

# Перестраиваемый в широком спектральном интервале источник лазерного излучения среднего ИК диапазона для оптико-акустической спектроскопии

Д.Б.Колкер, И.В.Шерстов, Н.Ю.Костюкова, А.А.Бойко, Ю.В.Кистенев, Б.Н.Нюшков, К.Г.Зенов, А.Г.Шадринцева, Н.Н.Третьякова

*Контроль летучих продуктов метаболических процессов в организме человека в выдыхаемом воздухе является перспективным методом для неинвазивной медицинской диагностики. Средний ИК диапазон (2–12 мкм) представляет большой интерес для диагностических применений спектрального анализа выдыхаемого воздуха. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия достаточно привлекательна для детектирования большого набора газообразных веществ, однако для повышения чувствительности метода требуются мощные источники перестраиваемого излучения. Нами рассмотрены возможности использования параметрического генератора света на основе кристалла  $BaGa_4Se_7$  в качестве перестраиваемого в широком спектральном интервале источника лазерного излучения среднего ИК диапазона для лазерной оптико-акустической спектроскопии.*

**Ключевые слова:** летучие органические вещества, выдыхаемый воздух, лазерная оптико-акустическая спектроскопия, параметрический генератор света, халькогениды.

## 1. Введение. Постановка проблемы

Контроль летучих органических веществ (ЛОВ) в выдыхаемом воздухе является перспективным подходом для оперативного экспресс-анализа метаболических процессов в организме человека. Так, обострение бронхиальной астмы сопровождается увеличением содержания в выдыхаемом воздухе  $NO$ , пентана, аммиака,  $CO$  [1–4], а у больных с хронической обструктивной болезнью легких – этана [5]. К маркерам пневмонии относят  $CO$ , продукты перекисного окисления липидов (ПОЛ), в частности пропан и бутан, перекись водорода, аммиак [6, 7]. Легочный туберкулез также сопровождается выделением продуктов ПОЛ [8, 9]. Потенциальными маркерами рака легких (РЛ) в пробах выдыхаемого воздуха (ПВВ) являются спирты, альдегиды, кетоны, углеводороды [10]. В ПВВ больных РЛ наблюдалось увеличение содержания изопропилового спирта, 2,3-гександиона, камфары, бензофенона, производных тетроксана, бензола, антрацена, бензойной кислоты, фурана, сложных эфиров, а также 3-метилоктана, 3-метилнонана, изопрена, циклогексана, гептанола, гекса-

наля и производных гептана, декана, бензола [11]. Похожие ЛОВ, характерные для рака легких, выделены в [12], это – изопрен, 2-метилпентан, пентан, этиленбензол, ксилол, триметилбензол, толуол, бензол, гептан, декан, стирол, октан, пентаметилгептан. Согласно контрольным измерениям [13] в ПВВ пациентов с РЛ обнаружено достоверное снижение концентраций изопрена, ацетона и метанола, в то время как концентрация 2-бутанола, бензальдегида, 2,3-бутандиона, 1-пропанола, ацетофенона, циклопентена, тетраметилкарбамида и бутилацетата достоверно выросла. Диабет влияет не только на содержание в ПВВ ацетона, но и на содержание  $CO$ ,  $CO_2$ , этанола и алканов [14, 15].

Спектральные полосы для детектирования колебательных мод представленных выше диагностически значимых ЛОВ лежат в диапазоне 3–11 мкм [15–18]. Таким образом, средний ИК диапазон (2–12 мкм) представляет большой интерес для медицинских применений спектроскопического анализа ПВВ.

Для генерации перестраиваемого в указанном диапазоне лазерного излучения могут быть использованы разные источники. Газовые лазеры, например  $CO$ -лазеры ( $\lambda = 2.5–4.2, 4.8–8.3$  мкм), распространены и доступны, но дискретность перестройки длины волны затрудняет контроль большого числа ЛОВ. Диодные лазеры обычно имеют небольшую мощность (порядка единиц милливатт в одночастотном режиме) и небольшой диапазон ( $\sim 0.1$  мкм) непрерывной перестройки их длины волны. Квантово-каскадные лазеры также обладают относительно небольшим диапазоном перестройки (менее 1 мкм) и имеют высокую стоимость.

Лазерная оптико-акустическая спектроскопия (ЛОАС) в целом достаточно привлекательна для детектирования большого набора газообразных веществ, поскольку обладает большим динамическим диапазоном, низким пределом обнаружения, достаточной селективностью и требует небольшого объема газовой пробы для анализа. При выборе источника излучения для ЛОАС необходимо

**Д.Б.Колкер.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15б; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1; Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630072 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20  
**И.В.Шерстов, Н.Ю.Костюкова, А.А.Бойко, Б.Н.Нюшков.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15б; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1  
**Ю.В.Кистенев.** Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; e-mail: yuk@iao.ru  
**К.Г.Зенов, А.Г.Шадринцева, Н.Н.Третьякова.** Россия, ООО «Специальные технологии», Россия, 630053 Новосибирск, ул. Зеленая горка, 1/3

Поступила в редакцию 15 сентября 2018 г., после доработки – 3 декабря 2018 г.

