

Яковин Михаил Дмитриевич

**Суперлюминесцентная параметрическая генерация света в кристалле
PPLN с накачкой от Nd:YAG лазера с СЗАОМ.**

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения
Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
Донин Валерий Ильич

кандидат физико-математических наук

Сорокин Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты:

Юдин Николай Александрович

профессор, доктор технических наук, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский Томский государственный
университет», старший научный сотрудник.

Колкер Дмитрий Борисович

доктор физико-математических наук, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Новосибирский
национальный исследовательский
государственный университет», руководитель
лаборатории квантовых оптических технологий.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт сильноточной
электроники Сибирского отделения Российской
академии наук.

Защита состоится «___» _____ 2019 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090,
Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.

Ильичев Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Интерес к накачке оптических параметрических генераторов света (ПГС) пикосекундными импульсами возник в связи с задачами исследования динамики молекулярных процессов, с развитием методов спектроскопии нестационарных процессов [1], поляризационной сверхбыстрой спектроскопии фотоиндуцированного поглощения [2] и спектроскопии многофотонного поглощения.

Ввиду необходимости плавной перестройки в широком диапазоне, распространение получили однорезонаторные ПГС с синхронной накачкой [3-5] из-за простоты их реализации и отсутствия кластерного эффекта в сравнении с двухрезонаторными ПГС [6]. С начала 1990х годов в качестве источников накачки в ПГС начинают широко использоваться твердотельные лазеры с накачкой от лазерных диодов [7]. Однорезонаторные ПГС с синхронной накачкой от диодно-накачиваемых твердотельных лазеров обладают более высокой стабильностью генерационных характеристик, надежностью и компактностью.

С развитием методов электростатической периодической переполюсовки вектора поляризации в ферроэлектриках [8, 9] стало возможным производство материалов с периодической поляризованной структурой (регулярной доменной структурой) [10], таких как PPLN. Благодаря этому стало возможным создавать эффективные параметрические генераторы света с принципиально новым методом трех волнового взаимодействия – квазифазовым синхронизмом [11]. Такое взаимодействие имеет ряд преимуществ, а именно – отсутствие угла сноса между взаимодействующими волнами и более высокий коэффициент нелинейности. В нем можно пренебречь таким понятием, как угловая ширина синхронизма, так как взаимодействия по поляризации имеют вид e_{ijk} и d_{ijk} .

В настоящее время пикосекундные и фемтосекундные ПГС на основе

кристаллов с периодической доменной структурой ввиду их простоты реализации, долговременной стабильности, компактности, большого срока службы и устойчивости к грубым внешним воздействиям находят широкое применение в прецизионном приборостроении, гражданской и военной промышленности, медицине и экологии. Также они являются актуальными в задачах фундаментальных исследований, связанных с созданием компактных источников перестраиваемого излучения в дальнем-ИК и терагерцовом диапазоне при использовании новых материалов, таких как GaAs (OP-GaAs), GaP (OP-GaP), CSP [12].

Одновременно с работами по созданию пикосекундных ПГС с синхронной накачкой выполняются работы по получению параметрической суперлюминесценции (безрезонаторной параметрической генерации). Несмотря на более высокий порог генерации, разработка безрезонаторных ПГС на кристаллах с периодической поляризацией является актуальной задачей. Интерес их применения в инструментарии лазерных спектроскопических методов и лидарных приложений обусловлен в упрощении конструкции, возможностью одновременной генерации в нескольких областях оптического спектра, уменьшению габаритов и увеличению стабильности получающихся приборов [13, 14].

Развитие безрезонаторных ПГС, в последние годы, связано с появлением диодно-накачиваемых твердотельных лазеров с высокими пиковыми мощностями с новым конструкционным исполнением – МОРА системы и микрочип лазеры с продольной накачкой от мощных диодных линеек [15]. При использовании таких лазеров в качестве источников накачки достигнуты общие КПД преобразования на уровне 10-40%.

Увеличение общего КПД преобразования безрезонаторных параметрических генераторов, как и диапазона перестройки, связано, помимо прогресса в полупроводниковых технологиях и появлением новых материалов, с развитием методов получения различных режимов лазерной генерации в диодно-накачиваемых твердотельных и волоконных лазерах, повышающих

эффективность и стабильность их генерационных характеристик наряду с компактностью и устойчивостью к внешним воздействиям.

