

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 535.015

НАНОСЕКУНДНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР СВЕТА  
В СРЕДНЕМ И.К.-ДИАПАЗОНЕ С ДВУХПРОХОДНОЙ НАКАЧКОЙ

© 2012 г. Д. Б. Колкер\*, \*\*, \*\*\*, Р. В. Пустовалова\*\*, М. К. Старикова\*, А. И. Карапузиков\*\*,  
А. А. Карапузиков\*\*\*, О. М. Кузнецов\*\*, Ю. В. Кистенев\*\*\*\*

\*Новосибирский государственный технический университет

Россия, 630092, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

\*\*Институт лазерной физики СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13/3

\*\*\*ООО «Специальные технологии»

Россия, 630060, Новосибирск, ул. Зеленая горка, 1/3

\*\*\*\*Сибирский государственный медицинский университет

Россия, 634050, Томск, Московский тракт, 2

Поступила в редакцию 26.05.2011 г.

После доработки 20.06.2011 г.

Описывается параметрический генератор света (п.г.с.) с двухпроходной накачкой на основе периодических структур MgO:PPLN и PPLN. В качестве источника накачки использован малогабаритный наносекундный Nd:YAG-лазер в области 1.053 мкм (длительность импульса накачки 5–7 нс при максимальной энергии импульса 300 мкДж на частоте 1–7 кГц). Порог генерации п.г.с. на основе MgO:PPLN варьировался в интервале 11–28 мкДж в диапазоне длин волн 2.1–4.3 мкм. Эффективность преобразования энергии накачки в энергию холостой волны уменьшалась от 8.6 до 2.5% в диапазоне длин волн 2–4.3 мкм. Для п.г.с. на основе нелинейного элемента PPLN порог генерации составил 36 мкДж в области 4.2 мкм и 49 мкДж в области 4.7 мкм. Эффективность преобразования энергии накачки в энергию холостой волны составила 3.3–0.4% в диапазоне длин волн 4.2–4.7 мкм.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особый интерес представляет анализ состава атмосферы с целью детектирования малых концентраций различных газов и, как частный случай, выдыхаемого человеком воздуха для диагностики различных заболеваний. Для решения данной задачи предложен резонансный метод оптико-акустической спектроскопии, на основе которого разработан оптико-акустический лазерный газоанализатор [1]. Поскольку спектр CO<sub>2</sub>-лазера не удовлетворяет в полной мере требованиям поставленных задач, решено дополнительно использовать параметрический генератор света (п.г.с.) в качестве источника широко перестраиваемого и.к.-излучения в области 2.3–4.3 мкм (4.2–4.7 мкм) [2, 3].

Ниже описывается п.г.с. с двухпроходной накачкой на периодически поляризованных структурах из ниобата лития: MgO:PPLN и PPLN. Для обеспечения надежности работы п.г.с. использовался монолитный резонатор, выполненный в виде куба с выбранными полостями для установки соответствующих оптических элементов резонатора п.г.с. и кристаллов MgO:PPLN и PPLN.

МОНОЛИТНЫЙ РЕЗОНАТОР П.Г.С.

Основное требование при создании п.г.с. — достижение максимальной эффективности преобразования при параметрическом взаимодействии, поэтому критерием при разработке оптической схемы резонатора является получение оптимальной фокусировки в кристалле PPLN. Теоретически [4] и экспериментально [5] показано: эффективность преобразования оптимальна, когда конфокальный параметр накачки  $b$  внутри кристалла равен длине кристалла PPLN.

При разработке оптического резонатора нужно учесть два обстоятельства: 1) апертура, равная 0.5 мм, должна быть достаточна для свободного прохождения через кристалл (вдоль оси  $z$ ) накачки (при толщине кристалла 500 мкм радиус пучка для холостой волны должен быть  $\leq 160$  мкм, чтобы не допустить дифракционных потерь, ведущих к увеличению порога генерации п.г.с.); 2) высокодобротный резонатор для сигнальной волны должен быть стабильным [6].

Резонатор п.г.с. представляет собой монолитную конструкцию с двумя высокоотражающими зеркалами на сигнальной волне (рис. 1). Ввод излучения накачки и вывод излучения на холостой и сигнальной волнах осуществляются через входное плоское зеркало. Второе зеркало с радиусом

кривизны 50 мм является “плотным” для всех трех длин волн (Ag ThorLabs). В разработанном моноблоке возможна коррекция длины резонатора путем перемещения цилиндрических держателей во фланцах. Конструкция моноблока позволяет изменять конфигурацию резонатора (конфокальный, сферический, Фабри–Перо и полусферический).

