

Численное моделирование внутрирезонаторного процесса параметрической генерации света в трехзеркальной кольцевой схеме для высоких энергий импульсов накачки

А. А. Русак¹⁾, К. Д. Траскевич¹⁾, И. А. Ходасевич¹⁾, В. А. Орлович¹⁾,
Н. С. Новиков¹⁾, Г. Д. Артыкова¹⁾, Унурбилэг Дармаа²⁾

¹⁾ Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: a.rusak@dragon.bas-net.by

²⁾ Институт физики и технологии Монгольской академии наук, Улаанбаатар, Монголия
e-mail: unurbilegd@mas.ac.mn

Численно исследован процесс параметрической генерации света на основе кристаллов KTiOAsO_4 (КТА) в трехзеркальном резонаторе при варьировании энергии импульсов от 0,2 Дж до 1 Дж. Установлены закономерности распределения интенсивностей возбуждающего и преобразованного излучений внутри резонатора в зависимости от параметров его зеркал, габаритов и количества используемых кристаллов. Моделирование позволяет определить оптимальную конфигурацию резонатора для заранее заданного диапазона энергии входных импульсов, обеспечивающую эффективную генерацию сигнальной волны без разрушения кристаллов КТА.

Ключевые слова: параметрический генератор света (ПГС); нелинейные кристаллы KTiOAsO_4 (КТА); трех-зеркальный кольцевой ПГС; внутрирезонаторные интенсивности излучения.

Numerical simulation of the OPO process in a three-mirror ring resonator for high pump pulses energies

A. A. Rusak¹⁾, K. D. Traskevich¹⁾, I. A. Khodasevich¹⁾, V. A. Orlovich¹⁾,
N. S. Novikov¹⁾, G. J. Artykova¹⁾, Unurbileg Darmaa²⁾

¹⁾ B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: a.rusak@dragon.bas-net.by

²⁾ Institute of Physics and Technology of the Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia
e-mail: unurbilegd@mas.ac.mn

A numerical study to investigate the optical parametric oscillation using KTiOAsO_4 (KTA) crystals in a three-mirror resonator with pulse energies varying from 0.2 J to 1 J was performed. The distribution relations of the pump and converted radiation intensities within the resonator were determined depending on the parameters of its mirrors, dimensions, and the number of crystals used. The simulation allows us to determine the optimal resonator configuration for a predetermined range of input pulse energies, ensuring high signal wave generation without damaging the KTA crystals.

Keywords: optical parametric oscillator (OPO); nonlinear KTiOAsO_4 (KTA) crystals; ring three-mirror OPO; intracavity radiation intensities.

Введение

Параметрические генераторы света (ПГС) являются эффективными преобразователями лазерного излучения, способными обеспечивать как плавную перестройку частоты [1], так и генерацию на фиксированных длинах волн [2]. В последние годы все больше внимания уделяется ПГС, генерирующим излучение в

среднем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра [1, 3, 4], которое соответствует преобразованию в холостую волну излучения ближней ИК области. Излучение среднего ИК диапазона, как и в области 1,5 – 2 мкм, используемое в лидарных устройствах для зондирования на больших расстояниях (более 1 км) [1, 2], может требовать увеличения мощности выходного излучения. Следовательно, актуальной задачей является разработка ПГС с накачкой излучением с высокой энергией импульсов без повреждения преобразующей среды (кристаллов). Поглощение кристаллом части взаимодействующих излучений способствует формированию в нем положительной тепловой линзы, уменьшающей диаметры пучков внутри кристаллов, что в совокупности с их интерференцией может привести к увеличению внутрирезонаторной интенсивности выше порога разрушения кристалла и к его пробое [5]. Кроме того, поскольку генерация холостой волны взаимосвязана с преобразованием в сигнальную, то их эффективности будут зависеть от параметров резонатора. Следовательно, для разработки мощных ПГС как ближнего, так и среднего ИК диапазонов, необходимо знание распределения интенсивности взаимодействующих пучков излучения внутри резонатора. Насколько нам известно, такая информация в литературе отсутствует, поэтому целью работы являлось численное моделирование процесса ПГС в трехзеркальном резонаторе при варьировании энергии импульсов, габаритов кристаллов и параметров зеркал.

