

УДК 535.33/34

В. С. Айрапетян¹, Т. А. Широкова¹, П. Г. Пасько²

¹ Сибирская государственная геодезическая академия
ул. Плахотного, 10, Новосибирск, 630108, РФ

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, РФ

E-mail: v.s.ayrapetyan@ssga.ru

ИК ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР С ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Проведены расчетные и экспериментальные исследования генерационных характеристик ИК параметрического генератора света (ПГС) на нелинейном кристалле LiNbO₃. Реализованная внерезонаторная кольцевая схема ПГС со сменными выходными зеркалами, позволяет преобразование частоты накачки в параметрическую генерацию до 30 % во всем диапазоне перестройки от 1,41 до 4,24 мкм.

Ключевые слова: параметрический генератор света, лазер накачки, нелинейный кристалл, кольцевой резонатор.

Задача создания ИК параметрических лазеров, одновременно обладающих высокой энергией и малой расходимостью излучения, позволяющих плавную и (или) дискретную перестройку частоты, является актуальной для многих практических применений [1].

Один из наиболее эффективных методов перестройки основной частоты излучения YAG:Nd³⁺-лазера ($\lambda = 1,064$ мкм) в ближний и средний ИК диапазон ($\lambda = 1,41 \div 4,24$ мкм) основан на использовании нелинейного кристалла LiNbO₃ [2; 3].

Исследования простейших линейных схем резонаторов параметрических генераторов света (ПГС) показали, что при удовлетворительных энергетических показателях расходимость излучения таких генераторов довольно высока и сильно возрастает с увеличением энергии накачки [4–6].

Давно и успешно используется излучение сигнальной частоты ($\lambda = 1,41 \div 1,69$ мкм) ИК параметрического лазера на основе LiNbO₃. Некоторые зарубежные коммерческие фирмы и организации в настоящее время производят серийные ИК ПГС на LiNbO₃ с областью перестройки ~ 400 нм и выходной

энергией ~ 5 мДж при частоте следования импульсов 10 Гц (www.optotek.com).

Однако параметрические лазеры на LiNbO₃ с перестройкой частоты в средний инфракрасный диапазон ($\lambda = 1,8 \div 4,2$ мкм) до сих пор еще не вышли за рамки исследовательских лабораторий.

Одно из главных ограничений диапазона перестройки частоты, максимальной выходной энергии и расходимости излучения холостой волны параметрических лазеров обусловлено неоптимальностью коэффициента отражения зеркал резонатора ПГС. Как показывают теоретические [7] и экспериментальные исследования [8; 3], энергия как сигнальной, так и холостой волны достигает максимальной величины при оптимальных значениях коэффициента отражения выходного зеркала кольцевого резонатора ПГС. Для достижения высокого энергосъема излучения используются схемы ПГС с несколькими активными элементами из нелинейных кристаллов (НК), что приводит к повышению стоимости параметрических лазеров.

В данной работе проведено расчетное и экспериментальное исследование генерации

онных характеристик ИК ПГС с активным элементом из нелинейного кристалла LiNbO_3 , собранного по схеме трехзеркального кольцевого резонатора.

Схема трехзеркального кольцевого резонатора позволяет реализовать параметрическую генерацию света в режиме бегущей волны с вращением изображения после каждого обхода. Это существенно компенсирует неоднородность поперечной структуры пучка излучения ПГС, а также ослабляет влияние оптических неоднородностей пучка накачки на кристалл LiNbO_3 .

