

# Комбинированный параметрический генератор света с непрерывной перестройкой длины волны излучения в спектральном диапазоне 2.5–10.8 мкм

Д.Б.Колкер, И.В.Шерстов, Н.Ю.Костюкова, А.А.Бойко, К.Г.Зенов, Р.В.Пустовалова

*Разработан и испытан комбинированный параметрический генератор света (ПГС) с непрерывной перестройкой длины волны излучения в спектральном диапазоне 2.5–10.8 мкм при оптической накачке излучением Nd:YLF-лазера (1.053 мкм) с модуляцией добротности. Генерацию в спектральной области 2.5–4.5 мкм обеспечивает ПГС1 на основе структуры MgO:PPLN «fan-out», в спектральной области 4.18–10.8 мкм – ПГС2 на основе нелинейных кристаллов HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>. Экспериментально определены углы синхронизма кристаллов HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> в спектральном диапазоне 4.18–10.8 мкм для преобразования типа II (eo-e), которые практически совпали с расчетными. Представлены экспериментальные спектры поглощения газовой смеси в диапазоне 2.5–10.8 мкм, полученные с помощью отпаянной газонаполненной оптико-акустической ячейки.*

**Ключевые слова:** параметрический генератор света, структура MgO:PPLN «fan-out», нелинейный кристалл HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>.

## 1. Введение

В настоящее время одним из актуальных направлений исследований окружающей среды является дистанционный и локальный анализ газового состава атмосферы с помощью лазеров [1], в том числе с использованием методов лазерной оптико-акустической спектроскопии [2–6] и др. [7]. Одним из достоинств лазерного газоанализа является получение информации практически в режиме реального времени. Наиболее информативным для проведения такого анализа атмосферы является средний ИК диапазон спектра (2–14 мкм), поскольку в нем находятся основные колебательно-вращательные полосы поглощения различных молекул [8], представляющие интерес для исследователей. Однако отсутствие перестраиваемых в широком диапазоне лазеров среднего ИК диапазона сдерживает развитие данного направления. Параметрические генераторы света (ПГС) могут решить эту проблему [9]. Ряд работ, посвященных лазерному газоанализу атмосферы с использованием ПГС [10, 11], подтверждает актуальность этого направления. В настоящее время созданы различные типы ПГС, которые могут обеспечить непрерывную перестройку длины волны излучения на отдельных участках спектрального диапазона 2–12 мкм [12–20].

**Д.Б.Колкер, И.В.Шерстов.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: kolker@ngs.ru, sherstov@ngs.ru  
**Н.Ю.Костюкова, А.А.Бойко.** Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; ООО «Специальные технологии», Россия, 630060 Новосибирск, ул. Зеленая горка, 1/3; e-mail: n.duhovnikova@gmail.com  
**К.Г.Зенов.** ООО «Специальные технологии», Россия, 630060 Новосибирск, ул. Зеленая горка, 1/3; e-mail: zkg@ngs.ru  
**Р.В.Пустовалова.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: pustovalova\_r@mail.ru

Поступила в редакцию 18 октября 2016 г., после доработки – 27 октября 2016 г.

В спектральной области 2.5–4.5 мкм наиболее эффективными нелинейными средами для ПГС являются периодически поляризованные структуры из ниобата лития, легированные магнием (MgO:PPLN). Кристаллы ниобата лития прозрачны в спектральном диапазоне 0.3–4.5 мкм. Для накачки MgO:PPLN-структур обычно используются лазеры с длиной волны излучения 1.053–1.064 мкм. На длинах волн, превышающих 4.5 мкм, параметрическая генерация в таких структурах малоэффективна из-за поглощения в ниобате лития. В настоящее время MgO:PPLN-структуры реализованы в различных вариантах: с постоянным периодом, переменным периодом (конфигурация «fan-out»), аперiodические структуры [12–15].

В спектральном диапазоне 4–12 мкм в ПГС используются различные нелинейные оптические кристаллы среднего ИК диапазона (AgGaS<sub>2</sub>, AgGaSe<sub>2</sub>, ZnGeP<sub>2</sub>, LiInSe<sub>2</sub>, HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>, BaGa<sub>4</sub>S<sub>7</sub> и др.) [9, 16–20]. В настоящей работе по совокупности параметров для ПГС с диапазоном перестройки 4–11 мкм был выбран нелинейный кристалл HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> (далее – HGS), выращенный в Кубанском государственном университете (Краснодар, Россия) [21]. Кристаллы HGS прозрачны в спектральном диапазоне 0.55–13 мкм, что позволяет использовать для оптической накачки этих кристаллов излучение лазеров с длиной волны 1.053–1.064 мкм. По известным на момент проведения исследований литературным данным в ПГС на основе кристаллов HGS получена перестройка холостой длины волны излучения в диапазонах 3.7–5.7 мкм [18] и 4.5–9 мкм [19].

