

На правах рукописи



Бойко Андрей Александрович

**Исследование двухкаскадных параметрических преобразователей
лазерного излучения в диапазон от 6 до 18 мкм**

Специальность 01.04.05 – Оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» и в «Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук»

Научный руководитель: **Колкер Дмитрий Борисович**
доктор физико - математических наук

Официальные оппоненты: **Рубцова Наталия Николаевна**
доктор физико - математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория лазерной спектроскопии и лазерные технологий, заведующая лабораторией

Донцова Екатерина Игоревна
кандидат физико - математических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, И.о. учёного секретаря

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Защита состоится « » 2019 года в на заседании диссертационного совета Д 003.024.01, созданного на базе Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института лазерной физики СО РАН <http://www.laser.nsc.ru/>

Автореферат разослан « » 2019 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико - математических наук

Прудников О.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Источники когерентного излучения среднего ИК-диапазона (от 3 до 20 мкм) находят широкое применение в науке и технике. Ряд таких применений требует непрерывной перестройки длины волны излучения практически во всем среднем ИК-диапазоне. Длинноволновый край диапазона излучения твердотельных лазеров достигает ~ 3 мкм [1], поэтому основным подходом к охвату среднего ИК-диапазона является параметрическое преобразование с использованием нелинейных кристаллов (НК) [2,3].

В параметрических преобразователях с накачкой одномикронным излучением успешно применяют оксидные нелинейные, то есть нецентросимметричные кристаллы, такие как: КТР, КТА, LN, LBO и периодически поляризованные структуры на основе этих кристаллов РРКТР, РРКТА и РПЛН. В среднем область прозрачности оксидных кристаллов между полосами электронного и фононного поглощения занимает диапазон [0,2-0,3 – 3,0-4,5] мкм [4]. Благодаря значительному удалению коротковолновой границы поглощения от длины волны излучения накачки, эти кристаллы характеризуются высокими величинами лучевой стойкости к импульсной одномикронной накачке (~ 3 -5 Дж/см² при наносекундной длительности импульсов и частоте их следования 10-20 Гц [4]), которая в терминах МВт/см² в несколько раз превосходит порог генерации параметрического преобразователя. Однако коротковолновая граница электрон-фононного и фононного поглощения в оксидных кристаллах в окрестности 3,0-4,5 мкм не позволяет применять их в параметрических преобразователях для получения когерентного излучения в среднем ИК-диапазоне.

Приведенные соображения делают очевидной стратегию дальнейшего развития параметрических генераторов для получения когерентного излучения в средней ИК-области спектра [1-3,5].

В части, относящейся к нелинейным кристаллам – это поиск и апробация соединений с диапазоном прозрачности от видимой части спектра до 12-18 мкм и с дополнительными требованиями как по лучевой стойкости к импульсному одномикронному излучению наносекундной длительности на уровне 1-2 Дж/см², так и по величине коэффициентов квадратичной нелинейной восприимчивости на уровне 10-20 пм/В и более. Разумеется, в объемных нелинейных кристаллах необходимо, чтобы величина двулучепреломления была достаточной для реализации синхронных трехчастотных процессов, то есть коррелировала с дисперсией показателей преломления в актуальном диапазоне и была не менее 0,03-0,04 [4].

Кристаллов, удовлетворяющих всем перечисленным требованиям, по-видимому, не существует [1,2,4]. Основная причина в том, что перечисленные требования являются взаимоисключающими. Так, например, с увеличением ширины запрещенной зоны E_g [эВ] лучевая стойкость также увеличивается, однако величина коэффициентов квадратичной нелинейной восприимчивости уменьшается [6]. Для сохранения лучевой стойкости на уровне 1-2 Дж/см² необходимо, чтобы отношение E_g к энергии фотона излучения накачки E_p (импульсы наносекундной длительности с частотой следования 10-20 Гц) было не менее 2, желательно 2,5-3,0 и более. Но при ширине запрещенной зоны нелинейного кристалла 3-4 эВ характерная величина коэффициентов квадратичной нелинейной восприимчивости не превышает 5-7 пм/В [1,4].

Отметим также, что с увеличением частоты следования импульсов излучения накачки до сотен Гц необходима эффективная тепловая разгрузка нелинейного элемента, поэтому его теплопроводность должна быть не хуже 2-3 Вт/(м·К). Последнее означает достаточно плотную упаковку ионов кристаллической решетки и, как следствие, невысокие значения коэффициентов квадратичной нелинейной восприимчивости.

В качестве одного из основных критериев потенциальной перспективности кристаллов для параметрических генераторов будем рассматривать их лучевую стойкость к одномикронному излучению накачки. Мотивация следующая. С одной стороны, для этого излучения имеется наибольший массив экспериментальных данных и, как правило, характеристики пучков накачки наиболее близки к гауссовским, что позволяет унифицировать эти данные. С другой – кристаллы приемлемые для одномикронного излучения накачки будут заведомо эффективно работать и при более длинноволновом излучении накачки в силу возрастания параметра E_g/E_p .

Работы последних лет в области исследования и создания параметрических генераторов с одномикронной накачкой для получения когерентного излучения в средней ИК-области спектра [7–22] показали, что существуют кристаллы сульфидов и селенидов, характеристики которых близки к требуемым, но не по всей совокупности актуальных параметров.

Кратко остановимся на кристаллах класса селенидов. В большинстве бинарных, тройных и более сложных селенидов ширина запрещенной зоны в терминах длин волн лежит в интервале от 0,55 до 0,70 мкм и они не представляют интереса для заявленных целей, поскольку их лучевая стойкость к одномикронному излучению накачки ($E_g/E_p < 2$) будет экстремально низкой, менее 0,3-0,4 Дж/см². Однако несколько кристаллов тройных селенидов, содержащих в катионной подрешетке так называемые s – элементы (в частности Li или Ba), характеризуются шириной запрещенной зоны порядка 0,4-0,5 мкм ($E_g/E_p > 2$) и потенциально перспективны в качестве нелинейных элементов параметрических генераторов с накачкой одномикронным излучением.

К настоящему времени достаточно полно исследован и по совокупности своих характеристик наиболее интересен кристалл селеногаллата бария $BaGa_4Se_7$ [1,2,20–22]. Данное соединение кристаллизуется в структуру моноклинной сингонии (оптически двуосный кристалл) с точечной группой симметрии C_s (m). Для данного кристалла в диэлектрической системе координат x, y, z в установке $n_x < n_y < n_z$ (ось x ортогональна плоскости m). Ширина запрещенной зоны 2,64 эВ (0,47 мкм), область прозрачности по уровню 0,3 см⁻¹ между полосами электронного и фононного поглощения занимает диапазон от 0,75 до 14,7 мкм, величина двулучепреломления ($n_z - n_y = 0,06$, $n_y - n_x = 0,016$) достаточна для реализации трехчастотных процессов во всех трех главных плоскостях диэлектрической системы координат. Принимая во внимание $E_g/E_p = 2,26$ можно говорить об относительно высокой лучевой стойкости к одномикронному излучению накачки. Величина последней составляет 1,4 Дж/см² (14 нс, 100 Гц). В кристаллах с точечной группой симметрии C_s при выполнении условий Клейнмана (отсутствие поглощения и дисперсии коэффициентов нелинейной восприимчивости) ненулевыми в силу симметрии являются четыре недиагональных элемента (обозначения элементов даны в диэлектрической системе координат в установке ось x ортогональна плоскости симметрии m): d_{23} , d_{16} , d_{15} , d_{24} . Согласно [21] $d_{23} = 10$ пм/В, d_{15} и $d_{24} < 3$ пм/В, а оценка величины и знака коэффициента

d_{16} могут быть получены из данных работы [13] (d_{16} и d_{23} одного знака, $d_{16} \approx d_{23}$). С учетом выражений для эффективной нелинейной восприимчивости в главных плоскостях диэлектрической системы координат, наиболее энергетически выгодными являются процессы $ee-o$ в плоскости xz ($d_{\text{eff}} \approx 10$ пм/В и практически не зависит от угла фазового согласования в силу $d_{\text{eff}} = d_{16} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta$, $d_{16} \approx d_{23}$) и $oe-o$ в плоскости yz ($d_{\text{eff}} \approx d_{16} \cos \theta$). Процесс $oo-e$ в плоскости xy не реализуется из-за слишком большого двулучепреломления $n_z - n_y = 0,06$.

По совокупности перечисленных оптических характеристик селеногаллат бария является уникальным кристаллом для применения в параметрических генераторах с одномикронной накачкой. Это подтверждают и достигнутые в работе [20] рекордные результаты как по диапазону перестройки (2,7-17,0) мкм, так и по энергии импульса холостого излучения 3,7 мДж на длине волны 7,2 мкм (излучение накачки 1,064 мкм, 10 нс, 10 Гц, максимальная энергия импульса 63 мДж, максимальная пиковая плотность энергии в импульсе 0,64 Дж/см², максимальная средняя плотность мощности в импульсе 40 МВт/см²), полученные при реализации процесса $o-ee$ в плоскости xz на элементе длиной 14,6 мм, нормаль N к входной плоскости элемента имела ориентировку $N(\theta=46^\circ, \varphi=0^\circ)$.