1. Модель и исходные данные

Распределения интенсивностей излучений накачки, сигнальной и холостой волн исследовалось внутри трех-зеркального резонатора ПГС, схема которого приведена в [6] на рис. 1, с помощью модели, описанной в [6] и реализованной на языке программирования C⁺⁺. Резонатор являлся высокодобротным на длине волны накачки и низкодобротным для холостой волне. Коэффициенты отражения входного $R1$ и промежуточного $R3$ зеркал для всех длин волн не менялись, были выбраны, как в [6]. Добротность резонатора моделировалась по изменению коэффициента отражения выходного зеркала для сигнальной волны $R2_c$ в диапазоне от 20 % до 80 % при постоянных $R2_n = 100$ % и $R2_x = 30$ %, а также по изменению внутрирезонаторных потерь за счет отражений на торцах и поглощения холостой волны при помещении в плечи резонатора одного, двух или трех кристаллов. Длина резонатора составила 105 мм, обеспечивая его наиболее полное заполнение преобразующей средой. Основная энергетическая нагрузка приходится на кристалл, помещенный в первом плече между входным зеркалом $R1$ и выходным зеркалом $R2$ и, как было показано в [5] и [7], из-за резонаторной связи по сигнальной волне возможно превышение предельно допустимой интенсивности и его разрушение [8].

Учитывая хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных для энергии импульсов сигнальной волны в ПГС-КТР при накачке до 140 мДж [6], за исходные данные для расчетов были взяты параметры излучения Nd:YAG-лазера ($\lambda_{\text{вн}} = 1064$ нм, $\tau = 15$ нс, $f = 20$ Гц) с коэффициентом супергауссовости $N = 16$ профиля, близкого к П-образному и аппроксимирующего пространственное распределение поля пучка многомодового излучения, диаметр которого изменялся с помощью телескопа. Энергия импульсов E_n варьировалась от 0,2 Дж до 1 Дж. Радиус r

входного пучка накачки определялся по максимальной интенсивности излучения I_n (плотности мощности), падающей на кристалл и не превышающей порог его разрушения (80–90 МВт/см²). Допустимый радиус составил 3,5 мм при величине $E_n = 0,5$ Дж ($I_n \approx 86,6$ МВт/см², ($I_{0,5}$)), $r = 4,3$ мм при $E_n = 0,75$ Дж ($I_n \approx 86$ МВт/см², ($I_{0,75}$)) и $r = 5$ мм при $E_n = 1$ Дж ($I_n \approx 85$ МВт/см², ($I_{1,0}$)) [5–7]. Рабочая апертура преобразующей среды должна превышать диаметр входного пучка на 10–20 %, поэтому в расчетах апертура кристаллов калий титанил арсената КTiOAsO₄ (КТА) составляла 12 мм × 12 мм. Длина (20 мм) и количество кристаллов были выбраны на основе результатов предыдущих исследований [5–7]. Кристалл КТА имеет низкий коэффициент поглощения холостой волны ($\lambda_{хв} = 3475$ нм), позволяющий не учитывать при расчетах тепловые эффекты и дающий потенциал для генерации излучения среднего ИК диапазона[3], при этом генерация сигнальной волны происходит на $\lambda_{св} = 1534$ нм. КТА обладает возможностью выполнения коллинеарного фазового синхронизма для ПГС в произвольных направлениях, имеет коэффициент нелинейного взаимодействия 3,6 пм/В, а также коэффициенты преломления $n_{хв}$, $n_{св}$ и $n_{en} - 1,8098, 1,7763$ и $1,7865$ соответственно [7].