Целью настоящей работы является разработка и исследование комбинированного ПГС с непрерывной перестройкой длины волны излучения в спектральном диапазоне 2.5–10.8 мкм для использования в составе лазерного оптико-акустического газоанализатора.

## 2. Экспериментальная установка

Для обеспечения непрерывной перестройки длины волны излучения в широком спектральном диапазоне

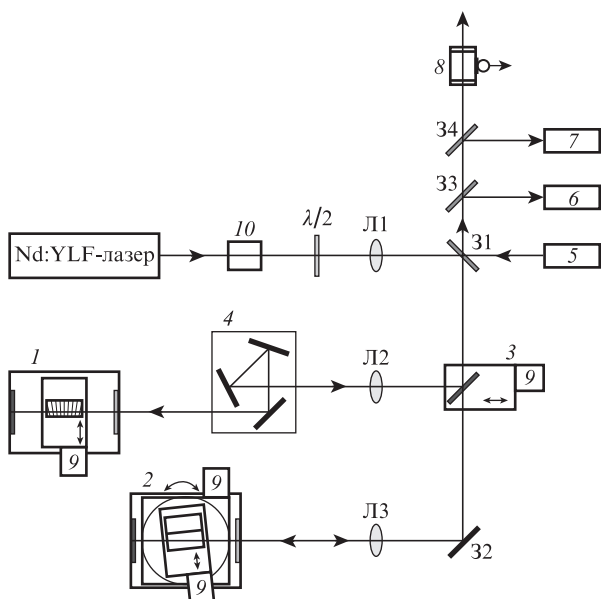


Рис.1. Оптическая блок-схема экспериментальной установки: 1 – параметрический генератор света ПГС1; 2 – параметрический генератор света ПГС2; 3 – селектор каналов; 4 – уголкового отражатель; 5 – юстировочный лазер; 6 – измеритель длины волны; 7 – измеритель мощности; 8 – газонаполненная ОА ячейка; 9 – шаговые двигатели; 10 – оптический изолятор Фарадея;  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка; L1–L3 – линзы; 31–34 – зеркала.

была разработана оптическая схема комбинированного ПГС, представленная на рис.1. Схема содержит два различных ПГС на основе «fan-out» структуры MgO:PPLN и нелинейных кристаллов HGS, перестраиваемых в различных спектральных диапазонах, при оптической накачке излучением одного Nd:YLF-лазера (1.053 мкм).

В состав экспериментальной установки входят Nd:YLF-лазер накачки, оптический изолятор Фарадея, полуволновая пластинка, различные линзы и зеркала, оптические резонаторы параметрических генераторов света ПГС1 и ПГС2, селектор каналов, уголкового отражатель, юстировочный лазер, измерители мощности и длины волны, оптико-акустическая (ОА) газонаполненная ячейка. Генерацию в спектральной области 2.5–4.5 мкм обеспечивает ПГС1 на основе «fan-out» структуры MgO:PPLN, в спектральной области 4.18–10.8 мкм – ПГС2 на основе нелинейных кристаллов HGS.

Для оптической накачки ПГС использовался Nd:YLF-лазер с диодной накачкой модели ТЕСН-1053-Н. Лазер излучал на длине волны 1.053 мкм (TEM<sub>00</sub>) в импульсно-периодическом режиме с модуляцией добротности, поляризация излучения была горизонтальной. Энергия импульсов достигала 1.3 мДж, длительность ~16 нс, частота следования регулировалась от 200 до 2000 Гц.

Пучок излучения лазера накачки с помощью зеркал направлялся в оптический резонатор ПГС1 или ПГС2, где происходило параметрическое преобразование длины волны излучения. Селектор каналов, предназначенный для переключения направления распространения пучка накачки в ПГС1 или ПГС2, представляет собой плоское отражающее зеркало, установленное на линейной моторизованной платформе с шаговым двигателем. Уголкового отражатель, установленный перед ПГС1, служит для поворота плоскости поляризации излучения на 90°. Он образован тремя плоскими зеркалами с серебря-

ным покрытием, которые отражают падающий пучок излучения по схеме «вправо (90°) – вниз (90°) – вперед (90°)».

Выходное излучение ПГС1 или ПГС2 проходит через дихроичное зеркало 31, после чего производится измерение энергии импульсов и длины волн излучения. Энергия импульсов измерялась с помощью измерителя PE10-C (Ophir Vega). Длины волн излучения ПГС1 и ПГС2 определялись измерителями Angstrom LSA L IR (0.8–1.75 мкм) и WS/6 IR-III (2–11 мкм). Вспомогательная газонаполненная ОА ячейка предназначена для контроля действующей длины волны излучения ПГС1 или ПГС2 по характерным пикам поглощения заполняющих ее газовых примесей.