Для описания параметрической генерации модулированных (импульсов) сигнальной и холостой волн, возбуждаемых в НК при взаимодействии с импульсом излучения лазера накачки, воспользуемся системой укороченных уравнений [7; 9–11]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_1} \frac{\partial A_1}{\partial t} &= -\delta_1 A_1 + \sigma A_2^* A_3 \exp(-i\Delta z) \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_2} \frac{\partial A_2}{\partial t} &= -\delta_2 A_2 + \sigma A_3 A_1^* \exp(-i\Delta z) \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} + \frac{1}{v_3} \frac{\partial A_3}{\partial t} &= -\delta_3 A_3 + \sigma A_1 A_2 \exp(-i\Delta z) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $A_j(z, t)$ ($j = 1, 2, 3$) – амплитуда сигнальной, холостой волн и волны накачки соответственно; A_j^* – сопряженная амплитуда сигнальной, холостой волн и волны накачки; v_j – групповые скорости волн, δ_j – коэффициент поглощения НК (при отсутствии

поглощения $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta = -\frac{1}{l} \ln T_{кр}$; $T_{кр}$ – пропускание НК на данной длине волны; l –

длина НК LiNbO_3); $\sigma = \frac{\omega_j d_{эф}}{n_j c}$ – нелинейный

коэффициент НК; $d_{эф}$ – эффективный нелинейный коэффициент, который определяется геометрией взаимодействия волн в кристалле; n_j – показатель преломления НК; c – скорость света в вакууме; ω_j – частота сигнальной, холостой волн и волны накачки, удовлетворяющая условиям синхронизма:

$$\left. \begin{aligned} \omega_n &= \omega_c + \omega_x \\ k_n &= k_c + k_x + \Delta \end{aligned} \right\},$$

где k_n , k_c и k_x – волновые числа частоты накачки, сигнальной и холостой волн соответственно.

Решение системы уравнений (1) упрощается с учетом условий проведения данных исследований: апертура нелинейного кристалла намного больше диаметра пучка лазера накачки, волновая расстройка $\Delta = 0$, пространственно-временная модуляция пучка лазера накачки имеет гауссовскую форму, а его амплитуда определяется выражением

$$A_3(r, 0, t) = A_{30} \exp \left[-2 \ln 2 \left(\frac{t}{\tau_H} \right)^2 - \left(\frac{r}{\rho_0} \right)^2 \right],$$

где

$$A_{30} = \frac{1}{\sigma} \left[2\delta + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{R_1 R_2 R_3} \right],$$

A_{30} – амплитуда излучения лазера накачки в центре луча и в максимуме импульса; τ_H – длительность импульса накачки по уровню половины максимума интенсивности; ρ_0 – радиус перетяжки пучка накачки в НК; R_1 , R_2 и R_3 – коэффициенты отражения зеркал резонатора; r – радиус-вектор; t – время обхода луча в кольцевом резонаторе с периметром L определяется формулой

$$t = \frac{nl + (L - l)}{c}.$$

С целью оптимизации геометрических и оптических параметров НК и кольцевого резонатора, а также исследования генерационных характеристик ПГС после упрощения дифференциальных уравнений (1) варьированием параметров τ_j , A_{30} , L , δ_j , l , R_1 , R_2 и R_3 с помощью ПК в программной среде Matlab был реализован расчет интенсивности выходного излучения ИК ПГС. При неизменных значениях τ_j , A_{30} , L , δ_j , l , R_1 и R_3 , изменяя коэффициент отражения R_2 зеркала M_2 , можно достичь оптимального режима работы ИК ПГС.

В таблице приведены оптические параметры выходного зеркала резонатора ПГС для различных длин сигнальной и холостой волн. Видно, что выходная энергия как сигнальной, так и холостой волны практически не изменяется в пределах погрешности эксперимента при перестройке частоты излучения ПГС. Проверка расчетов выполнена на экспериментальной установке, оптическая схема которой представлена на рис. 1. Принцип действия, технические параметры и подробное описание экспериментальной установки описаны в работе [4; 5].