учитывать, что акустический сигнал пропорционален поглощенной газовой пробой энергии. Для получения необходимой средней мощности ИК излучения наряду с газовыми лазерами могут применяться параметрические генераторы света (ПГС), которые также обеспечивают непрерывную перестройку в широком диапазоне [19].

В работе [20] описан перестраиваемый оптический параметрический усилитель среднего ИК диапазона, в котором в качестве нелинейного элемента использовалась периодически поляризованная структура на основе стехиометрического танталата лития (PPSLT). Накачка осуществлялась системой на основе Nd-лазера, длительность импульса составляла 800 пс, частота следования – 0.5 кГц, энергия – до 40 мДж. Спектральная перестройка холостой волны в диапазоне 3–3.5 мкм осуществлялась при изменении температуры нелинейного элемента. Система обеспечивала генерацию импульсов на частоте холостой волны с энергией 4.1 мДж и длительностью 600 пс.

В работе [21] представлен ПГС, одновременно генерирующий излучение на двух длинах волн (3295 и 3469 нм). Для уменьшения потерь сигнальной волны использовался однорезонаторный ПГС с соосно расположенными нелинейными кристаллами КТА и КТР в одном резонаторе. Таким образом, различные поляризационные составляющие излучения Nd:YAG-лазера могли по отдельности накачивать нелинейные кристаллы, реализуя параллельную схему ПГС. При этом максимальная средняя мощность составляла 1.01 и 0.81 Вт, пиковая мощность импульсов – 23.3 и 18.7 кВт на длинах волн 3295 и 3469 нм соответственно при длительности импульса 6.2 нс.

Для создания ПГС с перестройкой в диапазоне 3–4 мкм в качестве нелинейного элемента использовался кристалл КTiOAsO<sub>4</sub> с накачкой Nd:YAG-лазером; энергия в импульсе была не менее 6 мДж, частота следования импульсов – 10 Гц, ширина линии генерации составляла 1–5 см<sup>-1</sup> [22, 23].

В ПГС среднего ИК диапазона с накачкой излучением Tm:YAP-лазера ( $\lambda_p = 1.94$  мкм) с модуляцией добротности [24] для параметрического преобразования излучения использовались кристаллы последнего поколения ZGP и CSP, обладающие низким поглощением на длине волны накачки. Исследовались различные двухрезонаторные конфигурации ПГС, в том числе с однопроходной и двухпроходной накачкой. Генерация излучения была реализована в диапазоне 3.6–4.2 мкм. В случае двухпроходной накачки максимальная мощность излучения достигала 2.3 и 2.5 Вт при оптической эффективности преобразования 58% и 64% для кристаллов ZGP и CSP соответственно.

В работе [25] описан ПГС с двухпроходной накачкой на основе периодических структур MgO:PPLN. Источником накачки служил малогабаритный наносекундный Nd:YLF-лазер ( $\lambda_p = 1.053$  мкм), длительность импульса накачки составляла 5–7 нс при максимальной энергии импульса 300 мкДж и частоте следования 1–7 кГц. Порог генерации ПГС 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 2–4.3 мкм. В области 4.2 мкм порог генерации составил 36 мкДж, а в области 4.7 мкм – 49 мкДж. Оптическая эффективность преобразования в диапазоне длин волн 4.2–4.7 мкм была 3.3%–0.4%.

Существует небольшое число нелинейных кристаллов, которые обеспечивают параметрическое преобразование излучения твердотельных лазеров с длиной волны генерации около 1 мкм в диапазоне 3–30 мкм. В работе [26] представлен параметрический генератор света на основе AgGaS<sub>2</sub> (AGS) с лазерной накачкой ( $\lambda_p = 1$  мкм), обеспечивающий генерацию холостой волны вплоть до 11.3 мкм. Высокими энергетическими характеристиками обладают кристаллы HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> (HGS) – получена энергия в импульсе до 3 мДж на длине волны 6.3 мкм [27], однако технология выращивания кристаллов HGS необходимых размеров чрезвычайно сложна. Для ПГС используются также твердые растворы Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Ga<sub>2</sub>S<sub>4</sub>, однако контроль их состава является сложной проблемой. Кристаллы халькопиритов (CSP) имеют высокую нелинейность, но низкую лучевую стойкость, а диапазон их прозрачности ограничен 6.5 мкм [28].