### 3. Результаты эксперимента

#### 3.1. Испытания ПГС1

В настоящей работе использовалась «fan-out» структура MgO:PPLN, установленная в резонатор ПГС1, с размерами 45×25×1 мм и периодом, плавно изменяющимся в диапазоне 27.5–32.5 мкм. На торцы структуры нанесены просветляющие покрытия с максимумом коэффициента пропускания на  $\lambda = 1.5$  мкм. Резонатор ПГС1 длиной 50 мм образован плоскими полупрозрачным и отражающим зеркалами. Выходное зеркало было прозрачно для излучения лазера накачки ( $T \approx 98\%$  на  $\lambda = 1.053$  мкм) и холостой волны ( $T \approx 95\%$  на  $\lambda = 2.5$ –4.5 мкм), а для сигнальной волны (1.35–1.7 мкм) коэффициент отражения зеркала составлял ~99%. Отражающее зеркало имело серебряное покрытие.

В резонаторе ПГС1 для перемещения структуры использовалась линейная моторизованная платформа с шаговым двигателем (полный ход 25 мм, разрешение 1.25 мкм/шаг), на которой в термостате была установлена «fan-out» структура MgO:PPLN. Термостат поддерживал температуру структуры постоянной на уровне  $40 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . Плавная перестройка длины волны излучения ПГС1 осуществлялась путем прецизионного горизонтального перемещения «fan-out» структуры MgO:PPLN перпендикулярно оси резонатора.

Энергия импульсов Nd:YLF-лазера накачки составляла 0.8 мДж, частота следования – 1000 Гц. Излучение лазера накачки фокусировалось так, чтобы диаметр пучка в центре структуры составлял ~0.5 мм при плотности энергии ~0.4 Дж/см<sup>2</sup>. Излучение накачки и выходное излучение ПГС1 имело вертикальную поляризацию, которая после прохождения уголкового отражателя 4 изменялась на горизонтальную (см. рис.1).

На рис.2,а представлена перестроечная характеристика ПГС1 в зависимости от положения моторизованной линейной платформы. В эксперименте получено плавное непрерывное сканирование длины холостой волны излучения ПГС1 в спектральном диапазоне 2.5–4.5 мкм, что соответствует частотному интервалу ~1777 см<sup>-1</sup>. Во всем этом диапазоне перестроечная характеристика ПГС1 практически линейна, с наклоном ~0.11 нм/шаг (~0.12 см<sup>-1</sup>/шаг на длине волны 3 мкм). В настоящей работе не предпринимались специальных мер для уменьшения ширины спектра излучения ПГС1, например не использовались внутрирезонаторный эталон [11] или дифракционная решетка [10]. Ширина спектра генерации ПГС1 была определена косвенно, при записи спектров

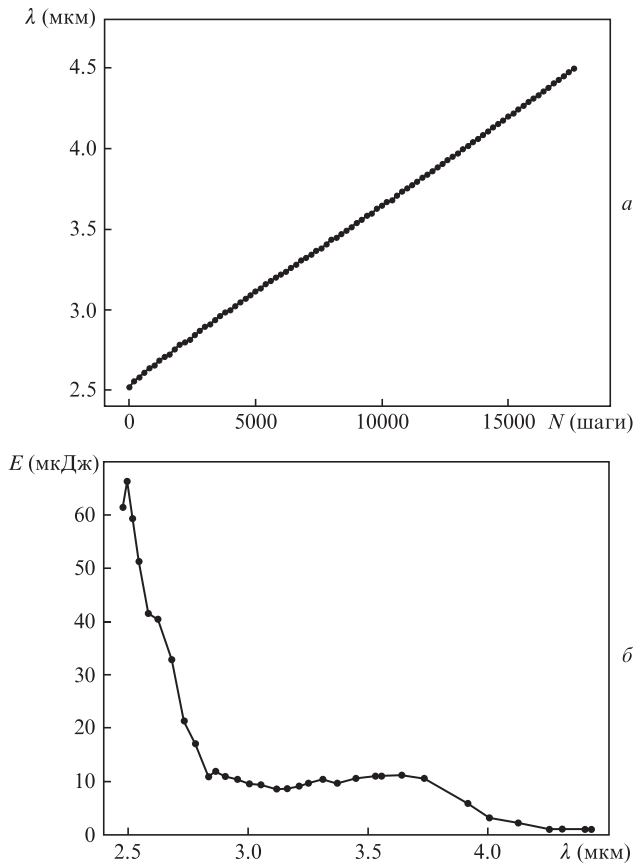


Рис.2. Перестроенная характеристика холостой волны ПГС1 в зависимости от положения моторизованной линейной платформы (а) и зависимость энергии импульсов излучения ПГС1 от длины волны (б).

поглощения различных газовых компонентов [22], и по оценкам составила не менее  $\sim 5 \text{ см}^{-1}$ .