Теплопроводность кристалла довольно низкая, 0,6-0,7 Вт/(м·К). По-видимому, эти данные, с учетом результатов в [20], нуждаются в уточнении.

Отметим, что для обсуждаемых целей допустимо применение и кристаллов кубической сингонии (естественно нецентросимметричных) с нулевым двулучепреломлением, но тогда с искусственно созданной регулярной доменной структурой. Последнюю имеет смысл создавать и в кристаллах более низкой симметрии с ненулевым двулучепреломлением, например в направлении максимального значения эффективной нелинейной восприимчивости, игнорируя вытекающие из условий фазового синхронизма требования к поляризации взаимодействующих волн. В обоих перечисленных случаях возможна реализация только квазисинхронных трехчастотных процессов.

В части поиска новых схемных решений при создании параметрических генераторов для получения когерентного излучения в средней ИК-области спектра перспективным представляется подход, основанный на двухкаскадной схеме [25–29]. В первом каскаде с нелинейным оксидным кристаллом одномикронное излучение накачки преобразуется в сигнальное и холостое излучения в спектральном диапазоне 1,7-2,8 мкм. Во втором каскаде с нелинейным селенидным кристаллом это излучение (или излучения) используется для получения холостого излучения в средней ИК-области спектра. Очевидное преимущество такой схемы состоит в снятии проблемы лучевой стойкости как в первом, так и во втором каскадах. Очевидный недостаток - в резком ухудшении качества излучения пучка накачки для второго каскада.

Цель диссертации состояла в создании и исследовании высокоэффективного широкополосного двухкаскадного параметрического преобразователя частоты, перестраиваемого в спектральном диапазоне от 5,8 до 18 мкм с накачкой импульсно-периодическим излучением Nd:YAG лазера с длиной волны 1,064 мкм, на основе тандема из двух внутриврезонаторных нелинейных элементов: периодически поляризованной структуры из нелинейного кристалла калий титанил фосфата, легированного ионами рубидия, Rb:KTiOPO₄ и объемного нелинейного кристалла

селеногаллата серебра AgGaSe_2 или селеногаллата бария BaGa_4Se_7 .

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- провести сравнительные модельные исследования условий фазового синхронизма и эффективности генерации одноэлементного ПГС на основе периодической структуры из нелинейного кристалла Rb:PPKTP с накачкой излучением импульсно–периодического Nd:YAG лазера, работающего на длине волны 1,064 мкм с длительностью импульсов излучения 8 нс;
- провести сравнительные модельные исследования условий фазового синхронизма, возможностей реализации и эффективности генерации ПГС на основе тандема из двух нелинейных элементов - периодической структуры из нелинейного кристалла Rb:PPKTP с внешней накачкой излучением Nd:YAG лазера и последовательно расположенного объёмного нелинейного кристалла AGSE с внутрирезонаторной накачкой излучением сигнальной волны периодической структуры Rb:PPKTP для получения максимально широкого диапазона перестройки частоты;
- создать и исследовать действующий лабораторный образец двухкаскадного ПГС на основе тандема из двух нелинейных элементов: периодической структуры из нелинейного кристалла Rb:PPKTP и объёмного кристалла AGSE с накачкой излучением Nd:YAG с длиной волны 1,064 мкм;
- исследовать возможность замены второго каскада ПГС на генератор разностной частоты (ГРЧ) на основе объёмных кристаллов AGSE или BGSE для увеличения эффективности параметрического преобразования частоты.

Научная новизна

Научная новизна в представленной концепции заключается в следующем:

- Впервые предложен новый вариант построения двухкаскадного ПГС, первый каскад которого работает с внешней накачкой неодимовым лазером, а второй каскад – с внутрирезонаторной накачкой излучением сигнальной волны первого каскада.
- Впервые исследованы свойства ПГС на основе тандема из двух нелинейных элементов смешанного типа: периодически поляризованной структуры Rb:PPKTP и объёмного нелинейного кристалла AGSE .
- Впервые экспериментально исследован внутрирезонаторный параметрический преобразователь частоты гибридного типа, первый каскад которого является параметрическим генератором света на основе периодической структуры из нелинейного кристалла Rb:PPKTP , а второй каскад – генератором разностной частоты излучения сигнальной и холостой волны параметрического генератора первого каскада на основе объёмного кристалла AGSE ;
- Впервые создан и экспериментально исследован генератор разностной частоты на основе нового нелинейного кристалла BGSE .

Основные положения, выносимые на защиту

1. Использование двухкаскадного тандема периодически поляризованной структуры из нелинейного кристалла Rb:KTiOPO_4 и объёмного кристалла AgGaSe_2 в резонаторе ПГС с внerezонаторной накачкой первого каскада излучением наносекундного Nd:YAG лазера на длине волны 1,064 мкм и внутрирезонаторной накачкой второго каскада излучением сигнальной волны первого каскада обеспечивает максимально широкий диапазон генерации за счёт минимизации влияния линейных и нелинейных оптических

потерь.

2. Реализация второго типа трёхволнового взаимодействия в объёмном кристалле AgGaSe_2 рассматриваемого ПГС расширяет диапазон генерации холостой волны до (8—18) мкм за счёт более высокого значения эффективной нелинейной восприимчивости по отношению к взаимодействию первого типа.

3. Изменение конфигурации второго каскада двухкаскадного ПГС на генератор разностной частоты на основе кристалла AgGaSe_2 увеличивает эффективность генерации выходного излучения в $\sim 4,5$ раза за счёт дополнительной инъекции излучения холостой волны первого каскада.

4. Использование нового нелинейного кристалла BaGa_4Se_7 с высокой лучевой стойкостью в генераторе разностной частоты второго каскада системы ПГС – ГРЧ позволяет получить сопоставимый уровень эффективности преобразования по сравнению с кристаллом AgGaSe_2 , при этом оценочное значение коэффициента эффективной нелинейности BaGa_4Se_7 меньше в $\sim 1,5$ раза.

Научная и практическая значимость

1. Предложен и реализован двухкаскадный параметрический генератор света с внутриврезонаторной накачкой, где в качестве нелинейного элемента первого каскада выступает периодически поляризованная структура кристалла калий титанил фосфата, легированного ионами рубидия Rb:KTiOPO_4 .

2. Впервые получена перестройка длины волны в диапазоне от 5,8 до 18 мкм за счёт реализации первого и второго типов взаимодействий в кристаллах AGSE второго каскада ПГС.

3. Для увеличения эффективности преобразования энергии накачки в энергию вторичной холостой волны, был предложен и реализован подход генерации разностной частоты с использованием сигнальной и холостой волн от первого каскада ПГС, для накачки нелинейных кристаллов второго каскада ГРЧ, не имеющих фазового синхронизма на длине волны внешней накачки.

Методология и методы исследования

Экспериментальная часть работы была проведена на базе лаборатории нелинейной оптики института имени Макса Борна (г. Берлин, Германия): импульсно периодический Nd:YAG лазер с максимальной энергией импульса 250 мДж, частотой следования импульсов 100 Гц и длительностью импульса 8 нс. Описанный лазер использовался в качестве источника накачки для первого каскада ППЧ. Исследование первого каскада началось с подбора НК и получения энергетических и спектральных характеристик излучения. Анализ полученных данных позволил оценить возможности получения когерентного излучения во втором каскаде и подобрать НК для получения широкой и непрерывной перестройки длины волны в среднем ИК диапазоне. Для получения характеристик двухкаскадной ППЧ системы были проведены исследования эффективности преобразования излучения внешней накачки в излучение среднего ИК диапазона.

Степень достоверности

Обоснованность и достоверность результатов, описанных в диссертационной работе, подтверждается представлением и обсуждением их на ряде международных научных конференций, а также статьями, опубликованными в рецензируемых научных журналах, в том числе рекомендованных перечнем ВАК.

Личный вклад автора

Все экспериментальные результаты данной работы получены лично автором. Автор занимался подготовкой и планированием экспериментов, а также проводил необходимые расчёты и анализ результатов. Подготовка научных статей проходила при непосредственном участии автора.

Апробация работы

Основные результаты работы представлены в 9 работах, 3 опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, а также докладывались и обсуждались на международной конференции по современным твердотельным лазерам ASSL 2015 (г. Берлин, Германия, 2015); на международной конференции по источникам излучения среднего инфракрасного диапазона MICS'2016 (г. Лос-Анджелес, США, 2016); на международной конференции по лазерам и электрооптике CLEO'16 (г. Сан-Хосе, США, 2016) и CLEO'17 (г. Сан-Хосе, США, 2017).

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 125 страниц, 1 таблицу, 61 рисунок и библиографический список из 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **ВВЕДЕНИИ** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи исследований.

ПЕРВАЯ ГЛАВА носит обзорный характер. В ней описывается состояние исследований в области твердотельных источников когерентного оптического излучения среднего инфракрасного диапазона. Проводится обзор нелинейнооптических кристаллов для преобразования частоты в среднем ИК диапазоне, которые могут быть использованы для создания параметрического генератора света. Так же в этой главе даны теоретические основы нелинейной оптики, дано теоретическое рассмотрение процессов ПГС, приведены условия фазового согласования.