Кристалл PPLN располагается на жестком юстируемом держателе, который позволяет обеспечить настройку позиции кристалла в резонаторе и возможность перемещения PPLN по всем дорожкам для перестройки длины волны п.г.с. В описываемой конструкции предусмотрена замена юстируемого блока PPLN на другой блок с объемными кристаллами LiGaSe<sub>2</sub>, LiInSe<sub>2</sub> [2] и т.п. для перестройки в длинноволновой области (в перспективе до 9 мкм). Перестройка по длине волны осуществляется изменением угла  $\theta$  в кристалле.

### РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК П.Г.С.

Согласно предложенным в [7, 8] моделям, пороговую плотность энергии накачки и пороговую мощность накачки двухпроходного п.г.с. можно рассчитать, используя следующие формулы:

$$J_T = \frac{1}{T_p} \frac{1}{F} \frac{n_p n_s n_i \epsilon_0 c^4}{2\omega_s \omega_i d_{eff}^2} \frac{2.25 W_p^2 + W_s^2}{L^2 W_p^2} \frac{\tau}{(1 + \gamma)^2} \times \\ \times \cosh^{-1} \left( \frac{30 L_{cav}}{2\tau c} + \alpha_d - \ln \sqrt{R_s} \right); \\ P_{th} = \frac{\alpha_s \alpha_i n_s n_i c^4 \epsilon_0 \pi}{4\omega_s \omega_i \omega_p d_Q^2 L \bar{h}_m},$$

где  $n_p, n_s, n_i$  – коэффициенты преломления кристалла на длинах волн накачки, сигнальной и холостой соответственно;  $\omega_s, \omega_i$  – частоты длин сигнальной и холостой волн соответственно;  $W_p, W_s$  – перетяжки гауссовых пучков для длин волн накачки и сигнальной соответственно;  $\gamma$  – отношение амплитуд отраженной и падающей волн поля накачки;  $\alpha_d$  – потери за один проход для сигнальной волны;  $\alpha_s$  – потери за один проход для сигнальной волны, включая потери на выходном зеркале;  $R_s$  – коэффициент отражения сигнальной волны;  $T_p$  – коэффициент пропускания для длины волны накачки;  $\tau$  – длительность импульса накачки;  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света;  $d_{eff}$  – эффективная нелинейность;  $L$  – длина кристалла;  $L_{cav}$  – оптическая длина резонатора;  $\bar{h}_m$  – коэффициент ослабления Бойда–Клеймана (в двухпроходной схеме  $\bar{h}_m = 0.186$ );  $F$  – острота резонатора на частоте накачки (в двухпроходной схеме  $F = 1.8$ ).

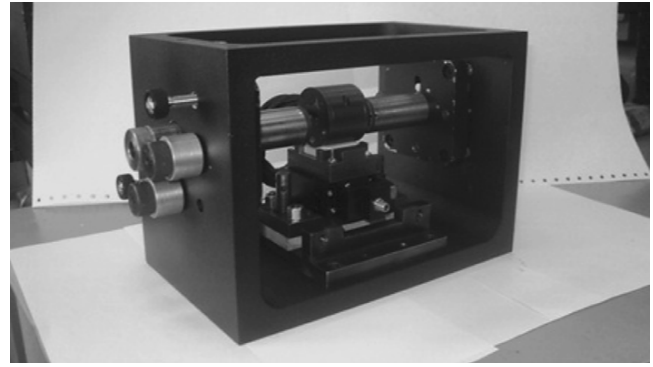


Рис. 1. Монолитный резонатор п.г.с.

### ПОЛУСФЕРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР С ДВУХПРОХОДНОЙ НАКАЧКОЙ

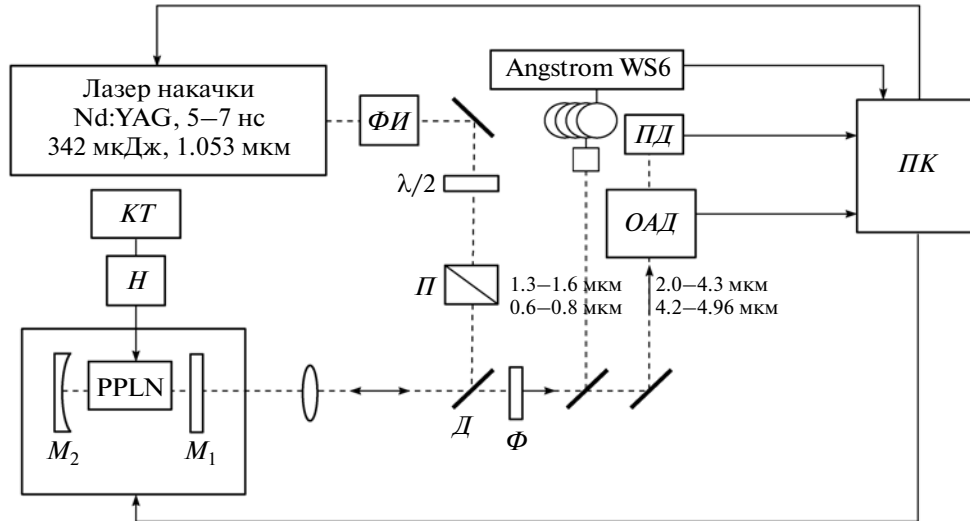
В полусферическом резонаторе с двухпроходной накачкой в качестве как входного, так и выходного зеркала используется плоское зеркало со следующими параметрами:  $HRr(0^\circ-15^\circ, (1310-1470) \pm 10 \text{ нм}) > 99.9\% + Rr(0^\circ-15^\circ, 1064 \text{ нм}) < 5\% + Rr(0^\circ-15^\circ, 3.0-6.0 \text{ мкм}) < 5\%$ . Второе зеркало – сферическое с радиусом кривизны  $R = 50$  мм и серебряным напылением (ThorLabs). Длительность импульса накачки  $\tau = 5-7$  нс (1000–5000 Гц), потери за один проход для сигнальной волны  $\alpha_s = 0.04$ , отношение амплитуд прошедшей и падающей волн поля накачки в кристалле  $\gamma = 0.1$ .

Расстояния между кристаллом и оптическими зеркалами  $M_1$  и  $M_2 - L_1$  и  $L_2$  соответственно – определены из минимального расстояния от цилиндрических держателей во фланцах оптических зеркал до юстируемого держателя кристалла PPLN в соответствии с конструкцией нагревательного элемента фирмы ThorLabs. При выбранных расстояниях  $L_1 = 7$  мм,  $L_2 = 7$  мм и длине кристалла 20 мм полусферический резонатор обеспечивал необходимый радиус перетяжки – 92 мкм.

Длина кристалла PPLN ( $d_{eff} = 14.4$  пм/В) составляла 20 мм. Для расчета использованы следующие значения коэффициентов преломления кристалла PPLN:  $n_p = 2.13, n_s = 2.13, n_i = 2.35$ . В такой конфигурации расчетная пороговая плотность энергии накачки ( $\lambda_p = 1.053$  мкм,  $\lambda_s = 1.5$  мкм и  $\lambda_i = 3.53$  мкм) составила  $J_T = 0.024$  Дж/см<sup>2</sup> для пучка радиусом  $\omega_0 = 92$  мкм, а пороговая энергия накачки – 10.6 мкДж.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки п.г.с. в однорезонаторной конфигурации с двухпроходной накачкой. В качестве источника накачки выбран одномодовый Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазер с диодной накачкой (модель DTL-329QT



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки п.г.с. *ФИ* – фарадеевский изолятор;  $M_1, M_2$  – зеркала резонатора п.г.с.; *ОАД* – опико-акустический детектор; *ПК* – персональный компьютер; *П* – поляризатор; *КТ* – контроллер температуры; *H* – нагреватель; Angstrom WS6 – измеритель длин волн; *ПД* – пирозлектрический детектор; *Д* – дихроичное зеркало; *Ф* – фильтр;  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка.

фирмы “Laser-compact group”). Лазер работает в наносекундном режиме, который осуществляется акустооптической модуляцией добротности. Максимальная энергия в импульсе на частоте 1–5 кГц равна 300 мкДж, длина волны – 1053 нм.