Проведены исследования энергетических параметров излучения ПГС1. На рис.2,б представлена зависимость энергии импульсов излучения холостой волны ПГС1 от длины волны в спектральном диапазоне 2.5–4.5 мкм. Наибольшая энергия импульсов ( $\sim 67 \text{ мкДж}$ ) наблюдалась на  $\lambda = 2.5 \text{ мкм}$ , после чего она монотонно уменьшалась с увеличением длины волны. В спектральном интервале 3.4–3.7 мкм энергия импульсов составляла  $\sim 10 \text{ мкДж}$ . В диапазоне длин волн, превышающем 4.0 мкм, происходило резкое уменьшение энергии импульсов холостой волны, связанное с увеличением уровня поглощения в самом нелинейном элементе. На длине волны вблизи 4.3 мкм зафиксировано влияние на энергию импульсов поглощения атмосферного  $\text{CO}_2$ .

В работе [15] представлены результаты испытаний ПГС1 при использовании двух аналогичных «fan-out» структур  $\text{MgO:PPLN}$ . Была получена непрерывная перестройка длины холостой волны в спектральных диапазонах 2.4–3.1 и 3.3–3.85 мкм.

### 3.2. Испытания ПГС2

В работе [23] показано, что наибольшая эффективность параметрического преобразования частоты в кристаллах HGS для длины холостой волны более 5 мкм достигается при типе II взаимодействия и использовании кристаллов, вырезанных под углом  $\varphi = 0$ . На рис.3 пред-

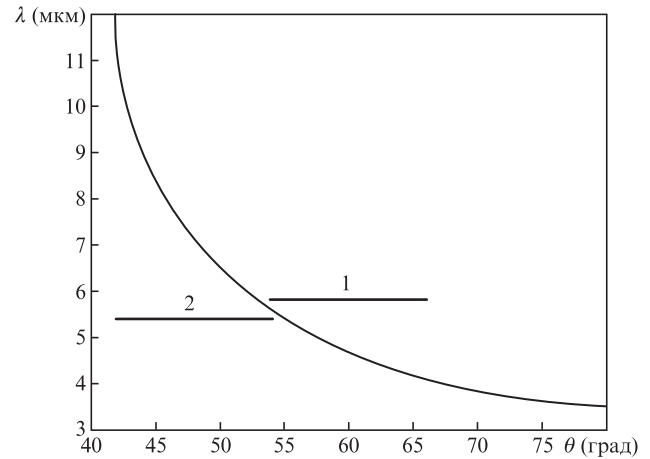


Рис.3. Расчетная перестроенная характеристика ПГС на основе нелинейного кристалла HGS (тип II, ео-е); отрезки 1 и 2 – диапазоны углового перемещения кристаллов HGS1 и HGS2, вырезанных для разных углов  $\theta$  (см. текст).

ставлена расчетная кривая перестройки холостой волны ПГС на основе нелинейного кристалла HGS (преобразование типа II, ео-е), построенная по уточненным данным из работы [24]. Видно, что кристалл HGS может обеспечить непрерывную перестройку холостой волны ПГС в спектральном диапазоне 3.5–12 мкм при изменении угла  $\theta$  в кристалле от 80 до 42°. Фактически это означает, что сам кристалл необходимо поворачивать на угол не менее  $\pm 45^\circ$ , что вызывает определенные трудности при практической реализации.

В настоящей работе для обеспечения широкого диапазона перестройки предложено использовать в резонаторе ПГС2 не один, как обычно, а два нелинейных кристалла HGS (см. рис.1), вырезанных под разными углами для ео-е-типа взаимодействия. Такая компоновка ПГС2 позволит значительно уменьшить диапазон углового перемещения каждого кристалла. Кристалл HGS1 вырезан для углов  $\theta = 60^\circ$ ,  $\varphi = 0$  (для длины холостой волны  $\sim 4.7 \text{ мкм}$  при нормальном падении), кристалл HGS2 – для углов  $\theta = 47^\circ$ ,  $\varphi = 0$  (для длины холостой волны  $\sim 7.45 \text{ мкм}$  при нормальном падении). Оба кристалла изготовлены из оранжевой фазы HGS [21], имеют одинаковые размеры ( $13 \times 5 \times 5 \text{ мм}$ ) и обработаны совместно. На торцы обоих кристаллов нанесено просветляющее покрытие с центром спектра пропускания на  $\lambda = 1.2 \text{ мкм}$ . Диапазоны углового перемещения обоих кристаллов HGS, реализованные в настоящей работе, показаны на рис.3 отрезками прямых линий.

Резонатор ПГС2 длиной 23 мм образован дихроичным и отражающим зеркалами. Выходное дихроичное зеркало с радиусом кривизны 1 м было прозрачным для излучения накачки ( $T \approx 92\%$  на  $\lambda = 1.053 \text{ мкм}$ ) и холостой волны ПГС2 ( $T \approx 80\%$  на  $\lambda = 4.2\text{--}10.8 \text{ мкм}$ ), а для сигнальной волны ( $\lambda = 1.17\text{--}1.4 \text{ мкм}$ ) коэффициент пропускания составлял 5%–15%. Отражающее плоское зеркало имело серебряное покрытие.