Для создания ПГС среднего ИК-диапазона перспективны нелинейные кристаллы ZnGeP<sub>2</sub> (ZGP), CdSiP<sub>2</sub> (CSP), а также кристаллы ориентированного арсенида галлия (orientation-patterned (OP)-GaAs) и ориентированного фосфида галлия ((OP)-GaP). С использованием кристаллов (OP)-GaP в качестве нелинейной среды реализована генерация непрерывного излучения с перестройкой в диапазоне 4608–4694 нм. Так, для кристалла длиной 40 мм на выходе ПГС получена мощность свыше 30 мВт практически во всем (более 95%) диапазоне перестройки при максимальной мощности до 43 мВт [29].

В работе [30] на основе кристалла (OP)-GaAs, накачиваемого излучением пикосекундного лазерного источника ( $\lambda_p = 1.952$  мкм), создан ПГС с диапазонами перестройки 2552–2960 нм (сигнальная волна) и 5733–8305 нм (холостая волна). Максимальная энергия импульса составила 0.40 мкДж (для сигнальной волны на длине волны 2942 нм) и 0.16 мкДж (холостая волна, 5800 нм) при общей эффективности преобразования 22.4%. Длительность генерируемых импульсов была равна 36 пс.

В работе [31] исследована внутриврезонаторная генерация разностной частоты в каскадной схеме ПГС. В качестве первого каскада использовался ПГС на основе периодически структурированной PPKTP. Во втором каскаде на основе (OP)-GaAs была реализована генерация разностной частоты для сигнальной и холостой волн первого каскада. Накачка первого каскада осуществлялась импульсным излучением Nd:YAG-лазера ( $\lambda_p \approx 1$  мкм). Продемонстрирована возможность широкой перестройки длины волны в диапазоне 7–9.2 мкм при средней мощности ~10 мВт (частота следования импульсов 1–3 кГц).

Ранее нами был представлен оптико-акустический лазерный газоанализатор «ЛазерБриз», в котором использовался комбинированный ПГС на основе нелинейных кристаллов fan-out MgO:PPLN и HGS в качестве источника излучения с диапазоном перестройки 2.7–10.6 мкм [32]. Время записи спектра поглощения ПВВ составляло 5–8 мин, поскольку перестройка длины волны излучения ПГС осуществлялась путем поворота кристалла HGS и смещения вдоль оси Y структуры fan-out MgO:PPLN относительно оси резонатора ПГС. Дополнительным недостатком такой системы является сложная нелинейная зависимость перестраиваемой длины волны при сканировании всего спектрального диапазона, что затрудняет ее контроль в процессе сканирования.

Недавно появились перспективные для среднего ИК диапазона кристаллы халькогенидов BaGa<sub>4</sub>S<sub>7</sub> (BGS) и

$\text{BaGa}_4\text{Se}_7$  (BGSe); последний обладает диапазоном прозрачности 0.47–18 мкм, что потенциально позволяет осуществлять перестройку длин волн вплоть до 18 мкм [28].

В настоящей работе рассмотрены возможности использования ПГС на основе кристалла  $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$  для ЛОАС.

## 2. Экспериментальная реализация ПГС на основе кристалла $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$

Кристалл BGSe является двухосным и относится к классу симметрии  $m$  моноклинной сингонии. При этом диэлектрические оси кристалла  $X$  и  $Z$  совпадают с соответствующими кристаллографическими осями  $b$  и  $c$  [33–37].

Параметрическая генерация света в кристалле BGSe впервые реализована в [38]. Источником накачки служил Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности ( $\lambda_p = 2.09$  мкм). В работе использовался кристалл с размерами  $6 \times 6 \times 30$  мкм и ориентацией в  $Y$ -плоскости ( $\theta = 40.8^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ) для реализации взаимодействия первого типа (o-ee) в плоскости  $XZ$ . Диапазон перестройки составил 3–5 мкм, что не превышает верхний предел (5 мкм) для оксидных сегнетоэлектриков, оптическая эффективность достигала 7% ( $\sim 1.4$  мДж при энергии накачки 20 мДж).

В работе [28] описана реализация ПГС на кристалле BGSe с накачкой излучением Nd:YAG-лазера ( $\lambda_p = 1064$  нм). Кристалл BGSe был вырезан с углом среза  $\theta = 46^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , имел размеры  $10.33 \times 11.95 \times 14.57$  мм<sup>3</sup>. Использование мощного Nd:YAG-лазера (энергия накачки  $E_p$  до 250 мДж, длительность импульса  $\tau_p = 8$  нс, частота следования  $f_p = 10$  Гц) позволило получить энергию холостой волны 3.7 мДж на длине волны 7.2 мкм при  $E_p = 63$  мДж без значительного насыщения при квантовой эффективности  $\sim 40\%$  (ограничение по выходной энергии было связано не с порогом разрушения кристалла BGSe, а с возможным повреждением заднего отражающего зеркала резонатора ПГС).

### 2.1. Оптическая схема ПГС

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис.1. В качестве источника накачки ПГС использовался Nd:YLF-лазер с диодной накачкой и модуляцией добротности (TECH-1053-N, «Лазер-Компакт», Россия).