Расчетные и экспериментальные зависимости значения энергии выходного излуче-

Оптические параметры ИК ПГС

Параметр	Зеркало M_2			
	1	2	3	4
Длина сигнальной волны λ , мкм	1,45	1,51	1,62	1,67
Коэффициент отражения сигнальной волны $R_2 = R_c$, %	67,3	72,7	77,1	80,2
Энергия сигнальной волны E_c , мДж	37	38	39	38
Длина холостой волны λ , мкм	2,93	3,42	3,78	4,07
Коэффициент отражения холостой волны $R_2 = R_x$, %	55,7	57,8	59,6	62,2
Энергия холостой волны E_x , мДж	18	21	20	17

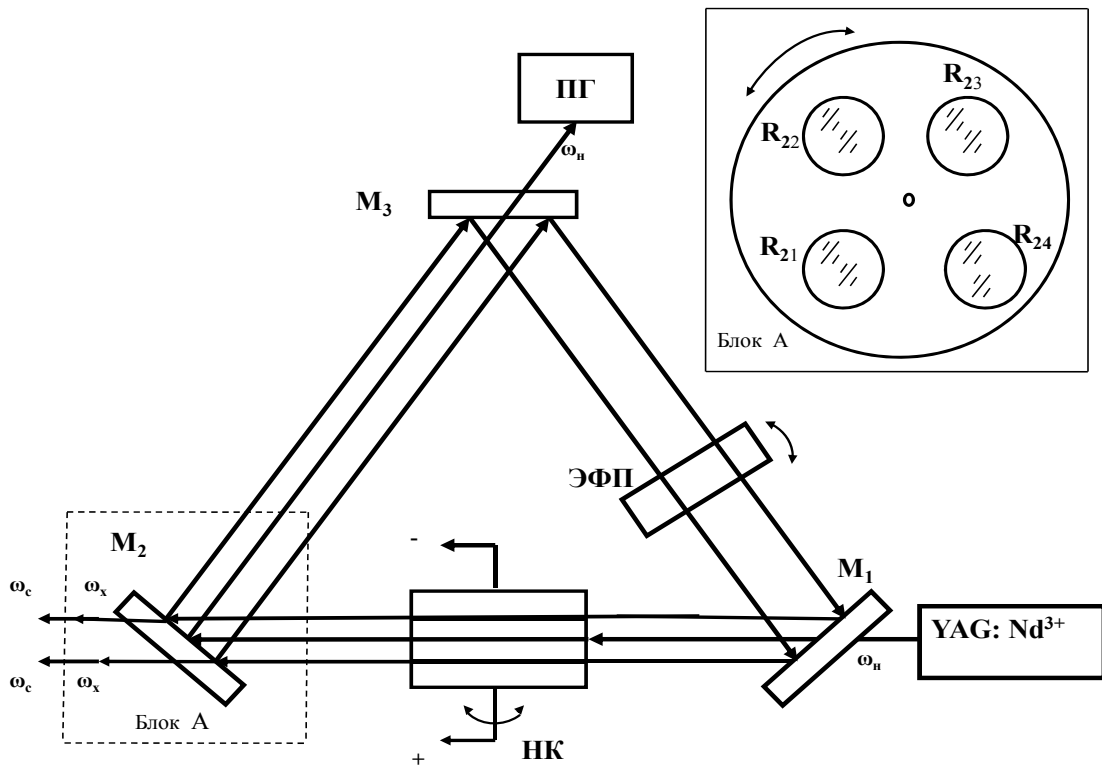


Рис. 1. Оптическая схема кольцевого резонатора ПГС:

YAG: Nd³⁺ – лазер накачки; НК – нелинейный кристалл из LiNbO₃; M₁, M₂, M₃ – зеркала; ЭФП – эталон Фабри – Перо; ПГ – поглотитель излучения лазера накачки; ω_c , ω_x , ω_n – сигнальная и холостая частоты ПГС и частота лазера накачки; на вставке юстировочный столик с четырьмя зеркалами с различными коэффициентами отражения R₂₁, R₂₂, R₂₃ и R₂₄

ния ИК ПГС от длины волны сравнивались с ранее полученными результатами [4; 5; 12].