Резонатор п.г.с. образован двумя зеркалами (см. рис. 2): плоским зеркалом  $M_1$  (Layertec) ( $AR(0^\circ, 1064 \text{ нм}) < 1.0\% + AR(0^\circ, 4.0\text{--}6.0 \text{ мкм}) < 2\%$ ,  $HRr(0^\circ\text{--}15^\circ, (1310\text{--}1470) \pm 10 \text{ нм}) > 99.9\%$ ) и зеркалом  $M_2$  (ThorLabs) с Ag-покрытием,  $R = 50 \text{ мм}$ . Линза с фокусным расстоянием  $f = 200 \text{ мм}$  из  $\text{CaF}_2$  обеспечивала оптимальное согласование излучения накачки и параметров резонатора. Радиус перетяжки на зеркале  $M_1$  составил  $\omega_0 \approx 92 \text{ мкм}$ . Излучение накачки вводилось через зеркало  $M_1$ , излучение на сигнальной и холостой волнах выводилось также через зеркало  $M_1$ . В резонаторе п.г.с. размещался нагреватель с периодически поляризованным кристаллом из ниобата лития  $\text{LiNbO}_4$  (PPLN).

Фарадеевский изолятор (Avesta) использовался в оптической схеме для исключения обратной связи от резонатора п.г.с. и оптических элементов схемы. Полуволновая пластинка в комбинации с поляризационным кубом (ThorLabs) обеспечивала требуемую поляризацию для запуска процесса параметрического преобразования.

### П.Г.С. НА ОСНОВЕ $\text{MgO:PPLN}$

Кристалл  $\text{MgO:PPLN}$  (Covesion LTD) длиной 20 мм состоял из девяти дорожек, каждая шириной 0.5 мм (27.91, 28.28, 28.67, 29.08, 29.52, 29.98, 30.49, 31.02 и 31.59 мкм). Нагреватель с кристаллом размещались на  $X$ -координатном столике,

который обеспечивал перемещение структуры относительно пучка накачки, что позволило перестраивать п.г.с. в области 2.1–4.3 мкм. На торцы кристалла нанесены антиотражающие покрытия для длин волн: накачки,  $R < 1.5\%$  на 1064 нм; сигнальной,  $R < 1\%$  на 1400–1800 нм; холостой,  $R \sim 6\%\text{--}3\%$  на 2600–4800 нм. Термоконтроллер и нагреватель кристалла обеспечивали термостабилизацию PPLN в широком диапазоне температур (30–200°C) с погрешностью до 0.1°C.

В процессе параметрического преобразования наблюдались комбинационные частоты в видимом диапазоне: вторая гармоника от сигнальной волны (в области 699–758 нм), суммарная частота удвоенной сигнальной и холостой волн (в области 600–660 нм). Это позволило использовать коммерческий волномер Angstrom WS6 с кремниевой фотодиодной линейкой для диагностики области перестройки п.г.с. по длине волн.

По результатам измерения комбинационных частот построены перестроечные характеристики п.г.с. для холостой волны (рис. 3). Характеристики приведены для трех дорожек PPLN с  $\Lambda = 27.91, 28.28, 28.67 \text{ мкм}$ . На рис. 4 представлена зависимость энергии холостой волны от  $\Lambda$  для кристалла  $\text{MgO:PPLN}$ . При температуре PPLN-кристалла 70°C и фиксированной энергии накачки 112 мкДж позицию кристалла изменяли таким образом, чтобы сравнить энергетические характеристики п.г.с. на всех девяти дорожках. Было отмечено, что максимальная эффективность преобразования энергии накачки в сигнальную составила 8% на дорожке с  $\Lambda = 28.28 \text{ мкм}$  ( $\lambda_i = 3 \text{ мкм}$ ). Минимальная эффективность преобразования,  $\approx 4\%$ , зафиксирована на дорожке с  $\Lambda = 31.59 \text{ мкм}$ . Уменьше-

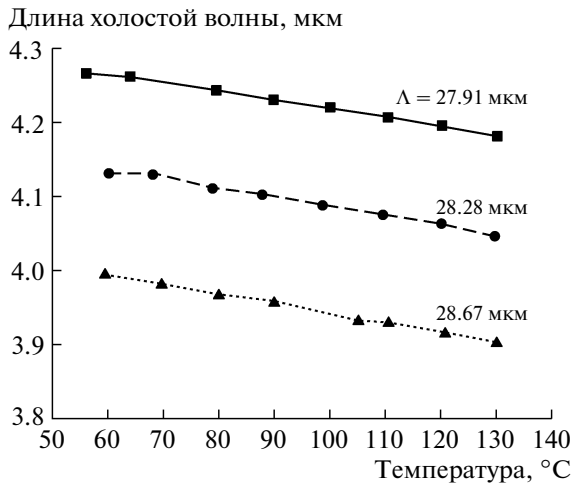


Рис. 3. Температурные перестроечные характеристики п.г.с. на основе MgO:PPLN для трех дорожек с  $\Lambda = 27.91; 28.28; 28.67$  мкм.