Внутри резонатора ПГС2 в термостате установлены два кристалла HGS, термостат поддерживал их температуру на уровне  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . Поворот нелинейных кристаллов производился в плоскости YZ по углу  $\theta$  в диапазоне  $\pm 17^\circ$  от среднего (нормального для кристаллов) положения с шагом  $0.005^\circ$ , для чего использовалась моторизованная поворотная платформа с шаговым двигателем.

На поворотной платформе находилась дополнительная моторизованная линейная платформа, предназначенная для поперечного смещения кристаллов HGS и последовательной установки одного из них в рабочее положение на оси резонатора ПГС2 (см. рис. 1).

Энергия импульсов Nd:YLF-лазера накачки составляла 0.9 мДж, частота их следования – 1000 Гц. Пучок излучения лазера накачки на входе в резонатор ПГС2 имел диаметр  $\sim 0.5$  мм при плотности энергии  $\sim 0.46$  Дж/см<sup>2</sup>. Излучение накачки и холостая волна ПГС2 были горизонтально поляризованы. Предварительные результаты исследования ПГС на основе двух нелинейных кристаллов HGS приведены в работе [25].

На рис. 4, а представлена экспериментальная перестроечная характеристика ПГС2 при использовании двух нелинейных кристаллов HGS. Показаны две перестроечные кривые, соответствующие кристаллам HGS1 и 2. При повороте кристалла HGS1 ( $\theta = 60^\circ$ ) на  $\pm 15^\circ$  от среднего (нормального) положения наблюдалась непрерывная перестройка длины холостой волны излучения ПГС2 в диапазоне 4.18–5.6 мкм, для кристалла HGS2 ( $\theta = 47^\circ$ ) – в диапазоне 5.6–10.8 мкм. В результате общий диапазон непрерывной перестройки длины холостой волны излучения ПГС2 составил 4.18–10.8 мкм, что соответствует частотному интервалу  $\sim 1466$  см<sup>-1</sup>. Наклон перестроечной характеристики для кристалла HGS1 на длине волны 4.7 мкм составил  $\sim 0.26$  нм/шаг ( $\sim 0.12$  см<sup>-1</sup>/шаг), для кристалла HGS2 на длине волны 7.45 мкм – примерно 0.78 нм/шаг ( $\sim 0.14$  см<sup>-1</sup>/шаг). В настоящей работе шири-

на спектра генерации ПГС2 не измерялась, но при аналогичных условиях в работе [23] для кристалла HGS она составляла  $\sim 2$  см<sup>-1</sup>.

Были исследованы энергетические параметры излучения ПГС2. На рис. 4, б представлены зависимости энергии импульсов излучения ПГС2 от длины волны. Показаны два отрезка экспериментальных кривых, соответствующих кристаллам HGS1 и HGS2. Порог генерации ПГС2 на длине волны 7.45 мкм составил  $\sim 11$  мДж/см<sup>2</sup>. Как видно из рис. 4, б, при использовании кристалла HGS1 энергия импульсов излучения в диапазоне 4.2–5.6 мкм достигала  $\sim 9.6$  мкДж. На длине волны вблизи 4.3 мкм в энергии импульсов наблюдался провал, который может быть связан с влиянием поглощения атмосферного CO<sub>2</sub>, а также полосы поглощения оранжевой фазы HGS [21]. При использовании кристалла HGS2 максимальная энергия импульсов (7.7 мкДж) наблюдалась вблизи 5.7 мкм, после чего она монотонно уменьшалась с увеличением длины волны излучения. В диапазоне 10–10.8 мкм энергия импульсов излучения составляла  $\sim 1$  мкДж.

На рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные зависимости углов фазового синхронизма в кристаллах HGS для сигнальной и холостой волн при типе преобразования II (e<sub>0</sub>-e). Расчетные зависимости углов фазового синхронизма HGS построены по уточненным данным из работы [24]. В ходе экспериментальных измерений сначала с помощью юстировочного лазера для обоих кристаллов HGS были установлены положения, соответствующие нормальному углу падения на них пучка накачки и измерены длины волн излучения ПГС2. Затем по перестроечной характеристике (см. рис. 4, а) для HGS1 и HGS2 были определены внешние углы, соответствующие измеренным в этих положениях длинам волн. Углы фазового синхронизма HGS были рассчитаны при использовании уточненных дисперсионных зависимостей, приведенных в работе [24]. На рис. 5 отмечены экспериментально измеренные значения углов фазового синхронизма кристаллов HGS1 и HGS2. Видно практически полное совпадение расчетной и экспериментальной зависимостей углов фазового синхронизма в этих кристаллах в спектральных диапазонах 1.17–1.41 мкм (сигнальная волна) и 4.18–10.8 мкм (холостая волна).