Для приложений, использующих излучение из коротковолновой части средней ИК области до 5 мкм, могут быть использованы полупроводниковые, кристаллические и волоконные лазеры, системы ППЧ в том числе на основе НК с периодической доменной структурой. В области спектра от 5 до 25 мкм с возможностью перестройки длины волны выбор ограничивается квантовокаскадными лазерами или схемами ПГС и ГРЧ. Малая часть из используемых сейчас нелинейных оптических кристаллов соответствует перечисленным требованиям: высокий уровень лучевой стойкости, широкая запрещенная зона, широкая полоса пропускания в среднем ИК диапазоне, высокий нелинейный коэффициент, низкие остаточные потери в рабочем диапазоне, достаточное для создания ППЧ двулучепреломление, изотропность теплового расширения и высокая теплопроводность, высокая механическая твердость, технологическая возможность массового производства образцов оптического качества и большого размера. Выбор кристалла должен осуществляться с учётом его преимуществ и недостатков. При этом, если говорить о ПГС на основе оксидных кристаллов, то диапазон пропускания НК в редких случаях достигает 5 мкм. Продемонстрировано получение генерации излучения и перестройки длины волны при использовании лазерного источника накачки с длиной волны в области 1 мкм на следующих соединениях: LiGaS_2 [5], BaGa_4S_7 [6], CdSiP_2 [7], Ag_3AsS_3 [8], AgGaS_2 [9], $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ [10], HgGa_2S_4 [11], LiInSe_2 [12]. Но генерация излучения с длиной волны выше 5 мкм была продемонстрирована только на

соединениях: CdSiP_2 [13], Ag_3AsS_3 [14], HgGa_2S_4 [15], AgGaS_2 [16], LiInSe_2 [17], LiGaS_2 [5], BaGa_4S_7 [6].

Существует ряд проблем, таких как: как низкая лучевая стойкость и труднодоступность образцов большого объема высокого оптического качества и высокой однородности структуры. При использовании кристаллов AgGaSe_2 и ZnGeP_2 возникает проблема невозможности использования источников накачки с длиной волны 1 мкм, так как нижняя граница прозрачности находится выше уровня 1 мкм. В этом случае возможно применение лазеров на основе элементов, легированных Er^{3+} , с длиной волны вблизи 1,5 мкм и 2,9 мкм, а также лазеров на основе элементов, легированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} , с длиной волны излучения 2 мкм или же использовать каскадные схемы понижения частоты накачки. Также приводятся некоторые сведения из теории трехчастотных параметрических процессов, элементы теории параметрических генераторов света и генераторов разностной частоты на основе литературных источников.

Во **ВТОРОЙ ГЛАВЕ** описаны основные результаты работы по получению генерации вторичной холостой волны в спектральном диапазоне от 5,8 до 8 мкм. Приведены результаты экспериментов по получению параметрической генерации в двухкаскадном двухрезонаторном ПГС на основе кристалла Rb:PPKTP , с внешней накачкой импульсно-периодическим лазерным излучением с длиной волны 1,064 мкм. В данной главе исследуется однорезонансный ПГС второго каскада на основе кристалла AGSe с внутрирезонаторной накачкой на 1,85 мкм первичной сигнальной волной от первого каскада двухрезонаторного ПГС.

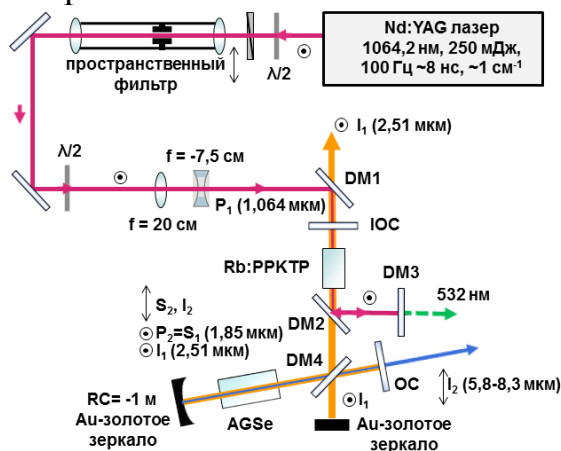


Рисунок 1 — Оптическая схема двухкаскадного ПГС на основе кристаллов Rb:PPKTP и AGSe для первого типа взаимодействия с внутрирезонаторной накачкой

На рисунке 1 приведена оптическая схема двухкаскадного ПГС на основе кристаллов Rb:PPKTP AGSe с внутрирезонаторной накачкой многомодовым Nd:YAG лазером с модуляцией добротности и максимальной частотой следования импульсов 100 Гц. Резонатор первого каскада был рассчитан для получения резонанса на сигнальной и холостой волнах, физические длины плеч резонатора отличались: 103 мм для плеча сигнальной волны S_1 , содержащего кристалл AGSe , и 88 мм для плеча холостой волны I_1 . Длина резонатора, содержащего кристалл AGSe , для вторичной сигнальной волны S_2 составляла 62 мм.

Данные, приведенные на рисунке **Ошибка! Неизвестный аргумент ключа.**, были нормированы на коэффициент пропускания 91 % для I_1 зеркала DM1 . Дихроичное

зеркало DM4 выполнено на подложке из материала CaF_2 с коэффициентом отражения $R=97\%$ для сигнальной длины волны $S_1 = P2$. Коэффициент пропускания для $2,5\text{ мкм}$ (I_1 и S_2) составляет $\sim 70\%$ (для s и p поляризации) это значение достигалось при угле падения 50° , коэффициент пропускания для I_2 составлял $\sim (80 \pm 5)\%$.

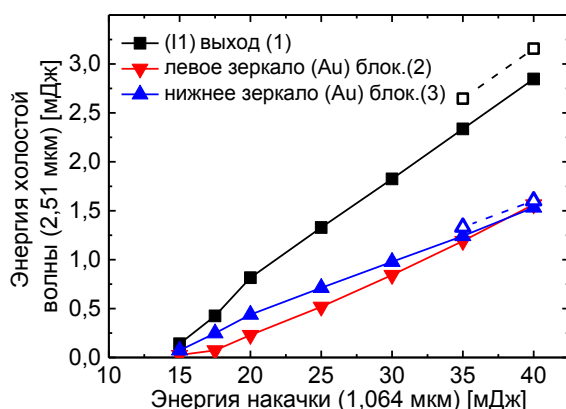


Рисунок 2 — Производительность первого каскада (холостая волна I_1) без кристалла AGSE с двумя плоскими золотыми (Au) зеркалами (выходы (1), (2) и (3)) и две точки с золотым зеркалом $RC = 1\text{ м}$ в левом плече

На рисунке **Ошибка! Неизвестный аргумент ключа.** показана зависимость энергии холостой волны первого каскада на основе кристалла Rb:PPKTP с удаленным из резонатора кристаллом AGSE. При комнатной температуре длина сигнальной волны S_1 составляла $1,85\text{ мкм}$, а длина холостой волны I_1 составила $2,51\text{ мкм}$. Как видно из рисунка **Ошибка! Неизвестный аргумент ключа.**, оба плеча резонатора, содержащие зеркала с золотым покрытием, обеспечивают обратную связь для холостой волны I_1 . Полученный уровень энергии для I_1 равный $3,16\text{ мДж}$ вне резонатора, приводит к оценке в $7,8\text{ мДж}$ для внутррезонаторной энергии S_1 , которая будет использоваться для накачки второго каскада с кристаллом AGSE. Так же был рассчитан уровень преобразования энергии первичной накачки $P1$ в общую энергию второго каскада и составил $\sim 34\%$. Согласно полученному на основе графиков, приведённых на рисунке **Ошибка! Неизвестный аргумент ключа.**, экстраполированному значению порога генерации равному 10 мДж , дифференциальная эффективность для S_1 и I_1 составляет до 45% .

В качестве НК второго каскада был выбран образец кристалла AGSE для первого типа взаимодействия с углами $\varphi = 45^\circ$, $\theta = 52^\circ$, длиной 14 мм и входной апертурой размером $4,5 \times 4,5\text{ мм}^2$. На рабочие грани кристалла было нанесено просветляющее покрытие, коэффициент пропускания для $S_1 = P2$ составил 94% , коэффициент пропускания для S_2/I_1 составил $\sim 87\%$, для диапазона длин волн I_2 измеренный коэффициент пропускания составил 70% . Энергия холостой волны I_2 выводилась после двойного прохода через кристалл.

На рисунке 3 продемонстрирована зависимость выходной энергии вторичной холостой волны I_2 на длине волны $7,3\text{ мкм}$ от энергии первичной накачки. Полученная энергия вторичной холостой волны составила $\sim 143\text{ мкДж}$, что примерно в 15 раз выше, чем энергия, указанная в работе [18] на длине волны порядка 8 мкм , где в качестве НК второго каскада был взят кристалл ZnGeP_2 . Получено $14,3\text{ мВт}$ средней мощности при частоте следования импульсов 100 Гц , что выше результатов работы [18] примерно в

300 раз. Диапазон перестройки, в значительной степени, определяется выбранными углами фазового синхронизма НК второго каскада ПГС. Важная часть спектра в среднем ИК диапазоне для минимально инвазивной хирургии была получена при выбранных параметрах кристалла AGSE [19]. Исследован двухкаскадный ПГС с внутриврезонаторной накачкой, второй каскад которого основан на кристалле AGSE для первого типа взаимодействия, получена генерация вторичной холостой волны в диапазоне от 5,8 до 8,3 мкм. Максимальная выходная энергия вторичной холостой волны составила 150 мкДж при длине волны 7,3 мкм с частотой следования импульсов 100 Гц (рисунок 4).