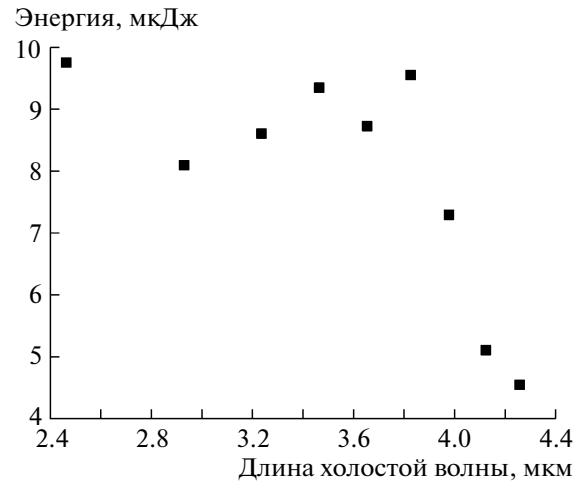


Рис. 4. Зависимость энергии холостой волны от длины волны при фиксированной температуре кристалла ( $T = 70^\circ\text{C}$ , энергия накачки 116 мкДж) для п.г.с. на основе MgO:PPLN.

ние эффективности преобразования в длинноволновой области связано с началом мультифотонного поглощения в PPLN-структуре.

Измеренный порог параметрической генерации п.г.с. на основе MgO:PPLN варьировался в диапазоне от 11 до 28 мкДж при перестройке в области холостой волны 2.1–4.3 мкм, что соответствует расчетному значению (10.6–27 мкДж).

### П.Г.С. НА ОСНОВЕ PPLN (OPO-1 COVESION LTD)

Кристалл PPLN (OPO-1 Covesion LTD) длиной 20 мм состоял из девяти дорожек (25.00, 25.25, 25.50, 25.75, 26.00, 26.50, 26.75, 27.00 мкм). Термоконтроллер и нагреватель кристалла обеспечивали термостатирование PPLN в диапазоне 100–200°C с погрешностью 0.1°C. Перемещение пучка накачки по дорожкам и изменение температуры в области 100–200°C позволяло осуществить перестройку по длине холостой волны в области 4.2–4.7 мкм. На торцы кристалла нанесены антиотражающие покрытия для длин волн: накачки,  $R < 1.5\%$  на 1064 нм; сигнальной,  $R < 1\%$  на 1340–1420 нм; холостой,  $R \sim 6\text{--}3\%$  на 4200–4700 нм.

По результатам измерения комбинационных частот (вторая гармоника от сигнальной волны и суммарная частота второй гармоники от сигнальной волны и холостой волны) на коммерческом волномере Angstrom WS-6 были построены перестроечные характеристики п.г.с. на основе PPLN (OPO-1 Covesion LTD) в диапазоне температур 163–195°C (рис. 5), которые хорошо согласуются с расчетными кривыми, представленными на [www.covesion.com](http://www.covesion.com).

На рис. 6 представлена зависимость энергии холостой волны для кристалла PPLN OPO-1 при

фиксированной энергии накачки 112.9 мкДж и температуре PPLN-чипа 194.9°C. Видно, что при перестройке от 4.3 мкм и выше резко уменьшается энергия холостой волны — от 3.7 до 0.5 мкДж в области 4.6–4.7 мкм (накачка 112 мкДж). Резкое уменьшение энергии холостой волны в области 4.3–4.7 мкм связано с мультифотонным поглощением в кристалле PPLN.

Стоит отметить, что генерация сигнальной частоты и гармоник от сигнальной и холостой волн наблюдалась на всех девяти дорожках кристалла и во всем температурном диапазоне 100–200°C. На выходе п.г.с. на основе PPLN мы наблюдали генерацию холостой волны даже в диапазоне 4.7–4.96 мкм при помощи инфракрасного лямбдаметра Ангстром с пироэлектрической линейкой.