2. Результаты численного моделирования

Согласно полученным результатам расчетов, когда пучок накачки имеет радиус $r = 3,5$ мм и $E_n \geq 0,2$ Дж, зависимости распределения интенсивностей сигнальной ($I_{св}$) и холостой ($I_{хв}$) волн достигают максимумов, а волны накачки ($I_{вн}$) – минимума из-за ее истощения. Вне зависимости от количества кристаллов в резонаторе положение экстремумов этих зависимостей внутри кристалла смещается к его входному торцу с увеличением как E_n , так и добротности резонатора по $R2_c$. В то же время при одном или двух кристаллах в резонаторе максимальные интенсивности сигнальной волны на выходе из кристаллов увеличиваются с ростом E_n от 0,2 мДж до 0,5 мДж для $R2_c = 50$ %, а также с увеличением $R2_c$ при фиксированной E_n . При трех кристаллах в резонаторе превышение критической интенсивности излучения и разрушение кристалла наступает при $E_n = 0,4$ Дж ($R2_c = 50$ %) (рис. 1, а), а для $E_n = 0,5$ Дж при $R2_c = 35$ % (рис. 1, б). Когда пучок накачки имеет $r = 4,3$ мм или 5 мм, при использовании одного кристалла $I_{св}$ и $I_{хв}$ слабо зависят от добротности резонатора и не превышают входную интенсивность импульсов накачки $I_{0,75}$ и $I_{1,0}$ (рис. 1, в). В обоих этих случаях, когда резонатор содержит два кристалла, $I_{св}$ возрастает с увеличением добротности (рис. 1, г), а при понижении добротности по сигнальной волне до $R2_c = 30$ %, допустимо увеличение E_n (рис. 1, д), вплоть до 1 Дж без повреждения кристалла (рис. 1, е). Однако размещении в резонатор трех кристаллов для пучка накачки с $r = 4,3$ мм уже при $R2_c = 50$ % ведет к резкому нарастанию интенсивностей излучений при изменении E_n от 0,2 Дж до 0,6 Дж, причем $I_{св}$ на выходе из первого кристалла уже превышает $I_{0,75}$. Этого можно избежать, если расширить входной пучок до радиуса 5 мм. При этом входная I_n и $I_{св}$ на выходе из первого кристалла будет ≈ 75 МВт/см² и ≈ 88 МВт/см² соответственно и, следовательно, кристалл не будет поврежден.