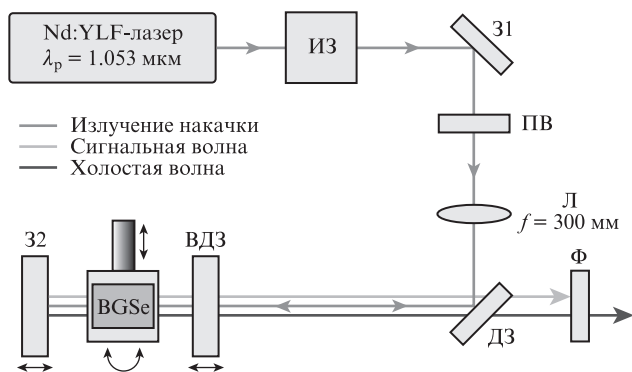


Рис.1. Блок-схема ПГС:

ИЗ – изолятор; 31 – зеркало; ПВ – полуволновая пластина; Л – линза; ДЗ – дихроичное зеркало; ВДЗ – входное (выходное) дихроичное зеркало ПГС из ZnSe для ввода (вывода) излучения в резонатор; 32 – отражающее зеркало с золотым покрытием; Ф – интерференционные фильтры.

Его параметры: длина волны излучения накачки  $\lambda_p = 1.053$  мкм, длительность импульса  $\tau_p = 16$  нс, частота следования импульсов  $f_p = 100$  Гц, ширина линии излучения  $\Delta\nu_p \approx 1$  см<sup>-1</sup> (30 ГГц). Максимальная энергия импульсов накачки не превышала 1.3 мДж, параметры качества пучка  $M_x^2 = M_y^2 = 1.3$ . Отметим, что, в отличие от работы [28], лазер накачки имеет не только более короткую длину волны (1.053 мкм), но и много меньшую (примерно в 50 раз) энергию импульса [39].

Однорезонансный резонатор ПГС был образован двумя зеркалами, коэффициенты пропускания и отражения которых обеспечивали возможность работы с двухпроходной накачкой. В данной схеме резонанс имел место только для сигнальной волны; обратная оптическая связь для лазера накачки подавлялась за счет использования изолятора Фарадея. Полуволновая пластина поворачивала направление поляризации излучения лазера накачки по вертикали относительно плоскости  $XZ$  кристалла BGSe, чтобы удовлетворить требованию фазового синхронизма первого типа o-ee. Из-за малости энергии импульса накачки диаметр пучка накачки для достижения порога параметрической генерации был уменьшен с помощью линзы с фокусным расстоянием  $f = 300$  мм (материал линзы – BK7) до пятна с размерами  $2w_x = 0.42$  мм и  $2w_y = 0.42$  мм.

Излучение лазера накачки направлялось в резонатор ПГС с помощью дихроичного зеркала ДЗ из ZnSe, расположенного под углом  $45^\circ$ . Зеркало имело высокий коэффициент отражения (в среднем  $\sim 97\%$  при нормальном падении) в диапазоне длин волн 1.0–1.1 мкм и высокий коэффициент пропускания ( $\sim 90\%$ ) в диапазоне длин волн 1.15–10 мкм. Установка поворотного зеркала под углом  $45^\circ$  обеспечивала частичную фильтрацию излучения накачки. Несколько комбинаций интерференционных фильтров (Ф) использовались для максимально эффективного вывода излучения холостой волны из ПГС, а также осуществляли фильтрацию излучения накачки, частично прошедшего через поворотное зеркало ДЗ.

Зеркало ВДЗ, выполненное на подложке из ZnSe, обеспечивало ввод и вывод излучения. Заднее зеркало резонатора ПГС с золотым покрытием имело высокий ( $\sim 98\%$ ) коэффициент отражения во всем рабочем диапазоне. Длина резонатора выбиралась минимально возможной ( $L_{\text{cav}} \geq 18$  мм) для увеличения числа обходов сигнальной волны и уменьшения значения энергии накачки для достижения порога параметрической генерации. Входное вогнутое зеркало (радиус кривизны  $R = 1000$  мм) уменьшало расходимость излучения сигнальной волны. Коэффициент пропускания зеркала  $T$  на  $\lambda_p = 1.053$  мкм составлял  $93\%$ ; коэффициент отражения  $R_s$  составлял около  $90\%$  в диапазоне длин волн 1.28–1.8 мкм и постепенно уменьшался примерно до  $60\%$  в диапазоне 1.8–2.1 мкм. Среднее значение коэффициента  $T$  в диапазоне 2.28–11 мкм (для холостой волны) равно  $75\%$ .

