

Параметрический генератор света с плавной и(или) дискретной перестройкой частоты излучения

В.С. Айрапетян*

Сибирская государственная геодезическая академия
630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10

Поступила в редакцию 26.05.2008 г.

На основе нелинейного кристалла LiNbO_3 получена параметрическая генерация света с плавной и(или) дискретной перестройкой длины волны излучения в диапазоне 1,41–4,24 мкм, причем дискретная перестройка регулируется от 0 до 12 нм. Кольцевая схема резонатора параметрического генератора света позволяет получать значения выходной энергии излучения до 45 мДж. Ввод в резонатор эталона Фабри – Перо сужает ширину излучения до $0,7 \text{ см}^{-1}$.

Ключевые слова: инфракрасный, нелинейные кристаллы, параметрический генератор света, шаговый двигатель, эталон Фабри – Перо, персональный компьютер, аналого-цифровой преобразователь.

Введение

Перестраиваемые источники лазерного излучения в ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазонах длин волн (1,41–4,24 мкм) представляют большой практический интерес. В частности, широкое применение они находят в задачах спектроскопии дистанционного зондирования молекул газов. Наибольшее внимание привлекают перестраиваемые лазеры на основе параметрической генерации света с использованием нелинейных кристаллов. Традиционно в качестве источника накачки применяются неодимсодержащие импульсные лазеры, а для нелинейного преобразования частоты используются кристаллы LiNbO_3 , KNbO_3 , КТР, КТА и др. [1]. Важной характеристикой параметрического генератора света (ПГС), используемой в дистанционном зондировании молекул газов, считается низкая угловая расходимость, сочетающаяся с узкой спектральной шириной и высокой энергией выходного излучения.

К настоящему времени реализовано большое количество оптических схем резонаторов ПГС [2–7]. Исследования простейших линейных схем резонаторов ПГС [3, 4] показали, что при удовлетворительных энергетических показателях расходимость излучения таких генераторов довольно велика и сильно увеличивается с ростом энергии накачки. Использование конфокального неустойчивого резонатора ПГС [7, 8] обеспечивает высокое качество выходного пучка с расходимостью, близкой к дифракционной. Однако такие резонаторы особо чувствительны к разбюстировке 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 1,41–4,24 мкм. Причем дискретная перестройка (от импульса к импульсу) регулируется от 0 до 12 нм.

Дискретная перестройка длины волны излучения ПГС достигается путем подачи на нерабочие боковые поверхности нелинейного кристалла постоянного напряжения, величина которого и определяет шаг дискретной перестройки. В данной статье максимальное значение постоянного напряжения равнялось 4500 В. Это значение можно было изменять через каждые 50 В и оно соответствует минимальному шагу дискретной перестройки длины волны ПГС, равному 0,133 нм.

Таким образом, при отсутствии внешнего поля ($E = 0$) дискретной перестройки нет, а при напряжении внешнего поля $U = 4500 \text{ В}$ максимальная величина дискретной перестройки равна 12 нм.

Для обеспечения вышеупомянутых типов перестройки излучения ПГС был выбран нелинейный кристалл из ниобата лития (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. Трехзеркальный резонатор менее чувствителен к разбюстировке. В таком резонаторе нет стоячих волн, и интенсивность излучения в нем существенно более однородна, чем в линейных резонаторах. Последнее обстоятельство

* Валерик Сергеевич Айрапетян (v.hayr100011@mail.ru).

особенно важно из-за относительно низкого оптического пробоя кристалла LiNbO_3 (300 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 LiNbO_3 .

1. Экспериментальная часть

Для накачки ПГС используется излучение лазера с активным элементом YAG:Nd^{3+} размером диаметра 6,3 и длиной 100 мм. Лазер накачки собран по схеме телескопического неустойчивого резонатора. Энергия излучения на длине волны $\lambda = 1,064 \text{ мкм}$ в импульсе составляла 160 мДж, длительность импульса излучения 10 нс. Оптимальная частота следования импульсов, при которой энергия незначительно отличалась от средней энергии в режиме редко повторяющихся импульсов, установилась на уровне 20–30 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 из нелинейного кристалла LiNbO_3 размерами $10 \times 10 \times 30 \text{ мм}$ ориентирован: $\theta = 47^\circ$, $\varphi = -90^\circ$.