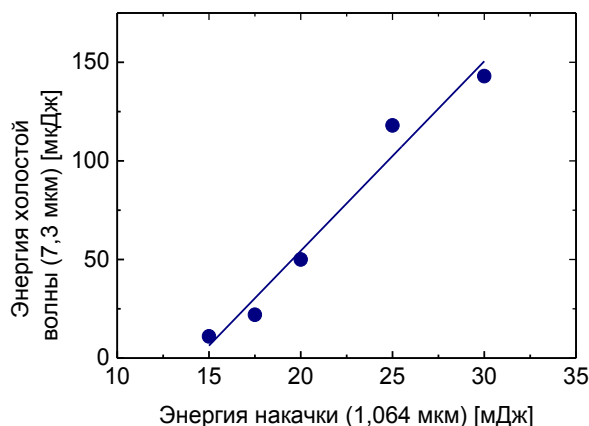


Рисунок 3 — Зависимость энергии холостой волны I_2 на длине волны 7,3 мкм от энергии внешней накачки P_1

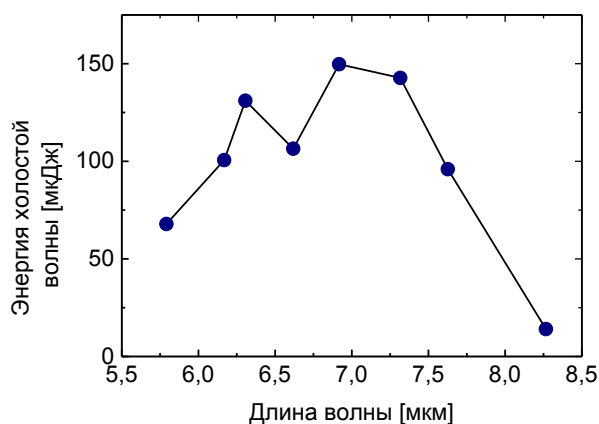


Рисунок 4 — Зависимость энергии холостой волны I_2 от длины волны при энергии внешней накачки 30 мДж

Далее приведены основные результаты исследования двухкаскадного ПГС при использовании НК AGSE для второго типа взаимодействия, перестройка вторичной холостой волны лежит в диапазоне от 8 до 18 мкм. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 5. Для достижения искомого диапазона перестройки длин волн необходимо изменить не только тип взаимодействия кристалла, но и соответствующую оптику для обеспечения условий резонансов в указанном диапазоне.

Первый каскад ПГС реализуется аналогично предыдущему разделу. В первом каскаде ПГС на основе кристалла Rb:PPKTP был реализован резонанс для сигнальной и холостой волн в плечах с длинами: 101 мм для плеча, содержащего кристалл AGSE, и

88 мм для первичной холостой волны I_1 . В ПГС второго каскада на основе кристалла AGSE был обеспечен резонанс только для вторичной сигнальной волны, длина резонатора составляла 60 мм. Выходное зеркало второго каскада ПГС было изготовлено на подложке из селенида цинка (ZnSe) и имело высокий коэффициент отражения для вторичной сигнальной волны S_2 (выше 2,3 мкм), коэффициент пропускания в диапазоне перестройки вторичной холостой волны I_2 от 8 до 15 мкм составлял $(76 \pm 5) \%$. Коэффициентом пропускания зеркала DM4 составил $(60 \pm 10) \%$ для вторичной холостой волны I_2 в диапазоне перестройки от 8 до 15 мкм.

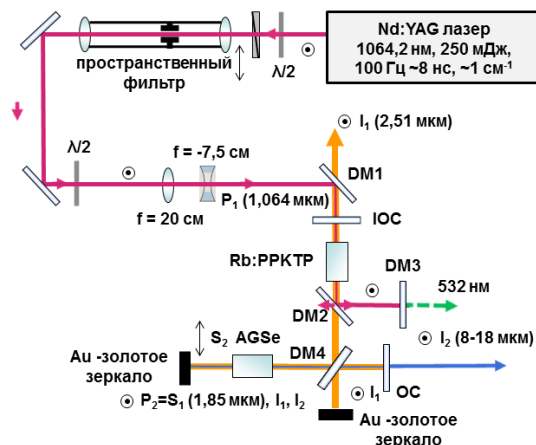


Рисунок 5 — Оптическая схема двухкаскадного ПГС на основе кристаллов Rb:PPKTP и AGSE для второго типа взаимодействия с внутррезонаторной накачкой

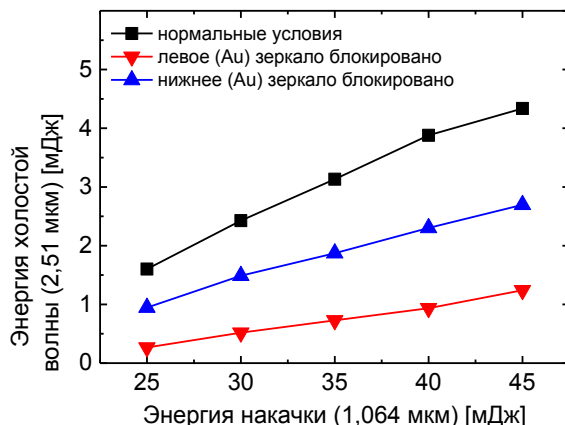


Рисунок 6 — Зависимость энергии первичной холостой волны I_1 первого каскада без кристалла AGSE от энергии внешней накачки

Зависимость энергии вторичной холостой волны I_2 от энергии внешней накачки показана на рисунке 6. Измеренное значение энергии первичной холостой волны I_1 достигало 4,34 мДж, данное значение позволяет оценить значение внутррезонаторной энергии первичной сигнальной волны, которое составило 10,7 мДж. Преобразование энергии первичной накачки достигало значения 41 %. Полученное экстраполированное значение порога генерации порядка ~ 17 мДж рисунок 6. Значение дифференциальной эффективности для S_1 и I_1 , достигало $\sim 66 \%$. Для преобразования энергии волны накачки в энергию волн в среднем ИК диапазоне был использован образец кристалла AGSE для второго типа взаимодействия со следующими параметрами: углы ориентирования $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 51,3^\circ$, длина кристалла составляла 15 мм, входная апертура 5×6 мм. На рабочие торцы кристалла было нанесено просветляющее покрытие для

длины волны накачки равной 1,85 мкм, коэффициент пропускания достигал $\sim 94\%$, для длины волны 2,5 мкм (I_1) коэффициент пропускания составлял $\geq 87\%$.

Измерение параметров вторичной холостой волны I_2 осуществлялось на выходе из резонатора после двойного прохода через кристалл AGSE. На рисунке 7 показана зависимость выходной энергии вторичной холостой волны I_2 при длине волны 11,46 мкм от энергии внешней накачки P_1 . Максимально полученная энергия для I_2 равна 171 мкДж, что примерно в 15 раз выше, чем энергия, полученная в работе [2] с максимальной длиной волны перестройки 8 мкм для кристалла ZnGeP₂. При частоте следования импульсов 100 Гц было получено 17,1 мВт средней мощности излучения, что выше показанного уровня из работы [2] в ~ 300 раз. Зависимость энергии вторичной холостой волны ПГС от длины волны приведена на рисунке 8.

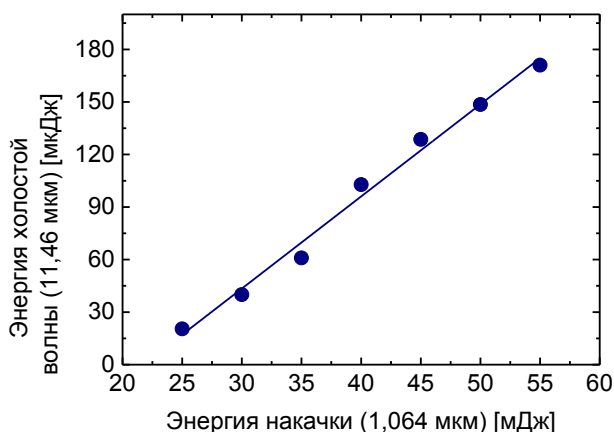


Рисунок 7 — Зависимость энергии вторичной холостой волны I_2 второго каскада ПГС при длине волны 11,46 мкм в зависимости от энергии внешней накачки

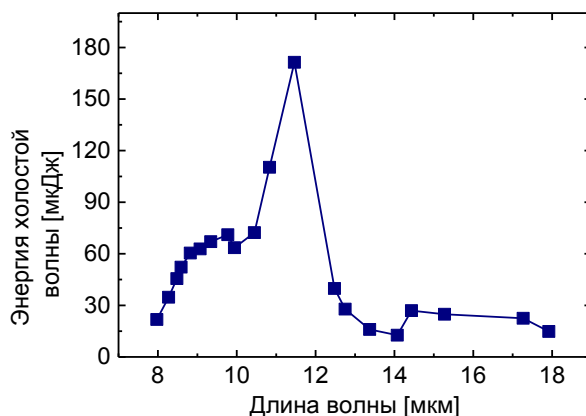


Рисунок 8 — Зависимость энергии вторичной холостой волны от длины волны при энергии внешней накачки 55 мДж

Для реализации перестройки вплоть до 18 мкм использовалось дихроичное зеркало DM4 изготовленное на подложке из ZnSe, установленное под углом 45°. Коэффициент пропускания вблизи 2,5 мкм для первичной холостой волны I_1 при s-поляризации составляет $\sim 50\%$, а для диапазона перестройки вторичной сигнальной волны S_2 коэффициент пропускания равен $(75 \pm 5)\%$ при p-поляризации.