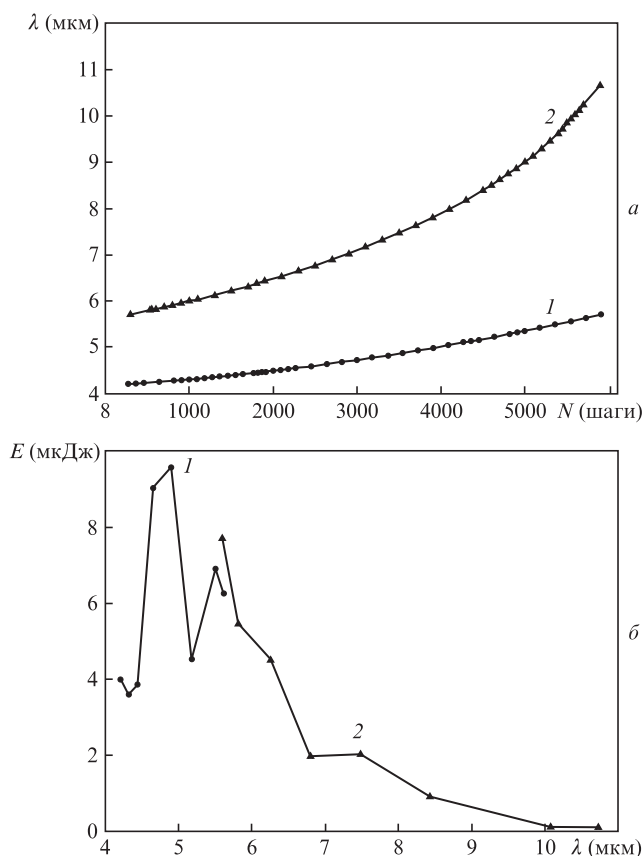


Рис. 4. Перестроечная характеристика ПГС2 (зависимость длины волны от положения моторизованной поворотной платформы) (а) и зависимость энергии импульсов излучения от длины волны (б): 1 – кристалл HGS1 ( $\theta = 60^\circ$ ,  $\varphi = 0$ ); 2 – кристалл HGS2 ( $\theta = 47^\circ$ ,  $\varphi = 0$ ).

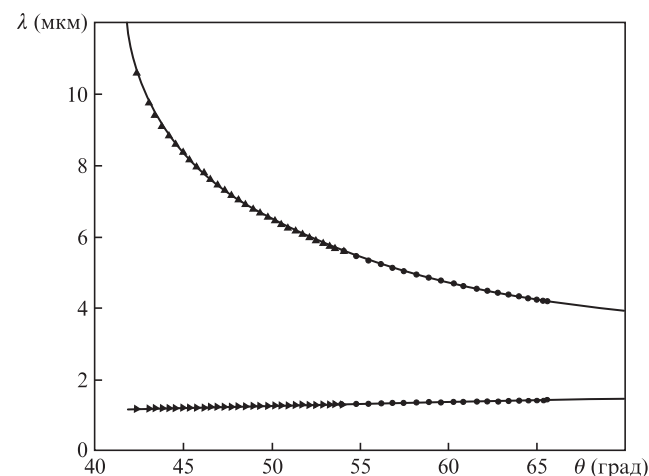


Рис. 5. Расчетные (сплошные линии) [24] и экспериментальные (точки) зависимости углов фазового синхронизма для кристаллов HGS (тип II преобразования, e<sub>0</sub>-e): нижняя кривая – сигнальная волна, верхняя – холостая волна, кружки – кристалл HGS1 ( $\theta = 60^\circ$ ,  $\varphi = 0$ ), треугольники – кристалл HGS2 ( $\theta = 47^\circ$ ,  $\varphi = 0$ ).

### 3.3. Регистрация спектров поглощения

Испытания разработанного комбинированного ПГС проведены с помощью отпаянной газонаполненной ОА ячейки (см. рис.1) путем регистрации спектров поглощения заполняющих ее газовых компонентов. ОА ячейка представляет собой нерезонансный газонаполненный оптико-акустический детектор. Ее корпус имеет цилиндрическую форму (диаметр 12 мм, длина 12 мм) и изготовлен из стекла. На торцы ячейки приклеены окна из ZnSe, на боковую стенку ячейки приклеен микрофон, соединенный с внутренним объемом. Ячейка откачана, проверена на вакуумную плотность, затем заполнена газовой смесью и отпаяна. Состав газовой смеси для заполнения ОА ячейки (см. табл.1) выбирался с таким расчетом, чтобы полосы поглощения различных газовых компонентов смеси не перекрывались, были хорошо разрешены и равномерно заполняли спектральный диапазон 2.5–11 мкм. Информация о спектрах поглощения газовых примесей взята из базы спектральных данных [8].

Табл.1. Состав газовой смеси для заполнения ОА ячейки.