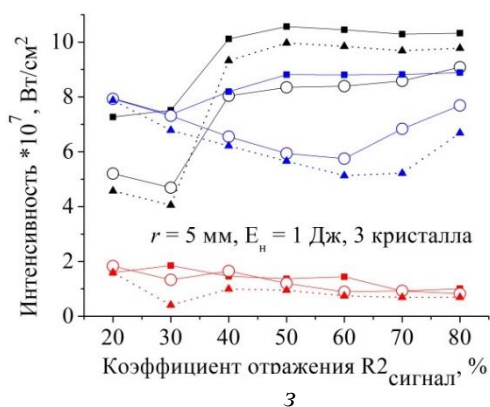
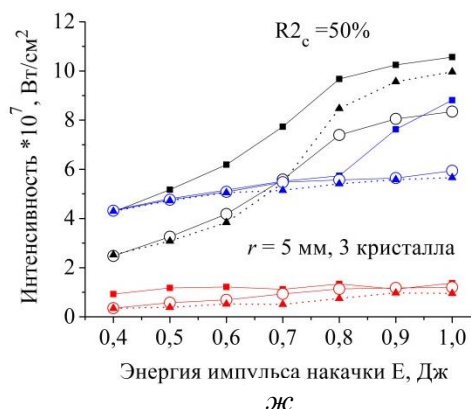
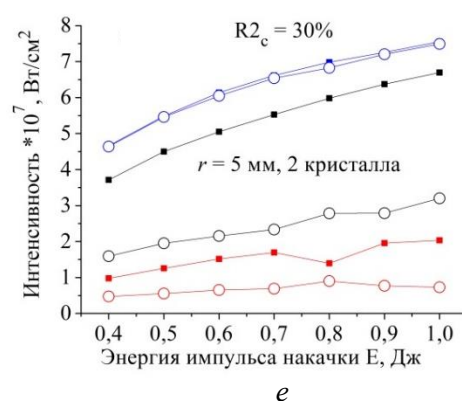
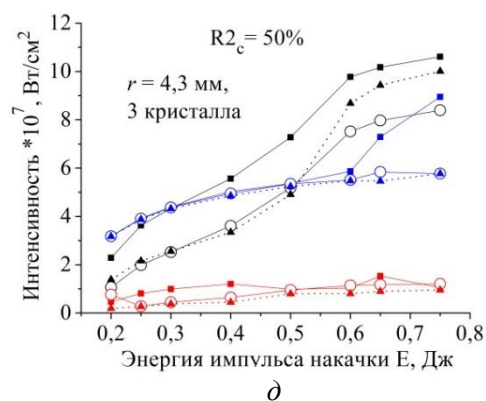
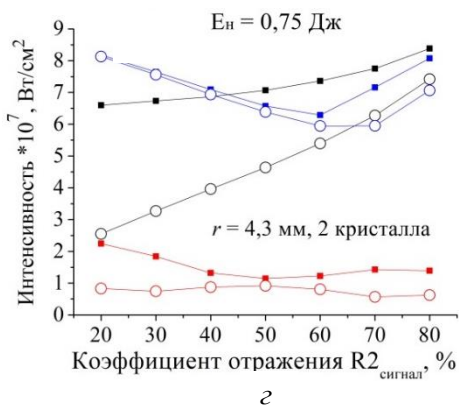
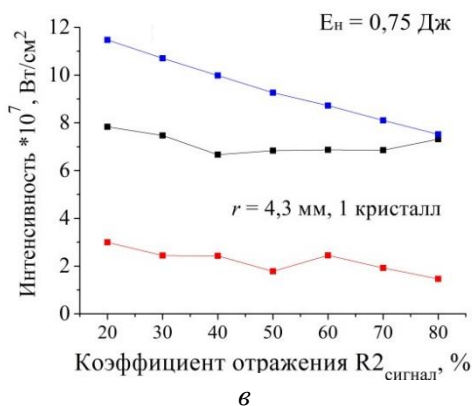
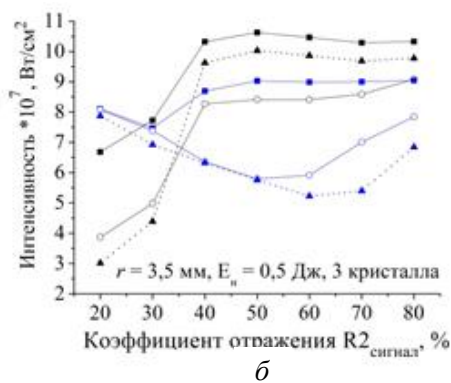
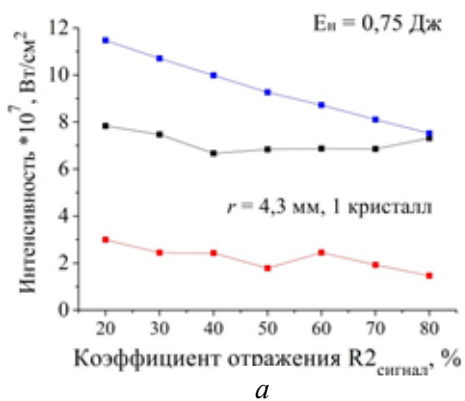


Рис. 1. Расчетные зависимости максимальных интенсивностей на выходе из кристаллов КТА в кольцевом резонаторе ПГС при варьировании условий преобразования.