В заключении второго раздела были исследованы свойства и характеристики двухкаскадного ПГС с внутррезонаторной накачкой на основе кристалла AGSE в наносекундном режиме. Получили непрерывную перестройку вторичной холостой волны в диапазоне от 8 до 18 мкм, при частоте следования импульсов 100 Гц с

максимальной энергией 171 мкДж на длине волны 11,46 мкм.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ представлены результаты генерации разностной частоты (ГРЧ) в среднем ИК диапазоне путём смешивания сигнальной и холостой волн ПГС первого каскада в нелинейном кристалле AGSe второго каскада, что представляет собой универсальный подход. В зависимости от типа взаимодействия в двух нелинейных кристаллах, путем подбора соответствующей поляризации, совмещённый резонатор двухкаскадного ПГС с внутррезонаторной накачкой, может быть преобразован в генератор разностной частоты среднего ИК диапазона, в котором попеременно два нелинейных кристалла расположены в двухрезонансной системе.

Схема, показанная на рисунке 9 аналогична той, которая использовалась в предыдущем разделе. Для того, чтобы свести к минимуму потери первичных сигнальной и холостой волн, был модифицирован резонатор. Установлены два золотых зеркала (Au1 и Au2), тогда как волна первичной накачки отражается от двух дихроичных зеркал DM1 и DM2, выполненных на подложке из кварца. Эти зеркала обладают высоким коэффициентом пропускания для первичной сигнальной волны (S, T = 95 %) и для первичной холостой волны (I, T = 91 %). Коэффициент отражения для длины волны накачки P (1,064 мкм) и её второй гармоники SH (532 нм) T=99,9 %. Зеркало DM3 установлено на расстоянии 70 мм от Au1, коэффициентом отражения для длины волны накачки P (1,064 мкм) R=95 %, но пропускает вторую гармонику (532 нм).

Таким образом, волна накачки проходит дважды через кристалл Rb:PPKTP, в то время как паразитарная вторая гармоника не достигает кристалла AGSe. Дихроичное зеркало DM4, выполнено из селенида цинка (ZnSe) и обладает высоким коэффициентом отражения для первичной сигнальной и холостой волны под углом 45°. Толщина подложки зеркала составляла 6 мм и просветляющее покрытие (AR) на задней стороне для спектрального диапазона генерации разностной частоты (T = 97 % для длины волны ~ 7 мкм).

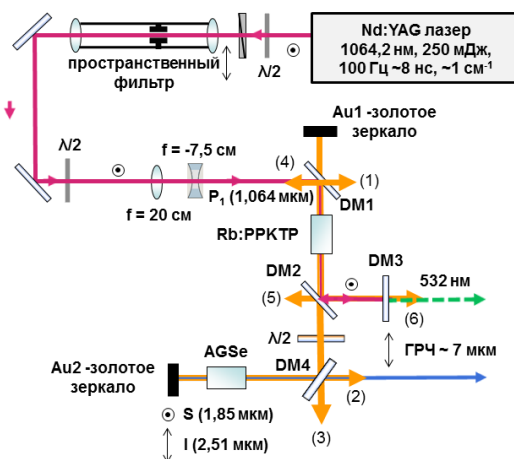


Рисунок 9 — Схема двухкаскадного ПГС с внутррезонаторной накачкой на основе кристалла Rb:PPKTP с ГРЧ во втором каскаде

Дихроичная полуволновая пластинка, выполненная из MgF₂ и установленная между зеркалами DM2 и DM4, имела просветляющее покрытие для первичных сигнальной и холостой волн (S и I). Данная пластинка была установлена для поворота поляризации первичной холостой волны, поскольку целью является смешение сигнальной и холостой волн в ГРЧ на основе НК AGSe с первым типом взаимодействия

(o,eo). Длина кристалла AGSE составляет 14 мм, входная апертура $4,5 \times 4,5 \text{ мм}^2$, с напылённым просветляющим покрытием для первичной сигнальной волны (S, $T = 94 \%$), и также с высоким коэффициентом пропускания пропусканием для первичной холостой волны (I, $T = 87 \%$).

В диапазоне генерации разностной частоты измеренный коэффициент пропускания составлял 70 %. Генерируемое излучение регистрировалось на выходе из резонатора после двух проходов через кристалл AGSE. Физическая длина резонатора ПГС (между Au1 и Au2) составляет 134 мм. Была измерена зависимость энергии первого каскада ПГС от энергии внешней накачки рисунок 10, при этом кристалл AGSE был удален из резонатора ПГС, а полуволновая пластинка установлена в резонаторе для вращения плоскости поляризации холостой волны. Подобный подход позволил сравнить выходные параметры первого каскада ПГС. При комнатной температуре длина сигнальной волны S была 1,85 мкм, и длина холостой волны I была ~2,51 мкм. Паразитные выходы состоят из шести лучей, показанных на рисунке 9 жёлтыми стрелками. Распределение между сигнальной и холостой волнами зависит от характеристик зеркал DM1, DM2 и DM4.

Максимальная расчётная суммарная энергия для S и I составляет 11,9 мДж, что даёт дифференциальную эффективность 39 % и эффективность преобразования ~ 24 % для данной конфигурации оптической системы. Максимальные уровни энергий внутри резонатора составили 31 мДж для сигнальной волны S и 15 мДж для холостой волны I, данные получены с точностью $\pm 20 \%$ в связи с малым коэффициентом пропускания зеркала DM4, который использовался при расчёте (0,55 % для сигнальной волны и 3,1 % для холостой волны). На рисунке 11 показана зависимость выходной энергии ПГС с установленным кристаллом AGSE для реализации ГРЧ с длиной волны порядка 7 мкм. Максимальная энергия разностной частоты достигала 670 мкДж, что в ~ 4,5 раза выше, чем лучший результат, полученный с внутрирезонаторной накачкой для ПГС на основе AGSE на этой длине волны [2].

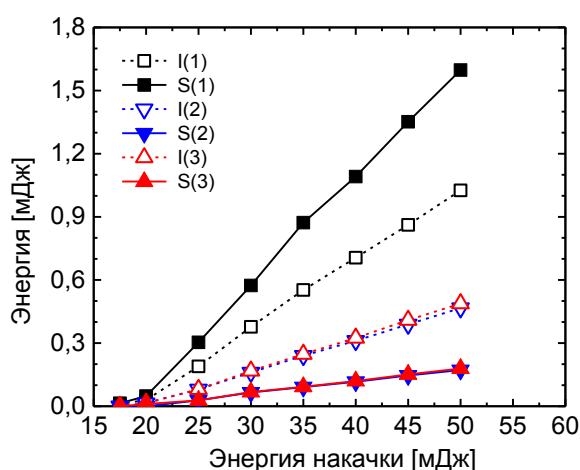


Рисунок 10 — Производительность ПГС первого каскада на основе кристалла Rb:PPKTP без кристалла AGSE. Обозначения (1), (2) и (3) рисунка 10 относятся к энергии сигнальной (S) и холостой (I) волн от трёх из шести паразитных выходов, показанных на рисунке 9 жёлтыми стрелками

Общая квантовая эффективность преобразования из энергии внешней накачки в энергию на длине волны ~7 мкм составила ~ 8 %. Улучшение связано в первую очередь

с оптимизацией выхода для длины волны ГРЧ, что приводит к увеличению общей дифференциальной эффективности рисунок 11, а более высокий порог разрушения для свободной генерации разностной частоты в кристалле AGSE позволяет работать на больших уровнях энергии накачки. Как можно заметить по измерениям энергии сигнальной волны с выхода (1) на рисунке 10, что в присутствии генерации разностной частоты, внутрирезонаторная энергия сигнальной волны уменьшилась в два раза. Это произошло из-за потерь двухпроходной схемы, а так же из-за преобразования энергии сигнальной волны при генерации разностной частоты в кристалле AGSE.

Эффективность этого процесса оценивалась двумя способами, исходя из измеренной энергии сигнальной волны выхода (2) и измеренной энергией генерируемой разностной частоты с выхода (2), предполагается равное количество холостых фотонов, генерируемых в кристалле AGSE, и путем мониторинга увеличения выходной энергии сигнальной волны с выхода (2), когда кристалл AGSE вращается, чтобы избежать фазового согласования, но всё ещё сохраняя вносимые потери практически без изменений.