Газовая примесь	Содержание, (%)	Положение характерных пиков поглощения, (мкм) [8]
Метан	10	3.32, 7.66
Закись азота	5	2.87, 3.88, 4.47, 7.67, 16.9
Ацетон	6	3.37, 5.75, 7.30, 8.22
Тетрафторметан	0.25	7.83
Гексафторид серы	0.25	10.55
Азот	78.5	–

На рис.6 представлен экспериментальный спектр поглощения газовой смеси в ОА ячейке, полученный при непрерывной перестройке длины волны комбинированного ПГС в диапазоне 2.5–10.8 мкм. На этой экспериментальной записи можно выделить несколько отдельных характерных пиков поглощения (помечены цифрами 1–5), по которым можно проводить проверку перестроенных характеристик ПГС1 и ПГС2: 3.32 мкм – пик поглощения  $\text{CH}_4$  (1), 4.47 мкм – пик поглощения  $\text{N}_2\text{O}$  (2), 5.75 мкм – пик поглощения ацетона (3), 7.83 мкм – пик поглощения  $\text{CF}_4$  (4), 10.55 мкм – пик поглощения  $\text{SF}_6$  (5).

Отметим, что в диапазон перестройки ПГС1 (2.5–4.5 мкм) попадает пик 1 (метан) и расположенные

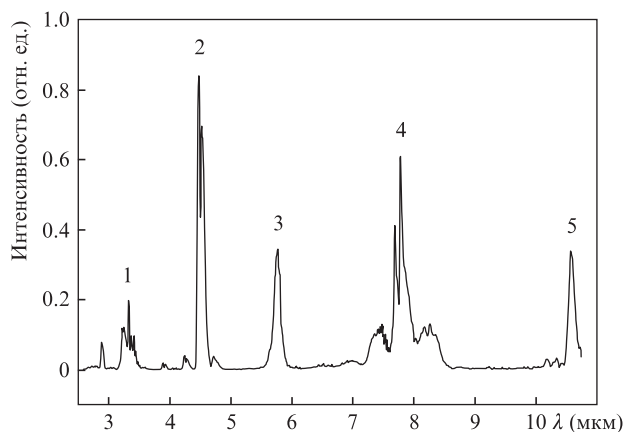


Рис.6. Зарегистрированный спектр поглощения газовой смеси в диапазоне 2.5–10.8 мкм, полученный с помощью комбинированного ПГС и отпаянной газонаполненной ОА ячейки.

вокруг него слабые полосы поглощения  $\text{N}_2\text{O}$ . В диапазон перестройки кристалла HGS1 ПГС2 (4.2–5.6 мкм) попадает сильный пик 2 ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Пики поглощения 3 (ацетон), 4 ( $\text{CF}_4$ ) и 5 ( $\text{SF}_6$ ) попадают в диапазон перестройки кристалла HGS2 ПГС2 (5.6–10.8 мкм).

С помощью отпаянной газонаполненной ОА ячейки предлагается производить автоматическую проверку калибровки длины волны излучения комбинированного ПГС путем регистрации спектра поглощения газовой смеси и сравнения положений характерных пиков поглощения на текущей и контрольной спектрограммах (последняя хранится в памяти компьютера).

### 4. Заключение

В настоящей работе представлены результаты разработки и испытаний комбинированного ПГС с непрерывной перестройкой длины волны излучения в спектральном диапазоне 2.5–10.8 мкм (частотный интервал  $\sim 3074 \text{ см}^{-1}$ ). В состав комбинированного ПГС входят два отдельных ПГС на основе «fan-out» структуры  $\text{MgO:PPLN}$  и нелинейных кристаллов HGS, перестраиваемых в различных спектральных диапазонах, при оптической накачке излучением Nd:YLF-лазера ( $\lambda = 1.053 \text{ мкм}$ ).

С помощью ПГС1 на основе «fan-out» структуры  $\text{MgO:PPLN}$  получена непрерывная перестройка длины холостой волны в диапазоне 2.5–4.5 мкм (частотный интервал  $\sim 1777 \text{ см}^{-1}$ ). Диапазон непрерывной перестройки ПГС2 на основе нелинейных кристаллов HGS составил 4.18–10.8 мкм (частотный интервал  $\sim 1466 \text{ см}^{-1}$ ). Для уменьшения углового перемещения нелинейных кристаллов в ПГС2 предложено использовать не один, а два кристалла HGS, вырезанных под различными углами  $\theta$ . В спектральном диапазоне 4.18–10.8 мкм экспериментально определены углы синхронизма кристаллов HGS для преобразования типа II, которые практически совпали с расчетными из работы [24].

Предложено использовать отпаянную газонаполненную ОА ячейку для проверки калибровки длины волны излучения комбинированного ПГС по положению характерных пиков поглощения определенных газовых примесей. Представлен экспериментальный спектр поглощения газовой смеси в диапазоне 2.5–10.8 мкм.