Используемый нами кристалл  $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$  с размерами  $3 \times 7 \times 11.8$  мм (рис.2) был выращен в Кубанском государственном университете (Россия) методом Бриджмена – Стокбаргера. Кристалл ориентирован для реализации первого типа фазового синхронизма ( $\theta = 45^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ), направление поляризации излучения накачки выбрано вдоль стороны 3 мм (направление диэлектрической оси), направление поляризации сигнальной (холостой) волны лежало в плоскости  $XZ$  (верхняя или нижняя грань кристалла на рис.2). Для обеспечения широкого диапазона пере-

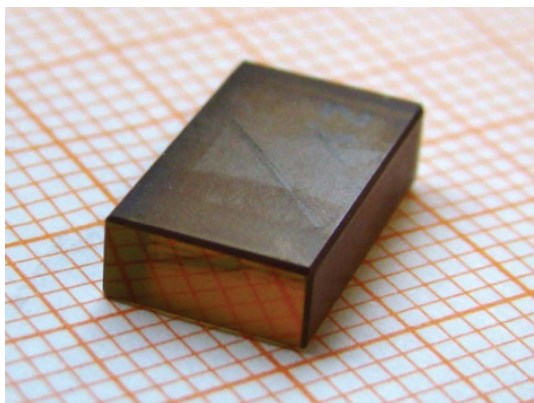


Рис.2. Фотография кристалла BGSe. Темно-желтый оттенок возникает из-за некоторого поглощения в начале видимой части спектра. Цветной вариант рис.2 помещен на сайте нашего журнала <https://www.quantum-electron.ru>.

стройки длины волны ПГС при повороте кристалла использовалась более широкая поперечная апертура (7 мм).

Кристалл BGSe находился в медном держателе с термостатом при постоянной температуре ( $40 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ), которая поддерживалась с помощью элемента Пельтье. На рабочие грани кристалла было нанесено однослойное просветляющее (с центром на длине волны  $\sim 1.5$  мкм) покрытие, что обусловило высокий коэффициент пропускания кристалла (более 85%) в диапазоне 1–2 мкм (рис.3). В среднем ИК диапазоне (5–11 мкм) пропускание составило  $\sim 72\%$ , что больше, чем у кристаллов без покрытия.

Для реализации перестройки длины волны держатель с кристаллом BGSe размещался на моторизованной поворотной платформе STANDA 8-MR-191-30. Угол синхронизма определялся пересчетом измеренного угла установки кристалла (относительно нормального падения пучка накачки) в значение внутреннего угла в кристалле в соответствии с законом Снеллиуса.

Для смещения кристалла в направлении, перпендикулярном оптической оси резонатора, использовалась также дополнительная линейная подвижка (STANDA 8MT173-20). При помощи контроллера, подключенного к компьютеру, контролировался угол поворота кристал-

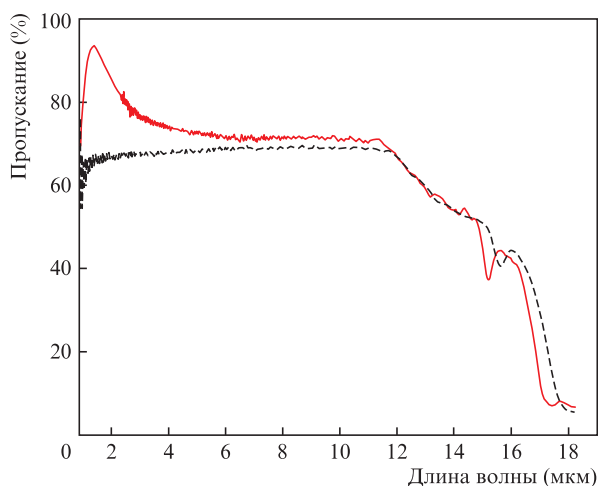


Рис.3. Спектры пропускания образца кристалла BGSe длиной 12.8 мм для неполяризованного излучения до (пунктирная кривая) и после (сплошная кривая) нанесения антиотражающего покрытия, обеспечившего большее пропускание на длине волны накачки и в диапазоне сигнальных длин волн (1.17–2.02 мкм).

ла  $\theta$ , а также его линейное смещение относительно оптической оси резонатора. Для обеспечения максимальной перестройки длины волны (угол ориентации кристалла BGSe  $\theta = 45^\circ$  соответствует длине холостой волны  $\lambda_i \approx 8$  мкм) было увеличено расстояние между зеркалами 32 и ВДЗ, образующими резонатор.

## 2.2. Исследование спектрального диапазона перестройки ПГС

Для ПГС на основе кристалла BGSe экспериментальная зависимость энергии импульсов холостой волны от длины волны, измеренная после зеркала ВДЗ, показана на рис.4. Для определения длины волны в диапазоне 2.6–10.4 мкм использовался измеритель длины волны HighFinesse (LSA L IR). При этом значение длины холостой волны было получено расчетным путем из закона сохранения энергии

$$(\lambda_p)^{-1} = (\lambda_s)^{-1} + (\lambda_i)^{-1}.$$

Энергия импульсов холостой волны ПГС измерялась пироэлектрическим детектором (OPHIR, VEGA PE10-C). Применение фильтров обеспечивало эффективную блокировку излучения только для длин волн ниже 1.683 мкм, в связи с этим в области длин волн примерно от 2.2 мкм (вблизи точки вырождения  $2\lambda_p$ ) до 2.6 мкм энергия холостой волны не могла быть должным образом измерена из-за высокого уровня энергии сигнальной волны. Поэтому зависимость  $E_i(\lambda)$  показана для длин волн более 2.6 мкм.