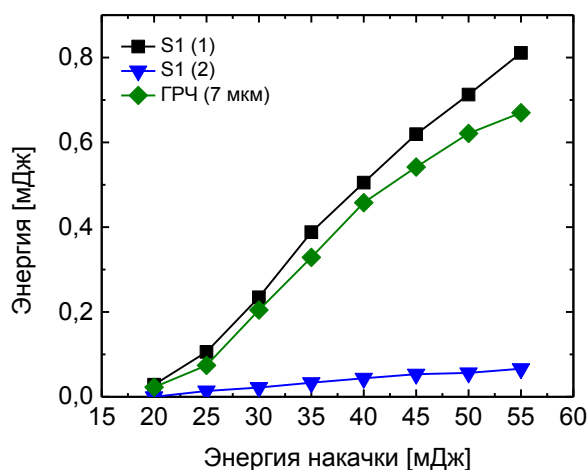


Рисунок 11 — Зависимость энергии ГРЧ на длине волны 7 мкм от энергии внешней накачки. Фазовый синхронизм настраивался для максимального преобразования при комнатной температуре и одновременного измерения энергии сигнальной волны на выходах (1) и (2)

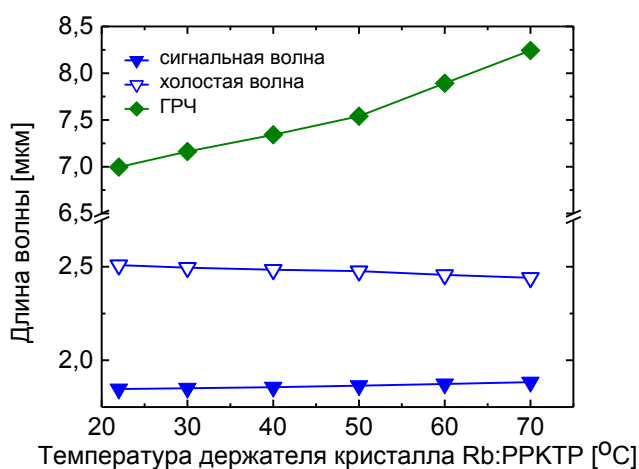


Рисунок 12 — Температурная перестройка длин волн ПГС первого каскада и связанное с этим изменение энергии и длины волны разностной частоты

В результате величина эффективности достигала от 14 % до 16 %. От максимальной энергии внутрирезонаторной сигнальной волны при 55 мДж энергии накачки, около 2,6 мДж внутрирезонаторно преобразованы в энергию вторичной холостой волны, в то время как остальные ~ 16 мДж были оценены измерениями через коэффициент пропускания 0,55 % зеркала DM4. Некоторое насыщение величины эффективности можно увидеть на рисунке 11, однако, нет никакого видимого эффекта на кривой энергии сигнальной волны с выхода (1), которая только подтверждает, что общие потери пассивного резонатора превышают потери полезного преобразования разностной частоты.

Изменение длины волны ГРЧ, может быть достигнуто путём температурной перестройки длины волны ПГС первого каскада (рисунок 12) и при повороте кристалла AGSE. Перестройка длины волны выходного излучения составила от 7 до 8,2 мкм с минимальными изменениями выходной энергии рисунок 13.

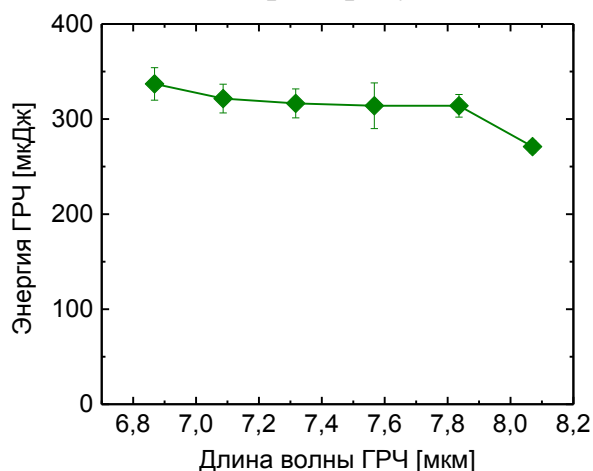


Рисунок 13 — Зависимость выходной энергии ГРЧ от длины волны, при энергии внешней накачки 35 мДж

В ЧЕТВЁРТОЙ ГЛАВЕ представлены результаты применения нового моноклинного НК BGSE для генерации разностной частоты в двухкаскадной схеме с внутрирезонаторной накачкой. В данном разделе описана возможность расширения применения двухкаскадной схемы для получения генерации разностной частоты, путём использования НК BGSE. Кристалл BGSE имеет несколько преимуществ по сравнению с кристаллом AGSE, наиболее заметным из которых является большее значение порога разрушения.

Внутрирезонаторная генерация разностной частоты осуществлялась путём смешивания сигнальной и холостой волн параметрического генератора света в кристалле BGSE. Общая квантовая эффективность преобразования составила 7,8 %. Энергия генерируемого импульса при длине волны ~ 7 мкм и частоте следования импульсов 100 Гц составила ~ 0,71 мДж. Перестройка в среднем ИК диапазоне достигалась путём изменения температуры кристалла Rb:PPKTP, что приводило к изменению параметров периодической структуры и генерации соответствующих пар сигнальной и холостой волн. Использование энергии холостой длины волны для ГРЧ повышает эффективность преобразования энергии накачки в энергию излучения в среднем ИК диапазоне в 4-5 раз по сравнению с однорезонансным ПГС, основанном на том же кристалле AGSE.

Кристалл BGSE принадлежит к группе симметрии m и имеет аналогичную

длинноволновую границу поглощения, как и кристалл AGSE (предел пропускания при уровне поглощения $0 \sim 18$ мкм), но кристалл BGSE имеет большее значение ширины запрещенной зоны, что соответствует $0,47$ мкм ($0,68$ мкм в AGSE). Поскольку диапазон прозрачности в среднем ИК диапазоне определяет аналогичные применения кристаллов AGSE и BGSE, то у второго кристалла есть существенные преимущества при преобразовании линий генерации существующих лазерных источников. Порог повреждения поверхности для кристалла BGSE составляет порядка $3,3$ Дж/см² на длине волны $2,09$ мкм. При аналогичных параметрах излучения, таких как длительностей импульса и частота повторения, порог разрушения для кристалла AGSE меньше на порядок.

Указанные преимущества кристалла BGSE по сравнению с AGSE частично компенсируются более низким нелинейным коэффициентом, в случае кристалла BGSE его величина на текущий момент не определена окончательно, так как значение не всех компонент измерено, но оценочно [3] его значение меньше в два раза, чем у кристалла AGSE. Однако при внутрирезонаторном преобразовании энергии накачки высокий уровень задающего излучения холостой волны увеличивает эффективность процесса преобразования сигнальной и холостой волн первого каскада. Это приводит к тому, что эффективная нелинейность становится менее важным параметром, чем величина порога разрушения, особенно в системах, предназначенных для генерации высоких выходных мощностей в среднем ИК диапазоне. Кроме того, кристалл BGSE демонстрирует важное практическое преимущество перед AGSE: он химически стабилен в воздухе и не наблюдается старения качества поверхности. Это не только позволяет использовать элементы без покрытия, но, как ожидается, повлияет на качество и лучевую стойкость напыляемых антиотражающих покрытий.

Рисунок 14 иллюстрирует зависимость выходной энергии первого каскада ПГС на основе НК Rb:PPKTP без кристалла BGSE в резонаторе. Тем не менее, для корректного сравнения, полуволновая пластинка после зеркала DM2 на рисунке 9 установлена в схеме под соответствующим углом для вращения поляризации холостой волны. При комнатной температуре длины волн составляют $1,85$ мкм (S) и $\sim 2,51$ мкм (I).

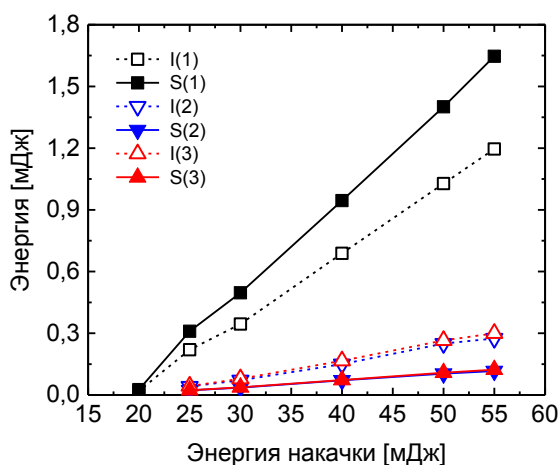


Рисунок 14 — Производительность ПГС первого каскада на основе кристалла Rb:PPKTP без кристалла BGSE. Обозначения (1), (2) и (3) рисунка 14 относятся к энергии сигнальной (S) и холостой (I) волн от трёх из шести паразитных выходов, показанных на рисунке 9 жёлтыми стрелками

Также в схеме присутствует шесть паразитных выходов, которые снижают вероятность оптических повреждений в отсутствие кристалла BGSE. Вклады S и I волн в эти выходы зависят от характеристик дихроичных зеркал DM1, DM2 и DM4 указанных на рисунке 9. Значение суммарной энергии (S и I) этих шести выходов оценивается в 12,2 мДж, что соответствует дифференциальной эффективности $\sim 35\%$ и общей эффективности преобразования $\sim 22\%$.

