

## ВНЕРЕЗОНАТОРНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ С ПЛАВНОЙ И (ИЛИ) ДИСКРЕТНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе нелинейного кристалла  $\text{LiNbO}_3$  получена параметрическая генерация света с плавной и (или) дискретной перестройкой длины волны излучения в диапазоне  $1,41 \div 4,24$  мкм, причем дискретная перестройка регулируется от 0 до 12 нм. Кольцевая схема резонатора параметрического генератора света позволяет получить значения выходной энергии излучения до 50 мДж. Ввод в резонатор эталона Фабри – Перо сужает ширину излучения до  $0,7 \text{ см}^{-1}$ .

*Ключевые слова:* параметрический генератор света, нелинейный кристалл, эталон Фабри – Перо, аналого-цифровой преобразователь

### Введение

Перестраиваемые лазерные источники света с длинами волн излучения  $1,4\text{--}4,5$  мкм представляют большой интерес для практического применения, в частности в задачах спектроскопии дистанционного зондирования компонентов атмосферы. Наибольшее внимание привлекают перестраиваемые лазеры на основе параметрической генерации света с использованием нелинейных кристаллов. Традиционно в качестве источника накачки параметрического лазера применяются неодимсодержащие импульсные лазеры, а в качестве преобразователя частоты используются нелинейные кристаллы (НК) –  $\text{KNbO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ , КТР, КТА и др. [1]. Важной характеристикой параметрических генераторов света (ПГС), используемых в дистанционном зондировании компонент атмосферы, является низкая угловая расходимость в сочетании с узкой спектральной шириной и высокой энергией выходного излучения ПГС.

К настоящему времени при исследовании характеристик внerezонаторных ПГС на основе  $\text{LiNbO}_3$  реализовано большое количество оптических схем [2–7]. Для простейших линейных схем резонаторов в ПГС [3; 4] исследования продемонстрировали, что при удовлетворительных энергетических показателях расходимость излучения таких генераторов довольно велика и сильно увеличивается с ростом энергии накачки.

Использование конфокального неустойчивого резонатора в ПГС [7; 8] обеспечивает высокое качество выходного пучка с расходимостью, близкой к дифракционной. Однако такие резонаторы особо чувствительны к разъюстировке и пригодны только для обеспечения генерации на фиксированной длине волны. Теоретические исследования оптических резонаторов ПГС [9] и их компьютерное моделирование [10] показывают, что резонаторы с вращением изображения обеспечивают высокое качество выходного пучка.

Результаты наших экспериментальных исследований [11], а также ряд работ, например [6], показывают, что кольцевая трехзеркальная схема резонатора ПГС обеспечивает низкую расходимость пучка при высоких энергетических характеристиках.

Цель наших исследований заключается в создании высокоэффективного ПГС, имеющего возможность осуществления плавной и (или) дискретной перестройки длины волны выходного излучения в диапазоне  $1,41 \div 4,24$  мкм. Для обеспечения вышеупомянутых типов перестройки излучения ПГС нами был выбран НК  $\text{LiNbO}_3$ , который обладает высокими нелинейными и электрооптическими коэффициентами. Выбор трехзеркального кольцевого резонатора обусловлен преимуществом данной оптической схемы по сравнению с линейными, так как позволяет реализовать параметрическую генерацию в режиме бегущей волны. Трех-

зеркальный резонатор менее чувствителен к разъюстировке. В таком резонаторе нет стоячих волн, и интенсивность излучения в нем существенно более однородна, чем в линейных резонаторах. Последнее обстоятельство особенно важно из-за относительно низкого оптического пробоя кристалла ниобата лития ( $300 \text{ МВт/см}^2$ ). В трехзеркальном резонаторе после каждого обхода осуществляется вращение изображения. Это существенно компенсирует неоднородность поперечной структуры пучка генерации ПГС, а также ослабляет влияние оптических неоднородностей пучка накачки на кристалл  $\text{LiNbO}_3$ .