На рис. 2 представлена зависимость излучения энергии ПГС от длин сигнальной

(рис. 2, а) и холостой (рис. 2, б) волн. Кривая 1 построена на основе выполненных ранее исследований [4] при условии наличия в ПГС резонатора с одним зеркалом M₂

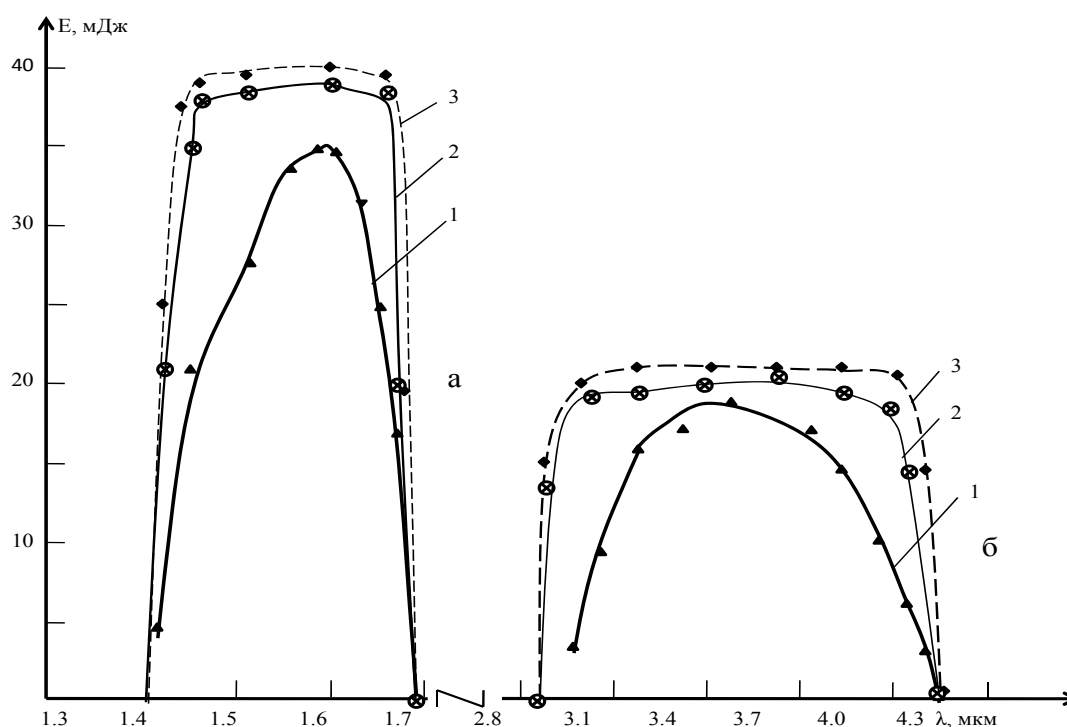


Рис. 2. Зависимость энергии излучения ОПГ от длины волны перестройки:

1 – данные из работы [4] для ОПГ с одним зеркалом; 2 – экспериментальная кривая для ОПГ со сменными зеркалами; 3 – расчетная кривая для ОПГ со сменными зеркалами

с коэффициентом отражения R_2 . На графиках 2 и 3 отображены результаты определения энергии выходного излучения ОПГ в зависимости от длины волны, полученные соответственно экспериментально и из расчетов при условии использования в ОПГ кольцевого резонатора (см. рис. 1) со сменными зеркалами с коэффициентами отражения R_{21} , R_{22} , R_{23} и R_{24} . Вычисленные из решения системы уравнений (1) оптимальные значения коэффициента отражения (R_2) выходного зеркала резонатора ОПГ для разных длин сигнальной и холостой волн показывают, что выходную энергию сигнальной волны можно увеличить с 2 до 5 раз, а энергию холостой волны – с 3 до 4 раз. Для этого на юстировочном столике держатель зеркала M_2 был заменен револьверным механизмом с четырьмя сменными зеркалами.

