

УДК 535.015

Д.Б. КОЛКЕР, М.К. СТАРИКОВА, А.А. БОЙКО, Н.Ю., ДУХОВНИКОВА

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ РЕЗОНАТОРА ПГС ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИСТОЧНИКА ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ 2,6-5,9 МКМ

Аннотация: В статье приводится расчет и моделирование схемы резонатора ПГС для создания источника ИК-излучения в области 2,6-5,9 мкм. Показан расчет пороговых значений генерации, выбрана оптимальная конфигурация резонатора.

Ключевые слова: источник ИК-излучения, параметрический генератор света (ПГС), нелинейно-оптический кристалл, тиогаллат серебра, порог генерации.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из актуальных направлений исследований является газоанализ выдыхаемого человеком воздуха [1]. Известно, что в выдыхаемом воздухе содержится более 1000 компонент с массовой долей менее 0,01%, а также их соединений в большом разнообразии. Некоторые из молекул, обладающие наибольшей специфичностью образования в организме, можно использовать в качестве естественных газообразных биомаркеров [2]. Большинство линий поглощения подобных молекул-биомаркеров лежат в средней ИК области (от 2 до 12 мкм), поэтому задача создания широкоперестраиваемого источника ИК-диапазона актуальна и на данный момент не решена.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках выполнения федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013годы" ГК № 16.522.11.2001 разрабатывается аппаратно-программный комплекс «Газоанализатор для регистрации состава выдыхаемого воздуха методом оптико-акустической спектроскопии на основе широкополосного параметрического генератора света и оптико-акустического детектора» в области от 2 до 11 мкм. При решении данной задачи необходимо отработать методику по получению перестройки длины волны в диапазоне от 2,6 до 5,9 мкм. В качестве нелинейного элемента использован кристалл тиогаллата серебра AgGaS_2 (AGS), при этом изменение положения нелинейного кристалла в резонаторе ПГС ограничено углом $\alpha = \pm 7^\circ$ [3]. Угол α зависит от конструкции резонатора ПГС, который позволяет получать необходимый перестраиваемый диапазон «холостой» волны.

3. ВЫБОР ИСТОЧНИКА НАКАЧКИ И НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ПГС

В качестве источника накачки был выбран одномодовый лазер $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ с диодной накачкой (модель DTL-429QT фирмы Laser-compact group). Лазер работает в режиме модуляции добротности. Максимальная энергия в импульсе на частоте 1-5 кГц – 540 мкДж, длина волны – 1053 нм, длительность импульса 5-10 нс.

Ранее в наших работах [4, 5] сообщалось о создании ПГС с накачкой $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ лазером на основе кристаллов MgO:PPLN и PPLN. Диапазон перестройки ПГС на основе кристалла MgO:PPLN составил от 2,1 до 4,3 мкм, порог параметрической генерации $E=22-48$ мкДж [4]. Диапазон перестройки ПГС на основе PPLN структуры получен от 4,2 до 4,96 мкм, порог генерации составил 36 мкДж в области 4,2 мкм и 49 мкДж в области 4,7 мкм [4]. Перестройка длины волны осуществлялась механическим переключением дорожек и изменением температуры кристалла PPLN. Быстродействие системы ограничено перестройкой по температуре.

Для получения излучения в среднем ИК-диапазоне в качестве нелинейно – оптического элемента могут быть использованы кристаллы тиогаллата серебра AgGaS_2 (AGS) [6-9]. Преимуществом AGS является наличие фазового синхронизма на длине волны накачки $\lambda_p=1,053$ мкм. Кристаллы AgGaS_2 прозрачны в спектральном диапазоне от 0,48 до 11,4 мкм, что позволяет использовать для оптической накачки этих кристаллов коммерчески доступные лазеры с длиной волны 1,053...1,064 мкм. Кристаллы AGS имеют средний уровень нелинейности (12...14 пм/В),

низкую теплопроводность (1,5 Вт/м*К), низкий порог разрушения (0,2 Дж/см²). По известным литературным данным в ПГС на основе кристаллов AgGaS₂ получена перестройка длины волны излучения в диапазоне 2,1...11,3 мкм [10, 11].