Перестройка длины холостой волны, реализованная на одном кристалле BGSe, наблюдалась в диапазоне 2.2–10.5 мкм, что превышает интервал перестройки 5.6–10.8 мкм, полученный в [40], где для генерации были использованы два кристалла HGS с ориентацией  $\theta = 47^\circ$  и  $60^\circ$ . Несмотря на то что коэффициент нелинейности  $\chi^{(2)}$  в кристалле HGS в 4 раза больше, чем в BGSe, выходная энергия холостой волны ПГС на основе кристалла BGSe была в 4–5 раз выше, чем у ПГС на основе кристалла HGS; при этом максимальная импульсная энергия составила 45 мкДж на длине волны  $\sim 3.3$  мкм и 14 мкДж на длине волны  $\sim 8$  мкм (для ПГС на кристалле HGS энергия  $E_i$  была менее 8 мкДж во всем диапазоне перестройки 4.2–10.8 мкм). Столь широкий диапазон перестройки на

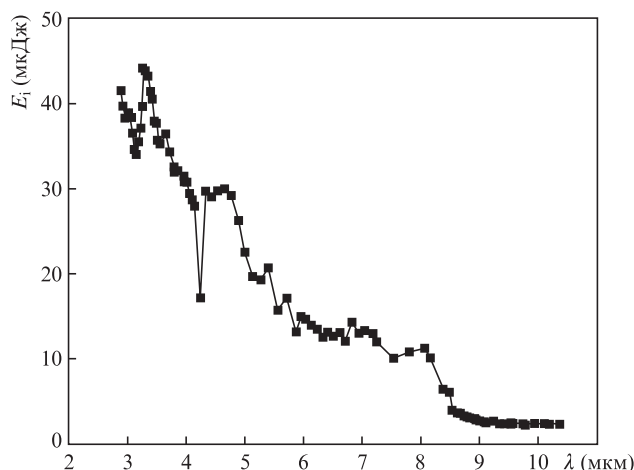


Рис.4. Зависимость энергии импульсов холостой волны от длины волны.

одном кристалле BGSe демонстрирует его преимущества по сравнению с кристаллом HGS.

Общая тенденция к снижению эффективности преобразования (см. рис.4) обусловлена обратно пропорциональной зависимостью параметрического усиления от  $\lambda_i$ . Пиковое значение выходной энергии ( $E_i = 45$  мкДж) вблизи 3.3 мкм отвечает высокой эффективности оптической системы, поскольку коэффициент отражения входного зеркала  $R_s = 95\%$  в диапазоне 1.4–1.62 мкм ( $\lambda_s = 1.55$  мкм).

Резкое падение  $E_i$  на длине волны 4.2 мкм и в области 5.5–6 мкм, очевидно, связано с поглощением излучения атмосферными газами ( $\text{CO}_2$  и пары воды). Небольшой рост  $E_i$  вблизи 8.1 мкм соответствует обычно наблюдаемому увеличению усиления подобных наносекундных ПГС, когда кристалл расположен нормально относительно оси линейного резонатора [28, 37], в результате чего формируется так называемый эффект эталонного резонатора, обусловленный наличием плоскопараллельных граней оптических элементов, имеющих просветляющее покрытие в данном диапазоне. Отметим, что полученная нами энергия холостой волны ниже, чем в [28], из-за меньшего (в 10 раз) диаметра пучка накачки.

Зависимость энергии импульсов в интервале 9.2–10.4 мкм обусловлена тем, что в этом диапазоне коэффициент отражения входного зеркала для сигнальной волны резко падает от 50% до 20%. Уменьшение усиления для сигнальной волны в резонаторе, вероятно, заменяет в указанном диапазоне процесс параметрической генерации на процесс параметрического усиления.

На рис.5 показаны зависимости длин волн излучения ПГС (сигнальной  $\lambda_s$  и холостой  $\lambda_i$ ) от углов фазового синхронизма, связанные с кривой перестройки волн в ИК диапазоне. Видно, что длина холостой волны может быть перестроена практически от точки вырождения ( $\lambda_s = \lambda_i = 2\lambda_p = 2.106$  мкм) до 10.5 мкм. При этом в ближнем ИК диапазоне длина холостой волны была измерена непосредственно (кружки на рис.5), тогда как в другой части ИК диапазона зависимость была построена путем измерения длины сигнальной волны (квадраты на рис.5) с последующим пересчетом в длину холостой волны с использованием закона сохранения энергии.