Символы: квадрат – первый кристалл; круг – второй кристалл; треугольник – третий кристалл.

Линии: черная – сигнальная; синяя – накачка; красная – холостая; пунктирная – зависимость в третьем кристалле

В то же время распределение интенсивностей будет мало зависеть от $R2_c$ в диапазоне от 40 % до 80 %, но $I_{св}$ превысит 100 МВт/см² и может привести к пробою кристалла (рис. 1, ж и з). Следует также отметить, что при наличии в резонаторе двух или трех кристаллов также возможно обратное преобразование сигнальной и холостой волны в излучение накачки при $R2_c \geq 60\%$ (рис. 1, б, з, з).

Заключение

Численное моделирование распределения интенсивностей излучений, участвующих в процессе импульсной ПГС, внутри кольцевого трехзеркального резонатора с кристаллами КTiOAsO₄ показало, что при излучении накачки с диаметром пучка от 7 мм до 10 мм и с энергий импульсов от 0,5 Дж до 1 Дж при наличии в резонаторе трех кристаллов распределение интенсивностей мало зависит от добротности резонатора в диапазоне $R2_c$ от 40 % до 80 %, но $I_{св}$ превышает 100 МВт/см², что может привести к пробою первого кристалла. Место пробоя соответствует максимуму зависимости распределения $I_{св}$ внутри первого кристалла, которое вне зависимости от количества кристаллов в резонаторе смещается к его входному торцу с увеличением добротности резонатора и энергии входных импульсов накачки. Положение экстремумов позволяет оценить минимально необходимую длину первого кристалла для заданной конфигурации резонатора (количество кристаллов и их суммарная длина, добротность резонатора для сигнальной волны) и параметров излучения накачки (диаметр пучка, форма пространственного распределения, энергия импульсов и частота их следования).

Авторы благодарят за финансовую поддержку исследований БРФФИ и МФНТ (совместный белорусско-монгольский проект № Ф25МН-002), а также ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 1.2).

Библиографические ссылки

- 1 Dual-channel infrared OPO lidar optical system for remote sensing of greenhouse gases in the atmosphere: Design and characteristics / S. A. Sadovnikov [et al.] // Sensors International. 2025. Vol. 6. P. 100307.
- 2 High-Power KTiOAsO₄ Optical Parametric Oscillator at 300 Hz / Tao Li [et. al.] // Photonics. 2025. Vol. 12. P. 270 (9).
- 3 Near and mid-infrared optical vortex parametric oscillator based on KTA / M. Ababaike [et. al.] // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. P. 8013.
- 4 Development Progress of 3–5 μ m Mid-Infrared Lasers: OPO, Solid-State and Fiber Laser / Tingwei Ren [et al.] // Applied sciences. 2021. Vol. 11. P. 11451 (22).
- 5 Тепловые эффекты в безопасном для глаз кольцевом параметрическом генераторе света / А. А. Русак [и др.] // Известия НАН Беларуси, серия физико-математических наук. 2018. Т. 54, № 2. С. 210–219.
- 6 Импульсный параметрический генератор на основе кристаллов КТР с трехзеркальным кольцевым резонатором: численное моделирование / В. И. Дашкевич [и др.] // ЖПС. 2023. Т. 90, № 2. С. 135–142.
- 7 Параметрическая генерация света в двуосном кристалле КТА при накачке излучением YAG:Nd-лазера в произвольных направлениях / В. И. Дашкевич [и др.] // Известия НАН Беларуси, серия физико-математических наук. 2021. Т. 57, № 3. С. 374–384.
- 8 Nanosecond laser induced damage thresholds in KTiOPO₄ and Rb:KTiOPO₄ at 1 μ m and 2 μ m / R. S. Coetzee [et al.] // Opt. Mater. Express. 2015. Vol. 5. P. 2090 (6).