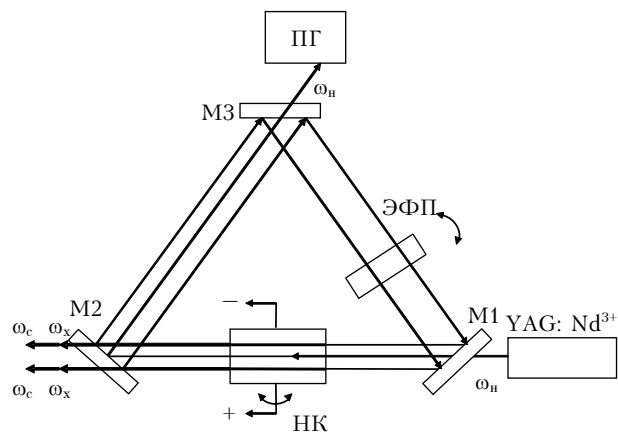


Рис. 1. Оптическая схема кольцевого резонатора ПГС: YAG:Nd^{3+} – лазер накачки; НК – нелинейный кристалл из LiNbO_3 ; M1, M2, M3 – зеркала; ЭФП – эталон Фабри – Перо; ПГ – поглотитель излучения лазера накачки; ω_c , ω_x , ω_n – сигнальная и холостая частоты и частота лазера накачки

Диаметр пучка накачки на входе в нелинейный кристалл равен 6 мм. Нелинейный кристалл установлен на вращательной платформе с шаговым двигателем (ШД), точность вращения и размер шага которого соответствуют 3 arcsec и $0,03 \text{ см}^{-1}$. Вращение нелинейного кристалла вокруг вертикальной оси обеспечивает плавную перестройку длины волны выход-

ного излучения ПГС. Для компьютерного управления ШД была создана специальная программа в среде 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 с, а размер шага плавной перестройки соответствовал спектральной ширине излучения ПГС ($0,7 \text{ см}^{-1}$).

Смещение длины волны излучения ПГС за счет температурного нагрева кристалла программно контролировалось и компенсировалось с погрешностью до $0,1^\circ\text{C}$. Дополнительное сужение спектральной ширины излучения ПГС достигалось введением в резонатор ПГС эталона Фабри – Перо (ЭФП), также установленного на вращательной платформе. ЭФП действует непосредственно на сигнальную волну, автоматически сужая и холостую волну. Настройка полосы пропускания ЭФП на необходимую спектральную линию осуществляется путем углового вращения его оси относительно направления падающего на него излучения. ЭФП устанавливается в той части резонатора ПГС, где отсутствует мощное излучение волны накачки. Таким образом, обеспечиваются наиболее благоприятные условия для его нормальной работы.

На рис. 2 приведена оптическая схема измерения длины волны и ширины спектра излучения ПГС.

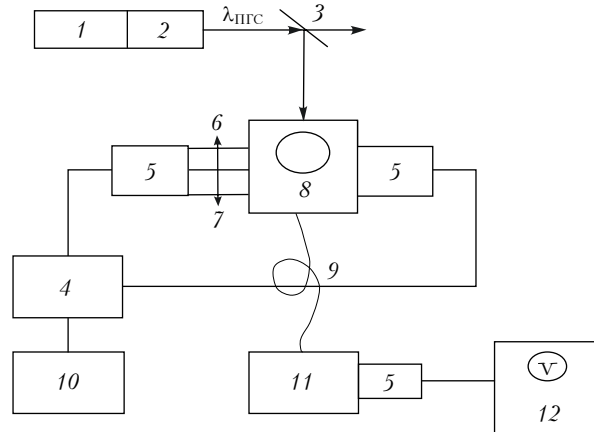


Рис. 2. Оптическая схема измерения длины волны и ширины излучения спектра ПГС: 1 – лазер накачки YAG:Nd^{3+} ; 2 – узел ПГС; 3 – плоскопараллельная пластина из CaF_2 ; 4 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 5 – фотоприемник ФП-219 из PbSe с предусилителем; 6 – кювета с метаном; 7 – кювета с газом; 8 – диффузно-рассеивающая сфера; 9 – ИК-световод из CaF_2 ; 10 – ПК; 11 – монохроматор МДР-12; 12 – осциллограф С1-91

Для этой цели часть выходного излучения ПГС 2, отражаясь от плоскопараллельной CaF_2 -пластинки 3, направляется в узел калировки и подстройки длины волны 8. Узел калировки представляет собой диффузно-рассеивающую сферу с двумя идентичными фотоприемниками ФП-219 из PbSe 5. Один из фотоприемников используется для математического