Из рис. 2 видно, что эффективность преобразования, определяемая соотношением $\eta = (E_c + E_x)/E_n$, составляет порядка 30 % во всем диапазоне перестройки длины волны ($\lambda = 1,41\text{--}4,24$ мкм) излучения ОПГ. Результаты экспериментов согласуются с рас-

четными данными, в пределах погрешности измерений, что подтверждает правильность проведенных расчетов интенсивности ОПГ.

Таким образом, по результатам исследований генерационных характеристик ИК ОПГ на основе НК LiNbO_3 , выполненных с использованием современных технологических и компьютерно-программных разработок, был создан и испытан высокоэффективный ИК ОПГ с плавной и (или) дискретной перестройкой частоты излучения. Благодаря своим техническим характеристикам данный ИК ОПГ может быть использован как в лидарных комплексах, так и при решении различных спектроскопических задач фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Weber H. Frequency Tuning a Mid-Infrared Optical Parametric Oscillator by the Electro-Optic Effect // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 1999. Vol. 3826. P. 2.
2. Ewbank M. D., Rosker M. J. Frequency Tuning a Mid-Infrared Optical Parametric Os-

cillator by the Electro-Optic Effect // J. Opt. Soc. Am. B14. 1997. Vol. 3. P. 663–668.

3. Наумов В. Л., Онищенко А. М., Подставкин А. С., Шестаков А. В. Внерезонаторная параметрическая генерация света на $\lambda = 1,5$ и 2 мкм с накачкой излучением лазеров на АИГ: Nd^{3+} // Квант. электрон. 2002. Vol. 32. No. 3. P. 225–228.

4. Айрапетян В. С. Внерезонаторная параметрическая генерация с плавной и (или) дискретной перестройкой частоты излучения // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2009. Т. 4, вып. 3. С. 20–24.

5. Айрапетян В. С., Широкова Т. А. Кольцевая схема резонатора параметрического генератора света // Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии: Сб. материалов: В 2 т. Новосибирск, 2012. Т. 2. С. 269–275.

6. Brown M. K., Bowers M. S. High Energy near Diffraction Limited Output from Optical Parametric Oscillators Using Unstable Resonators // Solid State Laser VI. Proc. SPIE 2986. 1997. P. 113.

7. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. М.: Радио и связь, 1982. С. 352.

8. Ayrapetyan V. S., Apresyan G. M., Sargsyan K. A., Sargsyan T. K. Tunable OPO for Differential Absorption LIDAR's // Abstract of Conference LAT 2002, LMI 72. M., 2002. P. 87–89.

9. Яриш А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М., 1987. 378 с.

10. Baumgartner R. A., Byer L. R. High Energy Near Diffraction Limited Output from Optical Parametric Oscillators Using Unstable Resonators // IEEE J. Quant. Electron. 1979. Vol. 15. P. 432–444.

11. Bjorkholm J. E. Thermal Effects of a Continuously Pumped Nd^{3+} YAG Laser // IEEE J. Quant. Electron. 1971. Vol. 7. P. 109–118.

12. Дон А. К., Митин К. В., Савельев М. А., Шебетева Н. И. Оптический параметрический генератор с перестройкой в среднем ИК-диапазоне на кристалле тиагалата ртути // Научная сессия МИФИ – 2007. Т. 4. С. 18–19.

Материал поступил в редколлегию 21.08.2013

V. S. Ayrapetyan, T. A. Shirokova, P. G. Pasko

THE PARAMETRIC IR LASERS WITH HIGH RADIATION EFFICIENCY OVER THE ENTIRE RANGE OF FREQUENCY TUNING

Computational and experimental studies of the lasing characteristics of IR optical parametric oscillator (OPO) on the nonlinear crystal LiNbO_3 were performed. Implemented outside the cavity ring scheme OPO with replaceable output mirrors allows the conversion of the pump frequency in parametric generation to 30 % over the tuning range from 1.41 to 4.24 microns.

Keywords: optical parametric oscillator, the pump laser, the nonlinear crystal ring resonator.