### Экспериментальная часть

Для накачки ПГС используется излучение лазера с активным элементом  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  размерами  $\varnothing 6,3 \times 100 \text{ мм}$ . Лазер накачки собран по схеме телескопического неустойчивого резонатора. Энергия излучения на длине волны  $\lambda = 1,064 \text{ мкм}$  в импульсе составляла  $180 \text{ мДж}$ , длительность импульса излучения –  $10 \text{ нс}$ . Оптимальная частота следования импульсов, при которой энергия незначительно отличалась от средней энергии в режиме редко повторяющихся импульсов, установилась на уровне  $20\div 30 \text{ Гц}$ . Следует отметить, что при повышении частоты повторения импульсов ( $> 30 \text{ Гц}$ ) происходит сильная энергетическая нестабильность (более  $30 \%$ ). Излучение линейно поляризовано в горизонтальной плоскости. Распределение интенсивности пучка в сечении имеет вид концентрических колец.

На рис. 1. приведена оптическая схема трехзеркального кольцевого резонатора ПГС. Активный элемент (АЭ) из НК  $\text{LiNbO}_3$  размерами  $10 \times 10 \times 30 \text{ мм}$  ориентирован следующим образом:  $\theta = 47^\circ$ ,  $\varphi = -90^\circ$ . Диаметр пучка накачки на входе в НК равен  $6 \text{ мм}$ . НК установлен на вращательной платформе с шаговым двигателем (ШД), точность вращения и размер шага соответствуют  $3 \text{ arcsec}$  и  $0,03 \text{ см}^{-1}$ . Вращение АЭ вокруг вертикальной оси обеспечивает плавную перестройку длины волны выходного излучения ПГС. Для компьютерного управления ШД была создана специальная программа в среде  $\text{MATLAB-6}$ , где размер шага ШД соответствовал спектральной ширине излучения ПГС. При соответствующей

установке интерфейса персонального компьютера (ПК) происходит сканирование спектрального диапазона излучения ПГС. Время сканирования всего спектрального диапазона перестройки ПГС ( $1,41\text{--}1,85, 2,9\text{--}4,2 \text{ мкм}$ ) равнялось  $5,2 \text{ с}$ , а размер шага плавной перестройки соответствовал спектральной ширине излучения ПГС ( $0,7 \text{ см}^{-1}$ ).

Дискретная перестройка длины волны ПГС достигается путем подачи на нерабочие поверхности НК постоянного напряжения, величина которого и определяет шаг дискретной перестройки. В данной работе максимальное значение постоянного напряжения равнялось  $4500 \text{ В}$ . Это значение можно было изменять через каждые  $50 \text{ В}$ , что соответствует минимальному шагу дискретной перестройки длины волны ПГС, равному  $0,133 \text{ нм}$ . Таким образом, при отсутствии внешнего поля ( $E = 0$ ) дискретной перестройки нет, а при напряжении внешнего поля  $U = 4500 \text{ В}$  область дискретной перестройки составляет  $12 \text{ нм}$ .

Смещение длины волны излучения ПГС за счет температурного нагрева НК программно контролируется и компенсируется с погрешностью до  $0,1^\circ \text{C}$ . Для сужения спектральной ширины линии излучения (если это необходимо) предусмотрен ввод в резонатор ПГС селективирующего фильтра, в качестве которого использовался эталон Фабри – Перо (ЭФП), установленного на вращательной платформе. Синхронным вращением АЭ и ЭФП достигается сужение спектральной ширины излучения ПГС во всем частотном диапазоне перестройки. ЭФП действует непосредственно на сигнальную волну, автоматически сужая и холостую волну. ЭФП устанавливается в той части резонатора ПГС, где отсутствует мощное излучение волны накачки. Таким образом обеспечивается наиболее благоприятное условие для его нормальной работы.

На рис. 2 приведена оптическая схема измерения длины волны и ширины спектра излучения ПГС. Определение абсолютного значения измеряемой длины волны ( $\lambda_{\text{изм}}$ ) ПГС выполняется путем сопоставления  $\lambda_{\text{изм}}$  с известной линией поглощения газа. Для этого часть излучения ПГС ( $\sim 3 \%$ ), отражаясь от плоскопараллельной  $\text{CaF}_2$ -пластинки  $3$ , попадает в диффузно-рассеивающую сферу  $\delta$  с двумя идентичными фотоприемника-