Оценочное значение энергии внутри резонатора составляет 32 мДж для сигнальной волны и ~ 17 мДж для холостой волны. Входные и выходные характеристики системы с кристаллом BGSE (рис. 14), измерены при длине волны ГРЧ равной 7 мкм. Энергия излучения ГРЧ на длине волны 7 мкм составила 711 мкДж при этом квантовая эффективность преобразования составила 7,8% от энергии первичной накачки в энергию излучения на длине волны 7 мкм. Данное значение эффективности практически совпадает со случаем использования кристалла AGSE. Для аналогичной схемы на основе кристалла AGSE при той же длине волны энергия излучения составила 670 мкДж.

Снижение энергии сигнальной волны внутри резонатора при наличии кристалла BGSE соответствует величине преобразования. Рассчитанное таким образом уменьшение внутрирезонаторного уровня энергии сигнальной волны увеличивается с уровнем накачки и достигает $\sim 18\%$ при энергии внешней накачки 60 мДж. Из максимальной энергии внутрирезонаторной сигнальной волны, при этом уровне накачки, около 2,7 мДж внутрирезонаторно преобразуется в излучение холостой и разностной волн, а остальные ~ 13 мДж регистрируются посредством коэффициента пропускания 0,55% для зеркала DM4.

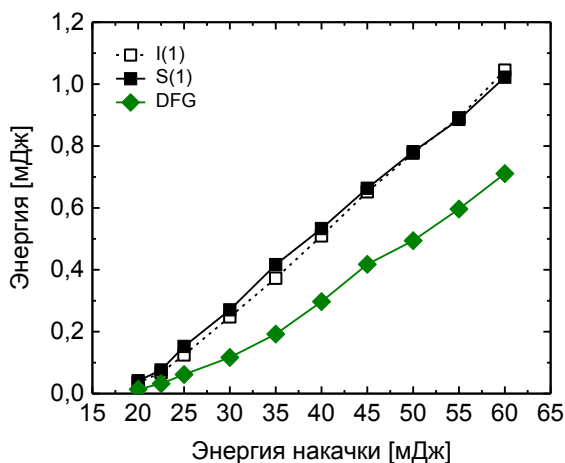


Рисунок 15 — Зависимость энергии ГРЧ 7 мкм для кристалла BGSE, фазовый синхронизм которого настраивался для максимального преобразования при комнатной температуре и одновременного измерения энергии сигнальной и холостой волн на выходе (1)

Как видно из рисунка 15, насыщения энергии разностной волны не происходит даже при максимальном уровне накачки. Также не наблюдается насыщения для сигнальной и холостой волн. Сравнивая показания рисунка 14 с рисунком 15, можно отметить, что уровень энергии для сигнальной волны стал равен уровню энергии для холостой волны на выходе (1), что является показателем эффективности внутрирезонаторного преобразования в кристалле BGSE. Достигнутая перестройка

разностной длины волны лежала в диапазоне от 7 до 8,2 мкм рисунок 16 (а). На рисунке 16 (б) показано изменение выходной энергии разностной волны в зависимости от длины волны. Перестройка длины разностной волны может быть достигнута путём изменения температуры кристалла Rb:PPKTP и соответствующим поворотом кристалла BGSE в критической плоскости.

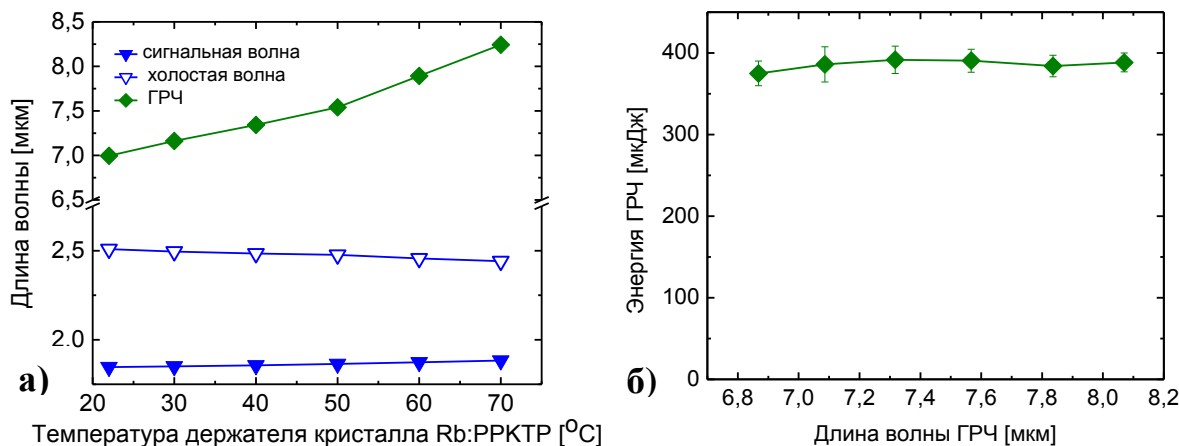


Рисунок 16 — а) Температурная перестройка длин волн первого каскада ПГС на основе кристалла РРКТР и связанная с ней перестройка разностной волны и б) Зависимость изменения энергии ГРЧ от длины волны при уровне энергии накачки 45 мДж.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- Разработан и исследован двухкаскадный ППЧ на основе тандема кристаллов Rb:PPKTP с РДС и объёмных кристаллов AGSE и BGSE с внутриврезонаторной накачкой. Преимуществом данного подхода является возможность преобразования частоты излучения накачки с длиной волны порядка одного микрометра.
- Исследована схема с внутриврезонаторной накачкой, второй каскад которой реализован на кристалле AGSE для первого типа взаимодействия, получена генерация вторичной холостой волны в диапазоне от 5,8 до 8,3 мкм. Максимальная выходная энергия вторичной холостой волны составила 150 мкДж при длине волны 7,3 мкм с частотой следования импульсов 100 Гц. За счёт оптимизации параметров зеркала DM4 и ОС достигнуто увеличение выходной энергии вторичной холостой волны I_2 порядка 250 мкДж.
- Получена непрерывная перестройка вторичной холостой волны в диапазоне от 8 до 18 мкм в двухкаскадном ПГС с внутриврезонаторной накачкой на основе кристалла AGSE для второго типа взаимодействия. Максимальное значение энергии было получено на длине волны 11,46 мкм при частоте следования импульсов внешней накачки 100 Гц и составило 171 мкДж.
- Создана схема ГРЧ на основе НК AGSE с внутриврезонаторной накачкой от двухрезонаторного ПГС, и получена средняя мощность 67 мВт на длине волны 7 мкм при частоте следования импульсов 100 Гц. Что эквивалентно общей эффективности 1,2 % преобразования энергии излучения первичной накачки в энергию на длине волны 7 мкм. Выходная энергия в среднем ИК диапазоне сравнима с лучшими результатами, достигнутыми для внерезонаторной схемы ГРЧ. Энергия импульса порядка ~ 1 мДж была получена при длине волны 8,2 мкм, но уровень общей эффективности ниже примерно в два раза (~ 0,6 %), а также частота следования импульсов 5 Гц [20]

- В данной работе эффективность преобразования излучения схемы ГРЧ на длине волны равной 1,064 мкм в излучение среднего ИК диапазона от 7 до 8,2 мкм составила 1,2 %.
- Исследована схема ГРЧ на основе НК BGSE с внутриврезонаторной накачкой от двухрезонаторного ПГС. Средняя мощность при частоте следования импульсов 100 Гц составила 71 мВт, при этом общая эффективность преобразования энергии первичной накачки в энергию на длине волны 7 мкм составила 1,2 %. Необходимо отметить, что выходная энергия ГРЧ на основе НК BGSE сопоставима с результатами для схемы ГРЧ на основе кристалла AGSE, несмотря на меньшее значение коэффициента эффективной нелинейности у кристалла BGSE.
- Подобный результат можно интерпретировать меньшим влиянием коэффициента нелинейности НК в схемах ГРЧ по сравнению со схемами ПГС. Поскольку процесс ГРЧ является беспороговым, то для создания компактных систем возможно применение лазеров первичной накачки меньшей мощности без потери общей эффективности преобразования.
- Увеличение эффективности преобразования энергии первичной накачки может быть обеспечено за счёт дополнительной оптимизации фокусировки излучения накачки. Дополнительный вклад в значение общей эффективности преобразования излучения первичной накачки в схемах ПГС и ГРЧ может быть получен за счёт увеличения коэффициента пропускания для первичных сигнальной и холостой волн, который обеспечивается оптическими покрытиями зеркал, формирующими резонатор первого каскада.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Boyko A.A.**, Marchev G.M., Petrov V., Pasiskevicius V., Kolker D.B., Zukauskas A., Kostyukova N.Y. Intracavity-pumped, cascaded AgGaSe₂ optical parametric oscillator tunable from 5.8 to 18 μm // Opt. Express – 2015. – 23. – P. 33460.
2. **Boyko A.A.**, Kostyukova N.Y., Marchev G.M., Pasiskevicius V., Kolker D. B., Zukauskas A., Petrov V. Rb:PPKTP optical parametric oscillator with intracavity difference-frequency generation in AgGaSe₂ // Opt. Lett. – 2016. – 41. – P. 2791-2794.
3. **Boyko A.A.**, Kostyukova N.Y., Badikov V., Badikov D., Panyutin V., Shevyrdyaeva G., Pasiskevicius V., Zukauskas A., Marchev G.M., Kolker D.B., Petrov V. Intracavity difference-frequency mixing of optical parametric oscillator signal and idler pulses in BaGa₄Se₇ // Appl. Opt. – 2017. – Vol. 56. – P. 2783-2786.
4. **Boyko A.A.**, Marchev G.M., Petrov V., Pasiskevicius V., Kolker D.B., Zukauskas A., Kostyukova N.Y. Intracavity-pumped, cascaded mid-IR optical parametric oscillator based on AgGaSe₂ // Advanced Solid State Lasers, 4-9 Oct. 2015, Berlin (Germany), paper ATh2A.19.
5. Kostyukova N., **Boyko A.**, Marchev G., Kolker D., Zukauskas A., Pasiskevicius V., Petrov V. Rb:PPKTP Optical Parametric Oscillator with Intracavity Difference-Frequency Generation in AgGaSe₂ // In Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (2016) (Optical Society of America, 2016), paper STh1P.5.
6. **Boyko A.**, Marchev G., Petrov V., Pasiskevicius V., Kolker D., Zukauskas A., Kostyukova N. Intracavity-Pumped, Cascaded AgGaSe₂ Optical Parametric Oscillator Tunable up to 18 μm // In High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions, OSA technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper MS4C.4.
7. **Boyko A.A.**, Kostyukova N.Y., Badikov V., Badikov D., Panyutin V., Shevyrdyaeva G.,