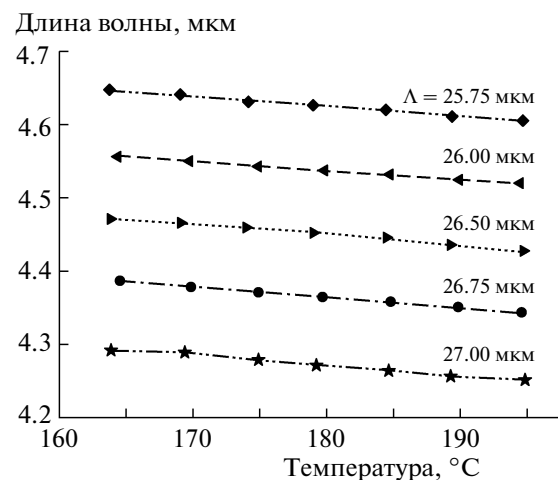


Рис. 5. Температурные перестроечные характеристики п.г.с. на основе PPLN (OPO-1).

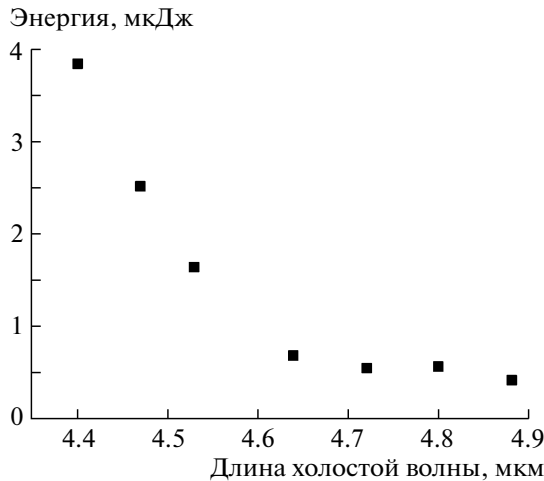


Рис. 6. Зависимость энергии холостой волны от  $\lambda$  для п.г.с. основе PPLN (ОРО-1).

Порог генерации п.г.с. на кристалле PPLN (ОРО-1) составил 36 мкДж в области 4.2 мкм и 49 мкДж в области 4.7 мкм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан источник когерентного инфракрасного излучения на основе параметрического генератора света (MgO:PPLN и PPLN) с двухпроходной накачкой наносекундным малогабаритным Nd:YAG-лазером в области 1.053 мкм. Для обеспечения надежности работы п.г.с. использовался монолитный резонатор, выполненный в виде куба с выбранными полостями для установки соответствующих оптических элементов резонатора п.г.с. и кристалла PPLN.

П.г.с. обеспечивает перестройку длины холостой волны (MgO:PPLN) в области 2–4.3 мкм. Эффективность преобразования энергии накачки в энергию холостой волны уменьшается от 8.6 до 2.5% в диапазоне длин волн 2–4.3 мкм. Для нелинейного элемента PPLN эффективность преобразования энергии накачки в энергию холостой волны составила 3.3–0.4% в диапазоне длин волн 4.2–4.7 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦПК гк № 02.740.11.0083, ФЦП гк № 16.522.11.2001 и РФФИ 10-02-00422-а.

Коллектив авторов выражает благодарность фирме Angstrom LTD (А.К. Потехину, С.И. Гончарову и Ю.Ф. Томашевскому) за участие в эксперименте по измерению длины волны п.г.с. в среднем и.к.-диапазоне при помощи инфракрасного лямбдаметра.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпузииков А.И., Шерстов И.В., Агеев Б.Г. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 5. С. 453.
2. Marchev G., Tyazhev A., Vedenyapin V. et al. // Optics Express. 2009. V. 17. № 16. P. 13441.
3. Petrov V., Zondy J.-J., Bidault O. et al. // JOSA B. 2010. V. 27. № 9. P. 1902.
4. Boyd G.D., Kleinman D.A. // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. № 8. P. 3597.
5. Lai B., Wong N.C., Cheng L.K. // Opt. Lett. 1995. V. 20. P. 1779.
6. Schnatz H., Lipphardt B., Helmcke J. et al. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 18.
7. Springer Handbook of lasers and optics / Ed. Frank Trager: Springer Science+Business Media. NY: LLC, 2007. P. 1331.
8. Myers L.E., Eckardt R.C., Fejer M.M. et al. // J. Opt. Soc. Am. B. 1995. V. 12. № 11. P. 2101.