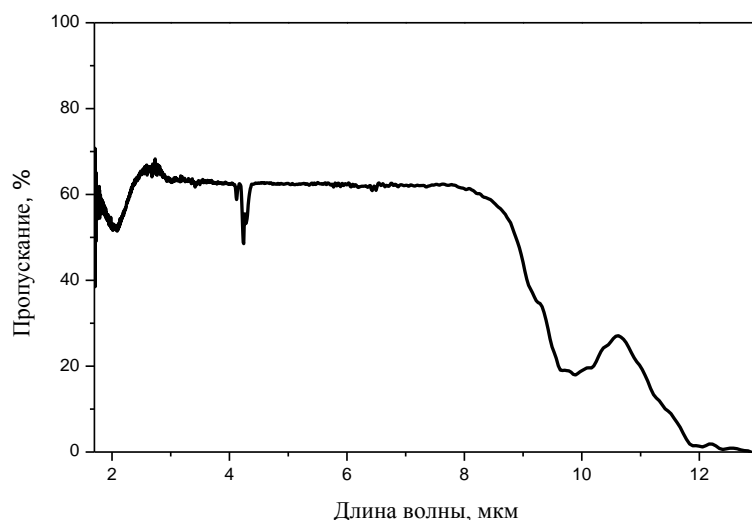


Рис. 1. Спектр пропускания кристалла AGS

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рисунке 2 приведена экспериментальная схема AGS-ПГС. Кристалл AGS ориентирован для *I* типа (*eo*) синхронизма, $\theta=48^\circ$, $\rho=45^\circ$ с апертурой 5×5 мм и длиной 15 мм. На гранях кристалла нанесены антиотражающие покрытия для обеспечения максимального пропускания в области 1,053 мкм и в диапазоне 1,15-1,5 мкм (на сигнальной волне), $R \leq 1\%$.

Накачка ПГС осуществлялась одномодовым Nd:YLF лазером с длиной волны излучения $\lambda_p=1,053$ мкм и максимальной энергией в импульсе 540 мкДж. Телескопический коллиматор, состоящий из двух линз L_1 и L_2 ($f=100$ мм и $f=50$ мм), был необходим для согласования мод лазера накачки и резонатора ПГС.

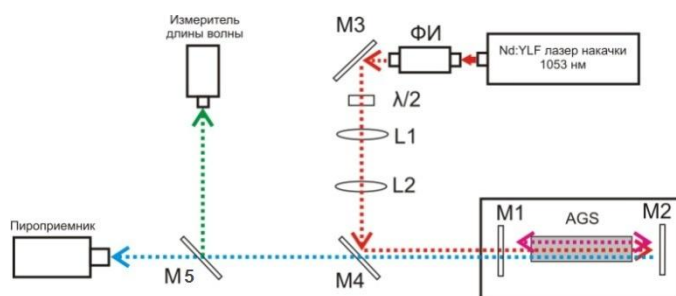


Рис. 2 Схема ПГС системы: ФИ – изолятор Фарадея, L_1 , L_2 – линзы телескопа, AGS – нелинейный кристалл тригаллата серебра (AgGaS₂), M_1 и M_2 – зеркала резонатора ПГС, M_3 – поворотное зеркало, M_4 – дихроичное зеркало.

Дихроичное зеркало M_5 использовалось в оптической схеме для разделения сигнальной и холостой волны. Измерение энергии импульса холостой волны проводилось при помощи пироприемника «Ophir PE-10C». Длина сигнальной волны регистрировалась измерителем длины волны «Angstrom WS-6 IR» в спектральном диапазоне 1,28-1,77 мкм.

Перестройка длины волны ПГС осуществлялась изменением угловой позиции кристалла AGS относительно оптической оси резонатора, который был образован двумя зеркалами M_1 и M_2 . Длина резонатора ПГС составила 18-22 мм.