Из-за невысокой энергии излучения Nd:YLF-лазера ( $E_p < 1$  мДж на входном зеркале ПГС) и меньшей величины параметрического усиления (приводит к более высокому порогу генерации) мы не смогли достичь того же

значения максимальной длины волны перестройки (17 мкм), как в работе [28], полученного для аналогичного образца кристалла BGSe, но при гораздо более мощном излучении накачки Nd:YAG-лазера ( $E_p > 100$  мДж).

### 3. Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования ПГС на основе кристалла  $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$  с накачкой излучением Nd:YLF-лазера ( $\lambda_p = 1.053$  мкм) с модуляцией добротности. Использовался первый тип взаимодействия (o-ee) в Y-плоскости. Энергия импульсов накачки, соответствующая порогу генерации ПГС, составила 0.25 мДж. Установлено, что лучевая стойкость кристалла BGSe равна  $\sim 2.04$  Дж/см<sup>2</sup> при частоте следования импульсов 100 Гц. В проведенном эксперименте получена перестройка длины холостой волны ПГС в спектральном диапазоне 2.6–10.4 мкм.

Использование ПГС на основе кристалла  $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$  в качестве источника излучения в лазерном оптико-акустическом спектрометре «ЛазерБриз» позволит отказаться от громоздкой схемы комбинированного ПГС [32], в котором при сканировании длины волны происходит переключение двух блоков ПГС: одного на основе fan-out PPLN и другого на основе тандема двух кристаллов HGS, обеспечивающих перестройку длины волны в диапазоне 2.7–10.6 мкм. Поскольку в представленном ПГС весь диапазон перестройки (2.6–10.8 мкм) реализуется только за счет угловой перестройки одного нелинейного кристалла BGSe, оптическая схема спектрометра значительно упрощается (по сравнению с использованной в «ЛазерБриз»), что приведет к более надежному контролю длины волны излучения в процессе спектрального сканирования пробы, уменьшению времени сканирования и повышению стабильности.

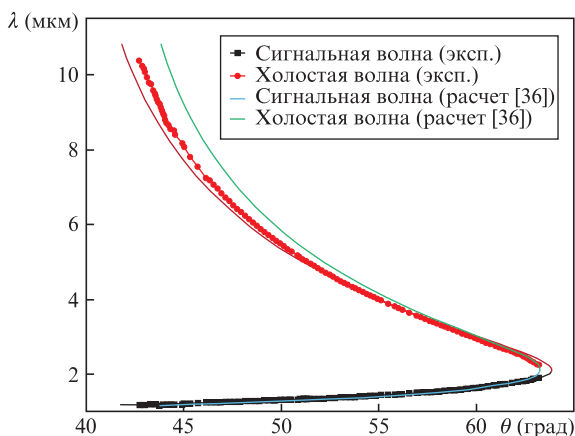


Рис.5. Зависимость длины волны от угла синхронизма при накачке кристалла BGSe излучением Nd:YLF-лазера ( $\lambda_p = 1.053$  мкм) для первого типа взаимодействия (o-ee).

- Jatakanon A., Lim S., Kharitonov S.A., et al. *Thorax*, **53**, 91 (1998).
- Kharitonov S.A., Barnes P.J. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, **163**, 1693 (2001).
- Селиванова П.А., Старовойтова Е.А., Куликов Е.С., Краснобаева Л.А. *Бюллетень сибирской медицины*, **4**, 15 (2011).
- Horvath I., Donnelly L.E., Kiss A., et al. *Thorax*, **53**, 668 (1998).
- Paredi P., Kharitonov S.A., Leak D., Ward S., Cramer D., Barnes P.J. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, **162**, 369 (2000).
- Алякринская М.Д., Комар С.И. *Изв. Челябинского научного центра*, **1** (35), 179 (2007).
- Lechner M., Rieder J. *Current Med. Chem.*, **14**, 987 (2007).
- Phillips M., Ring Erickson G.A., Greenberg J., La Bombardi V., Munawar M.I., Tietje O. *Tuberculosis*, **87**, 44 (2007).
- Kwiatkowska S., Szkudlarek U., Łuczynska M., Nowak D., Zieba M. *Respiratory Medicine*, **101**, 574 (2007).
- Cao W. *Clin. Chem.*, **5**, 800 (2006).
- Altorki N., Phillips M., Nasser A. *Clin. Chim. Acta*, **2**, 76 (2008).
- Carbognani P., Poli D. *Respir. Res.*, **71**, (2005).
- Bajtarevic A., Ager C., Pienz M., Klieber M., Schwarz K., Ligor M., Ligor T., Filipiak W., Denz H., Fiegl M., Hilbe W., Weiss W., Lukas P., Jamnig H., Hackl M., Haidenberger A., et al. *BMC Cancer*, **9**, 348 (2009).
- Turner C., Walton C., Hoashi S., Evans M. *J. Breath Res.*, **3**, 046004 (2009).
- Greiter M.B., Keck L., Siegmund T., Hoeschen C., Oeh U., Paretzke H.G. *Diabetes Technology & Therapeutics*, **12**, 455 (2010).
- Kistenev Y.V., Bukreeva E.B., Bulanova A.A., Kuzmin D.A., Karapuzikov A.I., Kostyukova N.Y., Starikova M.K., Boyko A.A., Kolker D.B., Zenov K.G., Karapuzikov A.A. *J. Biomed. Opt.*, **20**, 065001 (2015).
- Stacewicz T., Bielecki Z., Wojtas J., Magryta P., Mikolajczyk J., Szabra D. *Opto-Electron. Rev.*, **24**, 82 (2016).