Авторы выражают благодарность В.В. Бадикову (Кубанский государственный университет) и В.Я. Шуру (Уральский федеральный университет) за предоставление нелинейных кристаллов и структур, а также за полезные обсуждения и рекомендации.

Работа выполнена в рамках госконтракта № 16.522.11.2001 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы».

1. Хинкли Э.Д. (ред.). *Лазерный контроль атмосферы* (М.: Мир, 1979).
2. Harren F.J.M., Bijnen F.G.C., Reuss J., Voeselek L.A.C.J., Blom C.W.P.M. *Appl. Phys. B*, **50**, 137 (1990).
3. Fink T., Buscher S., Gabler R., Yu Q., Dax A., Urban W. *Rev. Sci. Instrum.*, **67**, 4000 (1996).
4. Miklos A., Hess P., Vozoki Z. *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 1937 (2001).
5. Пономарев Ю.Н., Агеев Б.Г., Зигрист М.В., Капитанов В.А., Куртуа Д., Никифорова О.Ю. *Лазерная оптико-акустическая спектроскопия межмолекулярных взаимодействий в газах* (Томск: МГП «РАСКО», 2000).
6. Карапузиков А.И., Шерстов И.В., Агеев Б.Г., Капитанов В.А., Пономарев Ю.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **20**, 453 (2007).

7. Степанов Е.В. *Труды ИОФ РАН*, **61**, 5 (2005).
8. *NIST Standard Reference Database*: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
9. Petrov V. *Progr. Quantum Electron.*, **42**, 1 (2015).
10. Angelmahr M., Miklos A., Hess P. *Appl. Phys. B*, **85**, 285 (2006).
11. Persijn S., Harren F., van der Veen A. *Appl. Phys. B*, **100**, 383 (2010).
12. Myers L.E., Eckardt R.C., Fejer M.M., Byer R.L., Bosenberg W.R., Pierce J.W. *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 2102 (1995).
13. Powers P.E., Kulp T.J., Bisson S.E. *Opt. Lett.*, **23**, 159 (1998).
14. Adler F., Cossel K.C., Thorpe M.J., Hartl I., Ferman M.E., Ye J. *Opt. Lett.*, **34**, 1330 (2009).
15. Колкер Д.Б., Бойко А.А., Духовникова Н.Ю., Зенов К.Г., Шерстов И.В., Старикова М.К., Мирошниченко И.Б., Мирошниченко М.Б., Каштанов Д.А., Кузнецова И.Б., Штыров М.Ю., Zachariadis S., Карапузиков А.И., Карапузиков А.А. *ИТЭ*, **1**, 85 (2014).
16. Vodopyanov K.L., Maffetone J.P., Zwieback I., Ruderman W. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1204 (1999).
17. Vodopyanov K.L., Ganikhanov F., Maffetone J.P., Zwieback I., Ruderman W. *Opt. Lett.*, **25**, 841 (2000).
18. Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В., Серегин А.М., Синайский В.В., Щebetова Н.И., Щетинкина Т.А. *Квантовая электроника*, **37**, 363 (2007).
19. Esteban-Martin A., Marchev G., Badikov V., Panyutin V., Petrov V., Shevyrdyaeva G., Badikov D., Starikova M., Sheina S., Fintisova A., Tyazhev A. *Laser Photon. Rev.*, **7**, L89 (2013).
20. Tyazhev A., Kolker D., Marchev G., Badikov V., Badikov D., Shevyrdyaeva G., Panyutin V., Petrov V. *Opt. Lett.*, **37**, 4146 (2012).
21. Бадиков В.В., Кузьмин Н.В., Лаптев В.Б., Малиновский А.Л., Митин К.В., Назаров Г.С., Рябов Е.А., Серегин А.М., Щebetова Н.И. *Квантовая электроника*, **34**, 451 (2004).
22. Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Kolker D.B., Karapuzikov A.I., Kistenev Yu.V., Kuzmin D.A., Shtyrov M.Yu., Dukhovnikova N.Yu., Zenov K.G., Boiko A.A., Starikova M.K., Tikhonyuk I.I., Miroshnichenko I.B., Miroshnichenko M.B., Myakishev Yu.B., Lokonov V.N. *Phys. Wave Phenomena*, **22**, 189 (2014).
23. Tyazhev A., Marchev G., Badikov V., Esteban-Martin A., Badikov D., Panyutin V., Shevyrdyaeva G., Sheina S., Fintisova A., Petrov V., in *CLEO: Science and Innovations 2013*, Tech. Dig. San Jose, Cal., 9–14 June 2013.
24. Kato K., Petrov V., Umemura N. *Appl. Opt.*, **55**, 3145 (2016).
25. Kostyukova N.Yu., Kolker D.B., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Sherstov I.V., Karapuzikov A.A. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 095401 (2015).