вычитания энергетических нестабильностей. На другой фотоприемник излучение падает через кювету 6 или 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 4, выход которого соединен с персональным компьютером 10. На экран монитора ПК выводится колебательно-вращательный спектр поглощения ν_3 полосы метана, центральная Q-ветвь которой является репером. Для калибровки длины волны ПГС на рассеивающей сфере предусмотрена возможность установления ИК-световода марки GF-F-160 9, через который лазерное излучение подается на входную щель монохроматора МДР-12 11. Такое решение позволяет автоматически настраивать длину волны излучения на заданную. Выходная энергия излучения ПГС измерялась калориметрическим измерителем энергии S310 (США).

2. Результаты и их обсуждение

Исследования энергетических характеристик излучения ПГС были выполнены в предельных температурных режимах окружающей среды как в лабораторных условиях (+30 °С), так и в открытой атмосфере (–10 °С). В данных условиях после 30 мин работы лазера с частотой следования импульсов 25 Гц энергетическая нестабильность не превышала $\pm 6\%$.

На рис. 3 представлена зависимость энергии излучения ПГС от длин сигнальной ($\lambda = 1,42 \div 1,75$ мкм) и холостой ($\lambda = 2,9 \div 4,2$ мкм) волн.

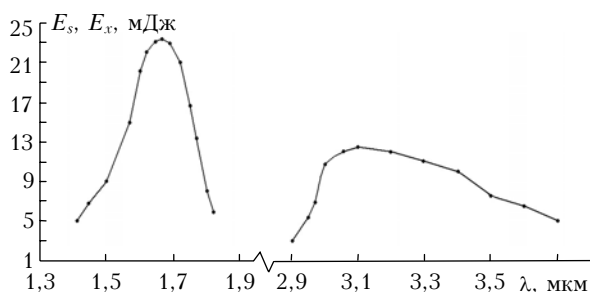


Рис. 3. Распределение энергии излучения ПГС в сигнальной и холостой волнах

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 25%. 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. А поскольку генерация ПГС представляется в виде суперпозиции

сигнальной и холостой 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 (рис. 4).

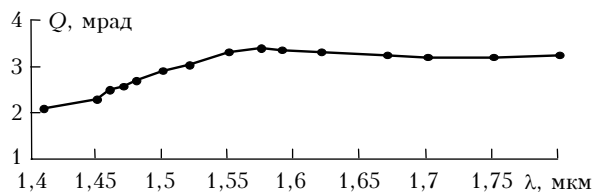


Рис. 4. Зависимость угла расходимости излучения ПГС от длины сигнальной волны

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. 5 представлены спектры излучения ПГС, полученные для произвольной холостой волны.

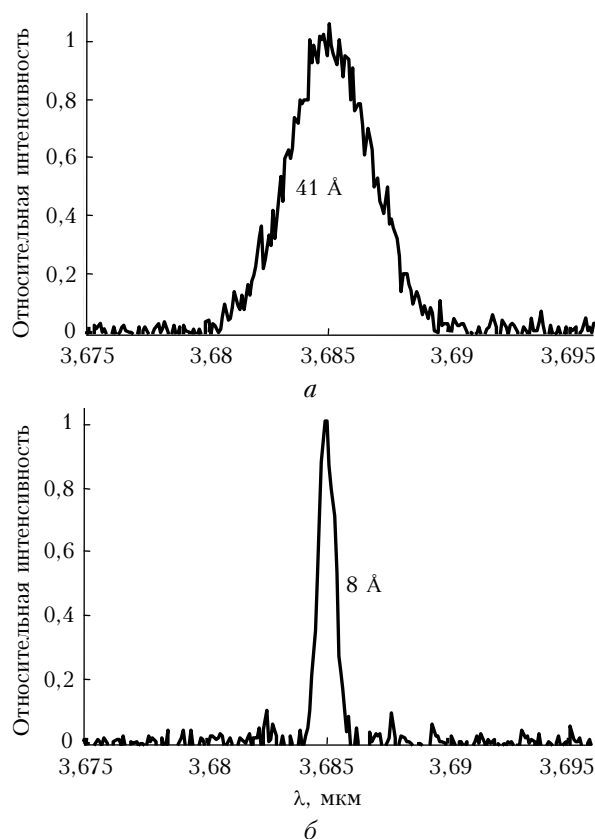


Рис. 5. Спектр излучения ПГС на $\lambda = 3,685$ мкм без ЭФП (а) и с ЭФП (б)