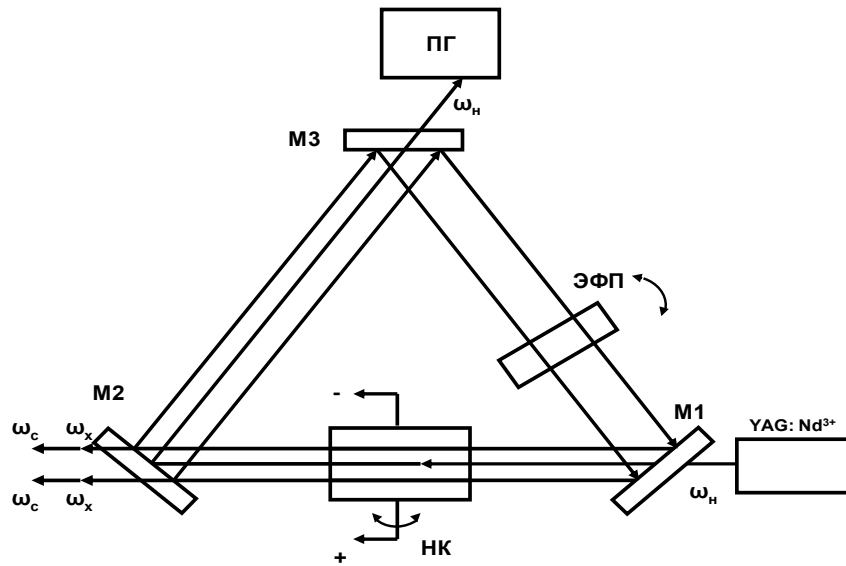


Рис. 1. Оптическая схема кольцевого резонатора ПГС:  
 YAG: Nd<sup>3+</sup> – лазер накачки; НК – нелинейный кристалл из LiNbO<sub>3</sub>; M1, M2, M3 – зеркала;  
 ЭФП – эталон Фабри – Перо; ПГ – поглотитель излучения лазера накачки;  
 $\omega_c$ ,  $\omega_x$ ,  $\omega_n$  – сигнальная и холостая частоты и частота лазера накачки

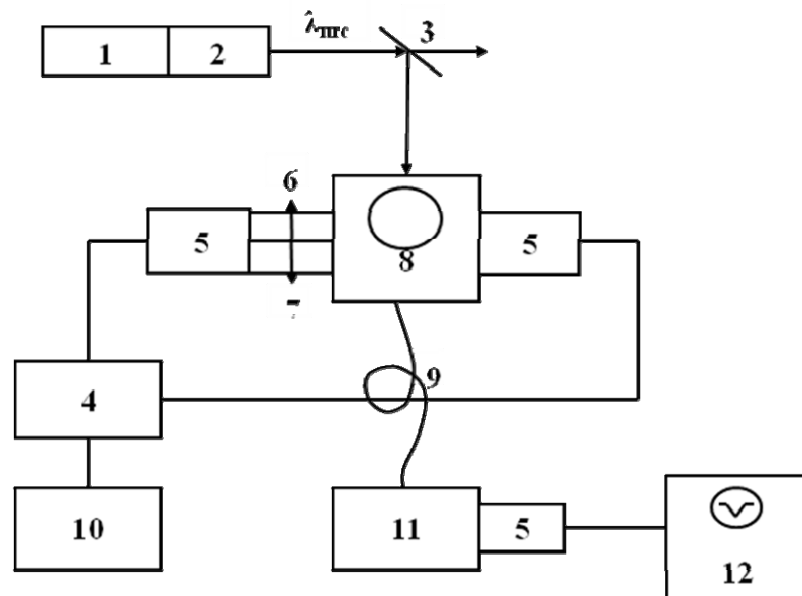


Рис. 2. Оптическая схема измерения длины волны и ширины излучения спектра ПГС:  
 1 – лазер накачки YAG: Nd<sup>3+</sup>; 2 – узел ПГС; 3 – плоскопараллельная пластина из CaF<sub>2</sub>; 4 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 5 – фотоприемник ФП-219 из PbSe с предусилителем; 6 – кювета с метаном; 7 – кювета с газом; 8 – диффузно-рассеивающая сфера; 9 – ИК-световод из CaF<sub>2</sub>; 10 – ПК; 11 – монохроматор МДР-12;  
 12 – осциллограф С1-91