5. РАСЧЕТ СХЕМЫ РЕЗОНАТОРА ПГС И ЕГО ПОРОГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для определения порога генерации ПГС нами была использована расчетная модель, приведенная в [12]:

$$J_T = \frac{1}{T_p} \times \frac{n_p n_s n_i \varepsilon_0 c^3}{2 \omega_s \omega_i d_{eff}^2} \frac{2.25 W_p^2 + W_s^2}{L^2} \frac{\tau}{W_p^2 (1+\gamma)^2} \cosh^{-1} \left(\frac{30 L_{cav}}{2 \tau c} + \alpha_d - \ln \sqrt{R_s} \right) \quad (1)$$

где: n_p, n_s, n_i – коэффициент преломления кристалла на длине волны накачки, сигнальной и холостой, соответственно;

ω_s, ω_i – частоты сигнальной и холостой длин волн, соответственно;

W_p, W_s – перетяжки гауссовых пучков для длин волн накачки и сигнальной, соответственно;

γ – отношение отраженной к падающей амплитуде поля накачки в кристалле;

α_d – потери за один проход для сигнальной волны;

R_s – коэффициент отражения сигнальной волны;

T_p – коэффициент пропускания накачки;

τ – длительность импульса накачки;

ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума ($\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м);

c – скорость света ($c = 3 \times 10^8$ м/с);

d_{eff} – эффективная нелинейность ($d_{eff} = 31$ пм/В);

L – длина кристалла; L_{cav} – оптическая длина резонатора

Для выбора оптимальных параметров резонатора ПГС нами проведена серия экспериментов с различными вариантами входного зеркала М1.

В первом эксперименте резонатор ПГС был образован двумя плоскими зеркалами (резонатор Фабри-Перо). Через зеркало М1 фирмы Layertech (коэффициент отражения для $1,35-1,7$ мкм $> 99,9\%$, коэффициент отражения для $\lambda_p = 1,064$ мкм $< 1,0\%$ и для $\lambda_i = 2,5-4,5$ мкм $< 2\%$) в резонатор ПГС вводилось излучение накачки и выводилось излучение на холостой и сигнальной длинах волн. Зеркало резонатора М2 – плоское с серебряным напылением. Длительность импульса накачки $\tau = 5-10$ нс (1000 Гц). В данной конфигурации расчетная пороговая плотность энергии накачки составила $J_T = 11-12$ мДж/см² на краях диапазона перестройки холостой волны ($\lambda_i = 2000-4000$ нм).

Полученное экспериментальное значение для плотности энергии составило $J_T = 13$ мДж/см², вычисленное по формуле (2):

$$J_t = \frac{E_t}{\pi(d/2)^2} \quad (2)$$

При этом диаметр пучка был равен $d = 1$ мм, минимальная энергия накачки, при которой наблюдалась генерация: $E_t = 103$ мкДж. При повороте кристалла AGS ($\theta = 48^\circ, \varphi = 45^\circ$) относительно оптической оси на $\pm 3,5^\circ$ диапазон перестройки холостой волны составил $3,5-5$ мкм.

При замене входного зеркала М1 (Layertech) на ZnSe зеркало фирмы LaserOptics (коэффициент отражения для $1,15-1,65$ мкм $> 99,9\%$, коэффициент пропускания для $\lambda_p = 1,053$ мкм $> 99,9\%$ и для $\lambda = 2,0-12,0$ мкм $> 99,8\%$) пороговая плотность энергии накачки составила $J_t = 11,59$ мДж/см² при тех же параметрах входного пучка. Минимальная энергия накачки, при которой наблюдалась генерация, составила $E_t = 91$ мкДж. При этом, расчетные значения плотности энергии дали тот же результат, что и в предыдущем эксперименте. Таким образом, смена зеркала не привела к существенным изменениям в значении величины порога генерации. Но при этом, диапазон перестройки холостой волны расширен от $2,6$ мкм до $5,9$ мкм, в связи с особенностями оптического покрытия в области «сигнальной» волны ($1150-1650$ нм).

Для сравнения перестроечных характеристик, нами был проведен эксперимент с кристаллом AGS II типа синхронизма (eo), $\theta = 67^\circ, \varphi = 0^\circ$. Расчеты показали, что возможная перестройка холостой волны составит от $3,5$ до 5 мкм, что также удовлетворяет условиям поставленной задачи. Полученное значение плотности энергии составило порядка 40 мкДж/см², диапазон перестройки: от $3,39$ до $3,88$ мкм.

В другом варианте в качестве входного зеркала М1 было использовано сферическое ZnS зеркало, $R = 2000$ мм фирмы LaserOptics. Расчетные параметры для сферического зеркала составили следующие значения: $J_T = 8-9$ мДж/см². Плотность энергии порога генерации составила $J_t = 18,72$ мДж/см² при диаметре пучка $d = 1$ мм, минимальная энергия накачки, при которой наблюдалась генерация, составила $E_t = 147$ мкДж. Перестройка холостой волны получена от $2,9$ до 4 мкм.