В группе, где работает автор, под руководством В. И. Дони́на разработан новый метод получения синхронизации мод и модуляции добротности на акустооптическом модуляторе (АОМ) бегущей волны в сочетании со сферическим зеркалом в диодно-накачиваемом Nd:YAG лазере (метод СЗАОМ) [16]. Твердотельные лазеры с таким способом синхронизации отличаются высокой кратковременной и долговременной стабильностью генерационных характеристик, без использования дополнительных схем автоподстройки. Другие методы синхронизации мод, использующие АОМ бегущей волны [17-19], отличаются использованием дополнительных оптических элементов для возврата дифрагировавших пучков в резонатор. В методе СЗАОМ для возврата дифрагированного пучка используется сферическое выходное зеркало резонатора лазера, что существенно упрощает оптическую схему и, за счет этого, увеличивает компактность всей лазерной системы.

Генерация перестраиваемого излучения одновременно в различных областях спектра дает новые возможности, например, в ИК спектроскопии, где довольно часто спектры линий различных веществ перекрываются. Наличие излучения с отличной длиной волны повысит точность идентификации различных веществ из-за дополнительных данных в другой области спектра. Многоволновая перестраиваемая генерация придает такому источнику излучения большую универсальность.

Целью настоящей диссертационной работы являлась разработка суперлюминесцентного перестраиваемого в видимой и средней ИК области спектра параметрического генератора света (ПГС) с накачкой от Nd:YAG лазера с методом СЗАОМ, в частности, исследование влияния резонатора на выходные характеристики параметрической генерации.

Основные задачи работы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Получение и исследование характеристик суперлюминесцентной параметрической генерации при накачке от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ.
2. Создание и исследование лабораторного образца однорезонаторного ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ.
3. Экспериментальное сравнение характеристик суперлюминесцентной генерации с генерацией однорезонаторного синхронно-накачиваемого ПГС.

Научная новизна работы:

1. Впервые получена суперлюминесцентная параметрическая генерация с накачкой излучением от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ. Достигнут КПД преобразования по преобразованной мощности $\sim 80\%$. Общая пиковая мощность излучения на сигнальной и холостой длине волны ~ 150 кВт и ~ 50 кВт, соответственно.
2. Впервые обнаружено что однорезонаторный ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ допускает увеличенный диапазон изменения длины резонатора, который в 10-20 раз больше, чем при других источниках синхронной накачки.
3. Установлено происхождение видимых линий в спектре параметрической генерации от кристалла PPLN, проведено измерение спектральной ширины этих линий и их области перестройки.
4. Впервые показано, что при сравнении характеристик излучения в режиме параметрической суперлюминесценции и синхронно-накачиваемом однорезонаторном ПГС от накачки пикосекундными импульсами истощение накачки может достигать $\sim 50\%$, что близко к теоретическому пределу [20].

Практическая значимость работы: Результаты работы могут быть применены в создании эффективных источников параметрического излучения суперлюминесцентного типа на основе лазера накачки с СЗАОМ и нелинейных кристаллов с периодически поляризованными структурами.

Генерируемое излучение содержит набор спектральных компонент (от видимого до среднего ИК), перестройка длин волн которых происходит одновременно. Каждая из спектральных компонент имеет высокую пиковую мощность. Такие источники могут найти применения в спектроскопии быстро протекающих процессов, двухфотонного поглощения, мультифлуоресцентного анализа, биофотоники и дистанционного зондирования атмосферы, медицинских приложениях и др.

Положения, выдвигаемые на защиту

- 1) КПД преобразования излучения накачки в параметрическую суперлюминесцентную генерацию может достигать порядка 80% по поглощенной мощности и ограничен оптическим качеством нелинейного кристалла.
- 2) Максимальное значение истощения накачки в режиме суперлюминесценции и синхронно-накачиваемого однорезонаторного ПГС на кристалле PPLN при накачке Nd:YAG-лазером с СЗАОМ достигает уровня ~50% и слабо зависит от длины нелинейного кристалла в диапазоне от 20 до 50 мм.
- 3) Однорезонаторный ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ допускает увеличенный диапазон изменения длины резонатора, который до 20 раз больше, чем при других источниках синхронной накачки.
- 4) ПГС суперлюминесцентного типа обладает спектральным диапазоном генерации выходного излучения значительно шире, чем однорезонаторный ПГС.

Личный вклад автора. Результаты данной работы получены лично автором под научным руководством д. ф.-м. н. Дониной Валерия Ильича. Автор обеспечивал организацию и проведение всех экспериментов. Анализировал и обрабатывал полученные данные. Занимался подготовкой результатов к докладам и тезисам международных конференций, совместно с соавторами готовил научные публикации в печать.