ми из PbSe 5. Один из фотоприемников используется для математического вычитания энергетических нестабильностей. На другой фотоприемник рассеянное излучение падает, проходя через кювету 7 с известным газом (в данном случае метаном с чистотой 90 %, при давлении 1 атм). Далее электрические сигналы от фотоприемников поступают на два входа аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 4, выход которого соединен с ПК 10. На экран монитора выводится колебательно-вращательный спектр поглощения  $\nu_3$  полосы метана, центральная  $Q$ -ветвь которой является репером. Для калибровки длины волны ПГС на рассеивающей сфере предусмотрена возможность установления ИК-световода 9 марки GF F 160, через который лазерное излучение подается на входную щель монохроматора МДР-12 11. Выходная энергия излучения ПГС измерялась калориметрическим измерителем энергии S310 (США).

### Результаты и обсуждение

Исследования энергетических характеристик излучения ПГС были выполнены в предельных температурных режимах окружающей среды как в лабораторных условиях ( $T = +30\text{ }^\circ\text{C}$ ), так и в открытой атмосфере ( $T = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ). В данных условиях после 30 минут работы лазера с частотой следования импульсов 25 Гц энергетическая нестабильность не превышала  $\pm 6\%$ .

На рис. 3 представлена зависимость энергии излучения ПГС от длины сигнальной ( $\lambda = 1,42 \div 1,75\text{ мкм}$ ) и холостой ( $\lambda = 2,9 \div 4,2\text{ мкм}$ ) волн. Резкий спад энергии сигнальной волны в области 1,69 мкм и отсутствие генерации холостой волны в области 2,85 мкм связаны с сильным поглощением ниобата лития в области 2,85 мкм. В реализованной схеме ПГС достигается суммарный коэффициент преобразования 27 %. Численное значение угловой расходимости пучка вычислялось, согласно [9], как отношение диаметра диафрагмы, в которую попадает 86 % полной энергии импульса излучения ПГС, к фокусному расстоянию линзы ( $d/l$ ). Причем диафрагма была установлена в плоскости линзы. Опираясь на известные свойства тонкой линзы, можно утверждать, что результаты измерений пространственных параметров пучка позволяют определять угловое распределение лазерного излучения в дальней зоне. Поскольку генерация ПГС представляется в виде суперпозиции сигнальной и холостой

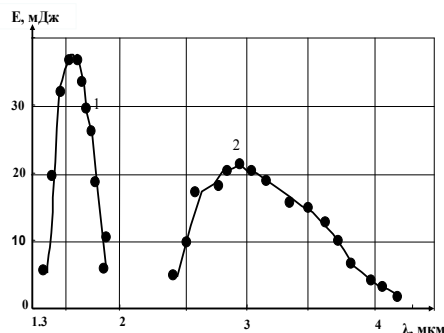


Рис. 3. Распределение энергии излучения ПГС в сигнальной (1) и холостой (2) волнах

волн, то знание параметров пучка в дальней зоне позволяет оценивать характер распределения энергии в отдельных волнах. Экспериментально полученные значения расходимости сигнальной и холостой волн излучения ПГС не превышали 3,5 мрад во всем диапазоне генерации (см. рис. 3). Это значение существенно не изменялось при незначительном варьировании длины резонатора. Полученный результат совпадал с расчетом расходимости излучения по методу  $M^2$ , показывающему, во сколько раз расходимость пучка превышает дифракционный предел [12].

На рис. 4. представлены спектры излучения ПГС, полученные для произвольной холостой волны. Рис. 4, а соответствует спектру излучения ПГС, когда ЭФП не внесен в резонатор. Рис. 4, б показывает насколько сужается спектр излучения ПГС при вводе в резонатор ЭФП. Аналогичные спектры были получены во всем диапазоне длин волн перестройки ПГС. Сужение полуширины спектра излучения ПГС варьировалось от 4 до 5 раз. При этом изменение энергии излучения ПГС было незначительным.

### Заключение

Приведем некоторые основные параметры ИК – ПГС:

- область плавной перестройки 1,42  $\div$  1,85; 2,9  $\div$  4,2 мкм;
- величина дискретной перестройки 0  $\div$  12 нм;
- суммарная энергия в импульсе до 50 мДж;

- расходимость излучения  $\leq 3,5$  мрад;
- спектральная ширина излучения  $0,7 \div 0,9 \text{ см}^{-1}$ ;
- частота следования импульсов  $25 \div 30$  Гц;
- длительность импульса 10 нс.