Pasiskevicius V., Zukauskas A., Marchev G.M., Kolker D., Petrov V. Intracavity Difference-Frequency Mixing of OPO Signal and Idler Pulses in BaGa₄Se₇ // In Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2017), paper SM3M.7.

8. Petrov V., **Boyko A.A.**, Kostyukova N.Y., Marchev G.M., Pasiskevicius V., Kolker D.B., Badikov V., Badikov D., Shevyrdyaeva G., Zukauskas A., Panyutin V. Frequency down-conversion of 1 μm laser radiation to the mid-IR using non-oxide nonlinear crystals in a cascaded intracavity configuration // In Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XVI (Proc. of SPIE Vol. 10088) (Invited paper).

9. Petrov V., Kostyukova N.Y., **Boyko A.A.**, Marchev G.M., Pasiskevicius V., Zukauskas A., Kolker D.B. Cascaded intracavity frequency down-conversion of 1 μm laser radiation to the mid-IR // In The 24th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'16, (At Galway, Ireland).

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Petrov V. Frequency down-conversion of solid-state laser sources to the mid-infrared spectral range using non-oxide nonlinear crystals // Prog. Quantum Electron. Elsevier –2015. – Vol. 42. –P. 1–106.

2. Petrov V. Progress in 1-μm pumped mid-IR optical parametric oscillators based on non-oxide nonlinear crystals // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. –2015. –Vol. 21.

3. Mirov S. et al. Progress in Cr²⁺ and Fe²⁺ doped mid-IR laser materials // Laser Photonics Rev. –2010. –Vol. 4, № 1. –P. 21–41.

4. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: A complete survey // XIII USA — s.l.: Science + Business Media Inc. –2005. –427 p.

5. Mirov S.B. et al. Progress in Mid-IR Lasers Based on Cr and Fe-Doped II-VI Chalcogenides // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. –2015. –Vol. 21, № 1.

6. Jackson A.G., Ohmer M.C., LeClair S.R. Relationship of the second order nonlinear optical coefficient to energy gap in inorganic non-centrosymmetric crystals // Infrared Phys. Techn. –1997. –Vol. 38, № 4. –P. 233–244.

7. Tyazhev A. et al. Mid-IR optical parametric oscillator based on LiGaS₂ // CLEO/Europe EQEC2011 Conf. Dig. OSA Tech. Dig. 2011.

8. Tyazhev A. et al. High-power, 100-Hz HgGa₂S₄ OPO pumped at 1064 nm // JM4K.3 CLEO2013 Tech. Dig. 2013.

9. Badikov V. V et al. Quaternary BaGa₂GeS₆ and BaGa₂GeSe₆// Nonlinear Crystals for the Mid-IR Spectral Range. –2016. –Vol. 2016, № 9. –P. 40–42.

10. Petrov V. et al. Noncritical singly resonant optical parametric oscillator operation near 6.2 μm based on a CdSiP₂ crystal pumped at 1064 nm // Opt. Lett. –2009. Vol. 34, № 16. –P. 2399.

11. Schunemann P.G. et al. CdSiP₂ and OPGaAs: New Nonlinear Crystals for the Mid-Infrared // OSA. –2011. –P. 1–4.

12. Schunemann P.G. et al. Advances in nonlinear optical crystals for mid-infrared coherent sources // J. Opt. Soc. Am. B. –2016. –Vol. 33, № 11. –P. D36.

13. Kieleck C. et al. High-efficiency 20–50 kHz mid-infrared orientation-patterned GaAs optical parametric oscillator pumped by a 2 μm holmium laser // Opt. Lett. –2009. –Vol. 34, № 3. –P. 262.

14. Skauli T. et al. Measurement of the nonlinear coefficient of orientation-patterned GaAs

and demonstration of highly efficient second-harmonic generation // *Opt. Lett.* –2002. –Vol. 27, № 8. –P. 628.

15. Kostyukova N.Y. et al. Twin HgGa₂S₄ optical parametric oscillator at 4.3-10.78 μm for biomedical applications // *Prog. Biomed. Opt. Imaging - Proc. SPIE.Saratov Fall Meet. 2014 Opt. Technol. Biophys. Med. XVI; Laser Phys. Photonics XVI; Comput. Biophys.* –2014. –Vol. 9448. –P. 944806.

16. Badikov V. et al. Phase-Matching Properties of BaGa₄S₇ and BaGa₄Se₇: Wide-Bandgap Nonlinear Crystals for the Mid-Infrared // *Phys. Status Solidi RRL.* –2011. –P. 31–33.

17. Tyazhev A. et al. Mid-infrared optical parametric oscillation in the wide- bandgap BaGa₄S₇ nonlinear crystal. –2012. –Vol. 12.–P. 7–8.

18. Zakel A. et al. High-power, rapidly-tunable dual-band CdSe optical parametric oscillator // *Conf. Lasers Electro-Optics. 2005*, paper CThY5.

19. Yuan J.-H. et al. High power, tunable mid-infrared BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped by a 2.1 μm Ho:YAG laser // *Opt. Express.* –2016. –Vol. 24, № 6. –P. 6083–6087.

20. Kostyukova N.Y. et al. Widely tunable in the mid-IR BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped at 1064 nm // *Opt. Lett.* –2016. –Vol. 41, № 15. –P. 12–15.

21. Boursier E. et al. Angle noncritical phase-matched second-harmonic generation in the monoclinic crystal BaGa₄Se₇ // *Opt. Express.* –2015. –Vol. 40, № 20. –P. 4591–4594.

22. Yao J. et al. BaGa₄Se₇: A new congruent-melting IR nonlinear optical material // *Inorg. Chem.* –2010. –Vol. 49, № 20. –P. 9212–9216.

23. В. В. Бадиков, Н. В. Кузьмин, В. Б. Лаптев, А. Л. Малиновский, К. В. Митин, Г. С. Назаров, Е. А. Рябов, А. М. Серёгин Н.И.Щ. Исследование оптических и теплофизических свойств нелинейных кристаллов тиогаллата ртути // *Квантовая электроника.* –2004. – Т. 34, № 5. –С. 451–456.

24. Petrov V. et al. Optical damage studies of mercury thiogallate nonlinear crystals for use in 1- μm pumped optical parametric oscillators // *Opt. Eng.* –2013. –Vol. 52, № 11. –P. 117102.

25. Phua P.B. et al. Coupled tandem optical parametric oscillator (OPO): an OPO within an OPO // *Opt. Lett.* –1998. –Vol. 23. –P. 1262–1264.

26. Phua P.B. et al. High-average-power mid-infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator with a wavelength-dependent polarization rotator. // *Opt. Lett.* –2006. –Vol. 31, № 4. –P. 489–491.

27. Boyko A.A. et al. Intracavity-pumped, cascaded Mid-IR optical parametric oscillator based on AgGaSe₂ // *Advanced Solid State Lasers, ASSL, 2015.*

28. Boyko A.A. et al. Rb : PPKTP Optical Parametric Oscillator with Intracavity Difference-Frequency Generation in AgGaSe₂ // *Opt. Lett.* –2016. –Vol. 41, № 12. –P. 2791–2794.

29. Boyko A. et al. Intracavity-Pumped, Cascaded AgGaSe₂ Optical Parametric Oscillator Tunable up to 18 μm // *Mid-Infrared Coherent Sources, 2016.* –P. MS4C.4.