Апробация работы и публикации. Список публикаций основных результатов диссертационной работы (приведен в конце автореферата) состоит из 7 печатных работ. Из них 4 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ и 3 – в тезисах международных конференций: XXV Международная Конференция “Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте” (Новороссийск, 2017); International Conference on Semiconductors Optoelectronics and Nanostructures (Париж, Франция, 2018); International Conference on Laser, Optics and Photonics (Париж, Франция, 2018).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, трех глав, заключения, списка литературы из 118 наименований и одного приложения. Полный объем работы содержит 105 страниц, в том числе 37 рисунков и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлен обзор литературы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертации, личном вкладе автора, описывается структура и объем работы.

Первая глава состоит из трех разделов и посвящена результатам экспериментов по параметрической генерации однорезонаторного ПГС на основе кристалла PPLN при синхронной накачке Nd:YAG-лазером с СЗАОМ, работающим в многоимпульсном режиме. Такой режим лазера накачки был выбран, чтобы избежать деградацию и разрушение кристалла при диаметре перетяжки 120 мкм. Используемый нелинейный кристалл PPLN с двумя периодами поляризации (регулярной доменной структуры) $\Lambda=29,5$ мкм и $\Lambda=30$ мкм был легирован MgO (5 мол. %) и был с размерами 5x1x20 мм.

В Разделе 1.1 описывается экспериментальная установка однорезонаторного ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG лазера с СЗАОМ, работающего в многоимпульсном режиме, а также приводятся характеристики используемого измерительного оборудования.

Лазер накачки 1 излучал на длине волны 1,0645 мкм цуг импульсов с частотой повторения 1 кГц, длительность цуга ~ 100 нс и отдельного импульса в цуге ~ 45 пс соответственно. Пиковая мощность составляла $< 0,5$ МВт. Особенность лазера накачки заключалась в том, что при отстройке длины его резонатора от длины $L_0 = \frac{c}{4f} \approx 1,5$ м (где c – скорость света, f – частота звуковой волны в модуляторе) с помощью перемещения выходного зеркала происходил распад части пикосекундных импульсов на два и более импульсов в зависимости от величины отстройки. Это связано с возбуждением нескольких конкурирующих поперечных мод, что приводило к расщеплению одиночных пикосекундных импульсов синхронизации мод на несколько импульсов с временным расстоянием между ними ~ 100 пс [21]. Поскольку при моноимпульсном режиме образовывались серые треки в кристалле [22], измерения проводились при отстройке выходного зеркала лазера накачки от длины резонатора $\Delta L_n = 300$ мкм (статистика импульсов накачки была $\sim 53\%$ одиночных, 37% двойных и $\sim 10\%$ тройных) и $\Delta L_n = 700$ мкм (статистика импульсов: 25% - одиночные, 45% - двойные, 20% - тройные и 10% - четверные). Средняя мощность накачки плавно регулировалась с помощью поляризационного аттенюатора А.

Резонатор ПГС был образован тремя зеркалами 31, 32 и 33. Зеркало 31 имело коэффициент отражения в области 1,4-1,7 мкм $R_{1,4-1,7} = 99,5\%$ и коэффициент пропускания на 1,064 мкм $T_{1,064} \approx 99,2\%$. Медное зеркало 32 имело коэффициенты отражения: $R_{1,0-1,7} \approx 90\%$ в области 1-1,7 мкм и $R_{3,0-4,0} \approx 97\%$ в области 3-4 мкм. Плоское выходное зеркало 33 с коэффициентом отражения в области 1,2-1,7 мкм $R_{1,2-1,7} = 99,5\%$ имело высокое пропускание на 1,064 мкм ($T_{1,064} = 78\%$) и в диапазоне 3-4 мкм ($T_{3,0-4,0} = 99,5\%$).