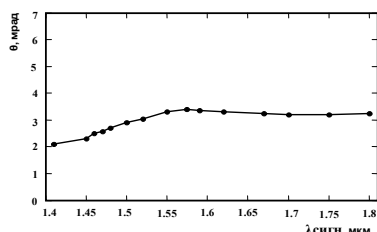


Рис. 4. Зависимость угла расходимости излучения ПГС ( $\theta$ ) от длины сигнальной волны ( $\lambda_{\text{сигн}}$ )

Таким образом, по результатам исследований нелинейно-оптических свойств кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и КТП, а также на основе использования современных технологических и компьютерно-программных разработок был создан и испытан ИК – ПГС с плавной и (или) дискретной перестройкой частоты излучения. Благодаря своим характеристикам данный ИК – ПГС может быть использован как в лидарных комплексах, так и при решении различных спектроскопических задач фундаментального исследования.

### Список литературы

1. *Dmitriev V. G., Gurzadyan G. G., Nikogosyan D. N.* Handbook of Nonlinear Optical Crystals. N. Y.: Springer, 1999.
2. *Ewbank M. D., Rosker M. J.* Frequency Tuning a Mid – Infrared Optical Parametric Oscillator by the Electro-Optic Effect // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1997. Vol. 14. No. 3. P. 663–668.
3. *Smith A. V., Alford W. J., Raymond T. D., Bowers M. S.* Comparison of Numerical Model with Measured Performance of a Seeded Nanosecond KTP Optical Parametric Oscillator // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1995. Vol. 12. P. 2253.
4. *Marshall L. R., Hay A. D., Burnham R.* Tech. Dig. Papers Adv. CLEO'90 postdeadline paper CDPO. 1990. 35 – 1.
5. *Harutjunyan A. H., Papyan G. A., Sargsyan S. S., Sargsyan T. K.* High Efficiency Intrigately Optical Parametric Oscillator based on a Lithium Niobate Cristal // *ICONO'91, I, PWH12.* Leningrad, 1991. P. 163–167.
6. *Наумов В. Л., Онищенко А. М., Подставкин А. С., Шестаков А. В.* Внезонаторная параметрическая генерация света на  $\lambda = 1,5$  и  $2 \text{ мкм}$  с накачкой излучением лазеров на АИГ: $\text{Nd}^{3+}$  // *Квант. Электрон.* 2002. Т. 32, № 3. С. 225–228.
7. *Водчиц Л. И., Дашкевич О. И., Казак Н. С., Павленко В. К., Покрышкин В. И., Петрович И. П., Руховец В. В., Красковский А. С., Орлович В. А.* Безопасный для глаз источник излучения на основе параметрического генератора света // *Журнал прикладной спектроскопии.* 2006. Т. 73, № 2. С. 255–259.
8. *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 / Ed. by R. Scheps.* N. Y., 1997. P. 113.
9. *Ананьев Ю. А.* Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990. 211 с.
10. *Smith A. V., Bowers M. S.* Image – Rotating Cavity Designs for Improved Beam Quality in Nanosecond Optical Parametric Oscillators // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2001. Vol. 18. No. 5. P. 701–706.
11. *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.
12. *Hodgson N., Weber H.* Optical Resonator: Fundamentals, Advanced, Concepts and Application. L.: Springer Verlag, 1997. 226 p.

Материал поступил в редколлегию 30.03.2009

V. S. Airapetyan

### EXTRATEVITY PARAMETRIC GENERATION WITH CONTINUOUS AND (OR) DISCRETE TUNING OF RADIATION FREQUENCY

A  $\text{LiNbO}_3$  Optical Parametric Oscillator (OPO) having the possibility of continuous tuning in the spectral range of  $1.42 \div 4.24 \text{ μm}$  and shifting up to  $12 \text{ nm}$  is created and investigated. The OPO resonator ring circuit provided the output energy of up to  $50 \text{ mJ}$ . Radiation bandwidth narrowing of up to  $0.7 \text{ cm}^{-1}$  by introducing the Fabry – Perrot etalon into the OPO resonator has been obtained.

*Keywords:* optical parametric oscillator, Fabry – Perrot etalon, analog digital converter.