Рис. 5, а соответствует спектру излучения ПГС, когда ЭФП не внесен в резонатор. Рис. 5, б показывает, насколько сужается спектр излучения ПГС при вводе в резонатор ЭФП. Аналогичные спектры были получены во всем диапазоне длин волн перестройки ПГС.

| Организация | Характеристика ПГС | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|---|--------------|--|--------------------|---------------------------------|
| | Тип лазера | Длина волны, мкм | Энергия, мДж | Спектр. ширина излучения, см ⁻¹ | Расходимость, мрад | Эффективность преобразования, % |
| СГГА, Новосибирск, РФ | YAG:Nd ³⁺ с ПГС | 1,41–4,24 плавно и(или) дискр. | 45 | 0,7–0,9 | 3,5 | 25 |
| КГУ, Краснодар, РФ | YAG:Nd ³⁺ с ПГС | 3,7–5,7 плавно | 3 | – | 10 | 4,9 |
| ИФ им. Степанова, Минск, НАН Беларуси | YAG:KGW с ПГС | 1,54–1,61 плавно | 22 | 5 | 3,5 | 0,4 |
| ФГУП «НИИ «Полюс»» им. М.Ф. Стельмаха | YAG:Nd ³⁺ с ПГС | 1,5–2 плавно | 20 | 1 | 7 | 40 |
| ОРО-Лидар (США Тагра) | YAL:Nd ³⁺ с ПГС | 1,55–3,3 плавно | 0,5–10 | 3,5–5 | 5 | 10 |
| ОРО-Лидар (США Redmond) | YAG:Ti сапфир с ПГС | 2,2–4 плавно | До 30 | 3,5–5 | 5 | – |

Сужение полуширины спектра излучения ПГС варьировалось от 4 до 5 раз. При этом изменение энергии излучения ПГС было незначительным.

Приведем некоторые основные параметры ИК–ПГС в сравнении с аналогичными разработками (таблица).

Таким образом, по результатам исследований нелинейно-оптических свойств кристаллов LiNbO₃ и КТР, 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.

1. *Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N.* Handbook of Nonlinear Optical Crystals. New York: Springer, 1999. 345 p.
2. *Ewbank M.D., Rosker M.J.* Frequency tuning a mid-infrared optical parametric oscillator by the electro-optic effect // J. Opt. Soc. Amer. B. 1997. V. 14. N 3. P. 668–671.
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. Amer. B. 1995. V. 12. P. 2253–2257.
4. *Marshall L.R., Hay A.D., Burnham R.* Tech. Dig. Papers Adv. CLEO' 90 postdeadline paper CDPO 35–1. 1990. N.Y.

5. *Narutjunyan A.H., Papryan G.A., Sargsyan S.S., Sargsyan T.K.* High Efficiency Intracavity Optical Parametric Oscillator based on a Lithium Niobate Crystal. ICONO'91, I, PWH12P, 167. Leningrad, 1991.
6. *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:Nd³⁺ // Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 3. С. 225–228.
7. *Водичи Л.И., Дашкевич В.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 // Ж. прикл. 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 / R. Scheps, ed. // Proc. SPIE. 1997. V. 2986. P. 113–115.
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. Amer. B. 2001. V. 18. N 5. P. 706.
11. *Ayrapetyan V.S., Apresyan G.M., Sargsyan K.A., Sargsyan T.K.* Tunable OPO for differential absorption LIDAR's // Abstract of Conf. LAT. 2002. LMI 72. Moscow, 2002. P. 89–91.
12. *Hodgson N., Weber H.* Optical Resonator: Fundamentals, Advanced, Concepts and Application. London: Springer-Verlag, 1997. 226 p.

V.S. Ayrapetyan. Parametric light generator with smooth and (or) discrete frequency tuning.

A LiNbO₃ Optical Parametric Oscillator (OPO) having the possibility of continuous tuning in the spectral range of 1.4–4.24 μm and shifting up to 12 nm is created and investigated. As a pump laser a YAG:Nd ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) laser has been used. The OPO resonator ring circuit provided the output energy of up to 45 mJ with the bandwidth of 3.5 cm^{-1} . Radiation bandwidth narrowing of up to 0.7 cm^{-1} by introducing the Fabry – Perrot etalon into the OPO resonator has been obtained.