Параметры резонатора ПГС с различными зеркалами представлены в таблице (Табл. I.)

ТАБЛИЦА I
ПАРАМЕТРЫ РЕЗОНАТОРА ПГС С РАЗЛИЧНЫМИ ЗЕРКАЛАМИ

Параметры входного зеркала M1 резонатора ПГС	J_t , мДж/см ²		E_t , мкДж	
	Теор.	Экспер.	Теор.	Экспер.
Зеркало фирмы Layertech Коэффициент отражения для 1,35-1,7 мкм > 99,9%, Коэффициент отражения для $\lambda_p=1,064$ мкм < 1.0% и для $\lambda_i=2,5-4,5$ мкм < 2%	11-12	13	65	103
ZnSe зеркало фирмы LaserOptics Коэффициент отражения для 1,15-1,65 мкм > 99,9%, коэффициент пропускания для $\lambda_p=1,053$ мкм >99,9% и для $\lambda=2,0-12,0$ мкм > 99,8%	11	11,59	65	91
Сферическое ZnS зеркало LaserOptics, R=2000 мм	8-9	18,72	64,2	147

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан источник когерентного оптического излучения в спектральном диапазоне $\lambda_i=2,6-5,9$ мкм на основе параметрического генератора света с двухпроходной накачкой наносекундным Nd:YLF лазером. В качестве нелинейного элемента использовался кристалл AgGaS_2 ($\theta = 48^\circ$, $\varphi = 45^\circ$). Для достижения оптимальных пороговых характеристик выбраны зеркала резонатора ПГС (таблица 1): входное ZnSe зеркало M1 и плоское зеркало M2 с серебряным напылением фирмы LaserOptics. Плотность пороговой энергии накачки соответствовала $J_t=11.59$ мДж/см², что хорошо согласуется с теоретическими данными (11 мДж/см²). Энергия холостой волны в спектральном диапазоне $\lambda_i=2,6-5,9$ мкм составила от 3 до 5.5 мкДж при энергии накачки 300 мкДж.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» гк № 16.522.11.2001, РФФИ 10-02-00422-а.

Авторы выражают благодарность д.т.н. Исаенко Л.И.(ИГиМ СО РАН) за предоставленный кристалл тиогаллата серебра AgGaS_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim S.-S. et al. // IEEE Sensors Journal. – 2010. – Vol. 10. – P. 145-158.
2. Степанов Е. В., Миляев В. А. // «Квантовая электроника». – 2002. – Т. 32. – № 11. – С. 987-914.
3. Духовникова Н. Ю. // МНСК «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СИБИРИ». – 2012. – С. 17.
4. Колкер Д. Б. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 10. – С. 910-914.
5. Колкер Д. Б. и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 2. – С. 124–128.
6. Fan Y.X., Eckardt R. C., Byer R. L. // Appl. Phys. Lett. – 1984. – Vol. 45. – P. 313-315.
7. Phua, P. B. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 36. – P. L1661-L1664.
8. Vodopyanov K. L. et al. // Appl. Phys. Lett. – 1999. – Vol. 75. – P. 1204-1206.
9. Wang, T.J. et al. // Opt. Express. – 2006. – Vol. 14. – P. 13001-13006.
10. Douillet A. et al // JOSA B. – 1999. – Vol. 16. – No. 9. – P. 1481-1498
11. Wang T.-J. et al. // Laser Physics. – 2009. – Vol. 19. – No. 3. – P. 377-380
12. Myers L.E. et al. // J. Opt. Soc. Am.. – 1995. – Vol. 12. – P. 2102–2116.

The OPO cavity designing to create IR source in the area of 2,6-5,9 μm . Kolker D.B., Starikova M. K., Boyko A.A., Duhovnikova N. Y.

Abstract: In this paper we demonstrated designing of the OPO cavity to create IR source from 2,6 to 5,9 μm . Calculation of lasing threshold and choice of optimal cavity configuration was shown.

Keywords – IR source, optical parametric oscillator (OPO), nonlinear crystal, silver thiogallate, oscillation threshold