18. Wang C., Sahay P. *Sensors*, **9**, 8230 (2009).
19. Li J., Chen W., Yu B. *Appl. Spectr. Rev.*, **46**, 440 (2011).
20. Chuchumishev D., Trifonov A., Oreshkov B., Xu X., Buchvarov I. *Appl. Phys. B*, **124**, 147 (2018).
21. Huang H., Wang S., Liu X., Shen D. *Infrared Physics and Technology*, **93**, 91 (2018).
22. Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Sukhanov A.Ya., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. *J. Opt. Technol.*, **84**, 408 (2017).
23. Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. *J. Appl. Spectr.*, **85**, 457 (2018).
24. Cole B., Goldberg L., Chinn S., Zawilski K.T., Pomeranz L.A., Schunemann P.G., McCarthy J.C., Hopkins F.K. *Proc. SPIE, Solid State Lasers XXVII: Technology and Devices*, **10511**, 105110H (2018).
25. Колкер Д.Б., Пустовалова Р.В., Старикова М.К., Карапузи-ков А.И., Карапузилов А.А., Кузнецов О.М., Кистенев Ю.В. *ИТЭ*, №2, 124 (2012).
26. Vodopyanov K.I., Maffettone J.P., Zwieback I., Ruderman W. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1204 (1999).
27. 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).
28. Kostyukova N., Boyko A., Badikov V., Badikov D., Shevyrdyaeva G., Panyutin V., Marchev G., Kolker D., Petrov V. *Opt. Lett.*, **41**, 3667 (2016).
29. Devi K., Padhye A., Schunemann P.G., Ebrahim-Zadeh M. *Opt. Lett.*, **43**, 2284 (2018).
30. Fu Q., Xu L., Liang S., Shepherd D.P., Richardson D.J., Alam S. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **24**, 5100706 (2018).
31. Boyko A.A., Schunemann P.G., Guha S., Kostyukova N.Y., Kolker D.B., Panyutin V.L., Marchev G.M., Pasiskevicius V., Zukauskas A., Mayorov F., Petrov V. *Opt. Mater. Express*, **8**, 549 (2018).
32. Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Karapuzikov A.I., Shtyrov M.Y., Dukhovnikova N.Y., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Tikhonyuk I.I., Miroshnichenko I.B., Miroshnichenko M.B., Kolker D.B., Myakishev Y.B., Lokonov V.N., Kistenev Y.V., Kuzmin D.D. *Phys. Wave Phenomena*, **22**, 189 (2014).
33. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В. *Квантовая электроника*, **47**, 14 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 14 (2017)].
34. Badikov V., Badikov D., Shevyrdyaeva G., Tyazhev A., Marchev G., Panyutin V., Petrov V., Kwasniewski A. *Phys. Status Solidi RRL*, **5**, 31 (2011).
35. Yao J., Yin W., Feng K., Li X., Mei D., Lu Q., Ni Y., Zhang Z., Hu Z., Wu Y. *J. Cryst. Growth*, **346**, 1 (2012).
36. Boursier E., Seconds P., Ménaert B., Badikov V., Panyutin V., Badikov D., Petrov V., Boulanger B. *Opt. Lett.*, **41**, 2731 (2016).
37. Tyazhev A., Kolker D., Marchev G., Badikov V., Badikov D., Shevyrdyaeva G., Panyutin V., Petrov V. *Opt. Lett.*, **37**, 4146 (2012).
38. Yuan J.H., Li C., Yao B.Q., Yao J.Y., Duan X.M., Li Y.Y., Shen Y.J., Wu Y.C., Cui Z., Dai T.Y. *Opt. Express*, **24**, 6083 (2016).
39. Kolker D.B., Kostyukova N.Y., Boyko A.A., Badikov V.V., Badikov D.V., Shadrintseva A.G., Tretyakova N.N., Zenov K.G., Karapuzikov A.A., Zondy J.-J. *J. Phys. Commun.*, **2**, 035039 (2018).
40. Kostyukova N.Y., Kolker D.B., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Sherstov I.V., Karapuzikov A.A. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 095401 (2015).