₂ parametric amplifier. J. Opt. Soc. Am. B. 1998. Vol. 15. № 1. P. 232–238.
5. Budni P. A., Pomeranz L. A. Efficient mid-infrared laser using 1,9 μ m-pumped Ho: YAG and ZnGeP₂ optical parametric oscillators. J. Opt. Soc. Am. B. 2000. V. 17. № 5. P. 723–728.
6. Dergachev P., Armstrong, Smith A., Drake T., Dubois M. High power, high-energy ZGP OPA Pumped by a 2,05 microns Ho: YLF MOPA System, Proc. Of SPIE. 2008. Vol. 6875.
7. Ebrahim-Zadeh M., Sorokina I. T. Mid-infrared optical parametric oscillators and applications. Springer, 2008. P. 347–375.
8. Haakestad M. W., Arisholm G., Lippert E., Nicolas S., Rustad G., Stenersen K. High-pulse-energy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in ZnGeP₂, OPTICS EXPRESS. 2008. Vol. 16. № 18. P. 14263–14273.
9. Henriksson M. Tandem PPKTP and ZGP OPO for Mid-infrared generation, Proc. Of SPIE. 2008. Vol. 7115. P 71150O. 1–71150O.10
10. INRAD catalog, www.inrad.com
11. Kingston R. H. Parametric amplification and oscillation at optical frequencies. Proc. IRE. 1962. Vol. 50. No. 4. P. 472–474.
12. Kroll N. M. Parametric amplification in spatially extended media and application to the design of tunable oscillator at optical frequencies. Phys. Rev. 1962. Vol. 127. № 4. P. 1207–1211
13. McEwan K. J. High power synchronously pumped AgGaS₂ optical parametric oscillator. Opt. Lett. 1998. Vol. 23. P. 667–669.
14. Nordseth Ø. Master Oscillator/Power Amplifier System for Optical Parametric Conversion of High-Energy Pulses from 1 to 2 mm, FFI. 2004.
15. Rines G. A., Rines D. G., Moulton P. F. Efficient, High-Energy. KTP Optical Parametric Oscillators Pumped with 1 Micron Nd-Lasers. OSA Proc. ASSL. 1994. Vol. 20. P. 461–463.

16. *Webb M. S., Moulton P. F., Kasinski J. J., Burnham R. L., Loiacano G., Stolzenberger R.* High-Average-Power KTA OPO. Opt. Lett. 1998. Vol. 23. P. 1161–1163.
17. *Yu J., Barnes N. P., Murray K. E., Lee H. R., Bai Y.* Parametric generation of tunable infrared radiation for remote sensing applications, Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 4893. P. 183–192.
18. *Zawilski K. T., Setzler S. D., Schunemann P. G., Pollak T. M.* Laser Damage Threshold of Single Crystal ZnGeP₂ at 2,05 mm. Proc. SPIE. 2005. Vol. 5991. P. 50–62.

REFERENCES

1. *Ahmanov S. A., Hohlov R. V.* Ob odnoj vozmozhnosti usilenija svetovyh voln // ZHJETF. 1962. T. 43. № 1. S. 351–353.
2. Kristally ZnGeP₂ dlja parametricheskogo preobrazovaniya chastoty lazernogo izluchenija laze-rov srednego IK diapazona // Katalog Instituta opticheskogo monitoringa SO RAN. Tomsk, 2005.
3. *Serebrjakov V. A., Bojko JE. V., Petriwev N. N., Jan A. V.* Medicinskie primenenija lazerov srednego infrakrasnogo diapazona. Problemy i perspektivy // Opticheskij zhurnal. 2010. T. 77. № 1. S. 923.
4. *Barnes N. P., Murray K. E., Jani M. G., Schunemann P. G., Pollak T. M.* ZnGeP₂ parametric amplifier J. Opt. Soc. Am. B. 1998. Vol. 15. № 1. P. 232–238.
5. *Budni P. A., Pomeranz L. A.* Efficient mid-infrared laser using 1,9 μ m-pumped Ho: YAG and ZnGeP₂ optical parametric oscillators. J. Opt. Soc. Am. B. V. 17. № 5. 2000. P. 723–728.
6. *Dergachev P., Armstrong, Smith A., Drakec T., Duboisc M.* High power, high-energy ZGP OPA Pumped by a 2,05 microns Ho: YLF MOPA System, Proc. Of SPIE. 2008. Vol. 6875.
7. *Ebrahim-Zadeh M., Sorokina I. T.* Mid-infrared optical parametric oscillators and applications. Springer. 2008. P. 347–375.
8. *Haakestad M. W., Arisholm G., Lippert E., Nicolas S., Rustad G., Stenersen K.* High-pulse-energy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in ZnGeP₂, OPTICS EXPRESS. 2008. Vol. 16.. № 18. P. 14263–14273.
9. *Henriksson M.* Tandem PPKTP and ZGP OPO for Mid-infrared generation, Proc. Of SPIE. 2008. Vol. 7115. P. 71150O.1-71150O.10
10. INRAD catalog/ www.inrad.com
11. *Kingston R. H.* Parametric amplification and oscillation at optical frequencies. Proc. IRE. 1962. Vol. 50. № 4. P. 472–474.
12. *Kroll N. M.* Parametric amplification in spatially extended media and application to the design of tunable oscillator at optical frequencies. Phys. Rev. 1962. Vol. 127. № 4. P. 1207–1211.
13. *McEwan K. J.* High power synchronously pumped AgGaS₂ optical parametric oscillator. Opt. Lett. 1998. Vol. 23. P. 667–669.
14. *Nordseth SH.* Master Oscillator/Power Amplifier System for Optical Parametric Conversion of High-Energy Pulses from 1 to 2 mm. FFI, 2004.
15. *Rines G. A., Rines D. G., Moulton P. F.* Efficient, High-Energy. KTP Optical Parametric Oscillators Pumped with 1 Micron Nd-Lasers. OSA Proc. ASSL. 1994. Vol. 20. P. 461–463.
16. *Webb M. S., Moulton P. F., Kasinski J. J., Burnham R. L., Loiacano G., Stolzenberger R.* High-Average-Power KTA OPO. Opt. Lett. 1998. Vol. 23. P. 1161–1163.
17. *Yu J., Barnes N. P., Murray K. E., Lee H. R., Bai Y.* Parametric generation of tunable infrared radiation for remote sensing applications, Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 4893. P. 183–192.
18. *Zawilski K. T., Setzler S. D., Schunemann P. G., Pollak T. M.* Laser Damage Threshold of Single Crystal ZnGeP₂ at 2,05 mm. Proc. SPIE. 2005. Vol. 5991. P. 50–62.