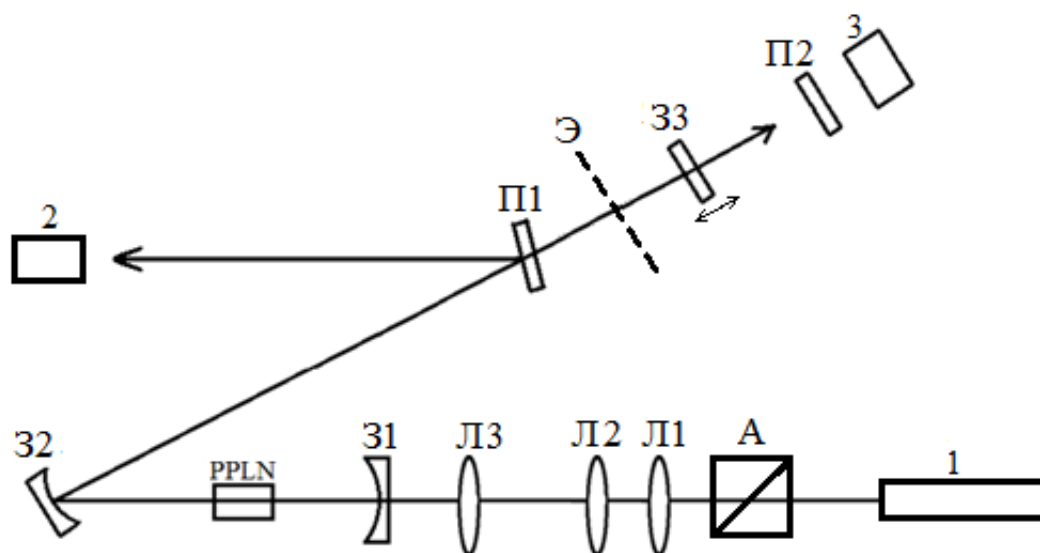


Рисунок 1. Экспериментальная установка однорезонаторного ПГС. 1 – Nd:YAG лазер накачки; 2– монохроматор МДР-23, 3 –измеритель мощности; А – поляризационный аттенюатор; Л1, Л2–согласующие линзы; Л3 –фокусирующая линза; 31, 32, 33 –зеркала резонатора ПГС; П1 –сапфировая пластинка; П2–германиевая пластинка; Э- поглощающий экран.

Сапфировая пластинка П1 отражала около 15% излучения из резонатора. Германиевая пластинка П2 использовалась для селекции холостой длины волны. Объектив, образованный линзами Л1 и Л2, уменьшал расходимость лазера накачки 1 в $\sim 4,5$ раза для обеспечения нужной каустики гауссова пучка накачки. Линза Л3 фокусировала излучение накачки в нелинейный кристалл PPLN. Диаметр луча накачки в перетяжке составлял ≈ 120 мкм по уровню e^2 . Экран Э использовался для наблюдения режима суперлюминесценции, когда резонатор отсутствует и генерация возникает за один проход в нелинейном кристалле. Кристалл находился в термостате, температура которого регулировалась с помощью ПИД-регулятора. Для контроля и измерения мощности холостой длины волны использовались пироэлектрический фотоприемник МГ-30 или измеритель мощности 3 типа Thorlabss302с.

В разделе 1.2 приводятся результаты эксперимента. Диапазон перестройки выходного излучения, в зависимости от изменения температуры кристалла от 20 до 150 °С, составил 1,48-1,58 мкм и 3,8-3,4 мкм для сигнальной и холостой

длин волн соответственно на двух областях кристалла PPLN с периодами поляризации 30 и 29,5 мкм. Измерения всех генерационных и спектральных характеристик происходили в области кристалла PPLN с $\Lambda=30$ мкм и при комнатной температуре кристалла.

Были измерены зависимости средней мощности на сигнальной длине волны в резонаторе ПГС $P_{\text{сигн}}$ и выходной мощности на холостой длине волны $P_{\text{хол}}$ от средней мощности накачки с сапфировой пластинкой П1 в резонаторе и зависимость выходной мощности холостой волны без этой пластины. Максимальная средняя выходная мощность на холостой длине волны $P_{\text{хол}}$ была 10 и 12 мВт с сапфировой пластинкой в резонаторе и без нее соответственно. Излучение сигнальной длины волны выводилось из резонатора с помощью сапфировой пластинки, далее через светофильтр попадало на измеритель мощности и по ней определялась мощность в резонаторе, максимум которой составил 30 мВт. Пороговая мощность накачки была на уровне 100 мВт во всем заданном температурном диапазоне (20-150 °C) и мало зависела от изменения температуры кристалла.

Была измерена также прошедшая через нелинейный кристалл PPLN мощность накачки $P_{\text{вых}}$ в зависимости от падающей мощности накачки $P_{\text{вх}}$, а из полученных данных было рассчитано значение поглощения накачки, максимум которого был $\sim 50\%$. Таким образом, КПД преобразования по поглощенной мощности для холостой длины волны был $\sim 10\%$.

Для эффективной генерации ПГС в режиме ультракоротких импульсов необходимо обеспечить равенство межмодовой частоты резонатора ПГС и межмодовой частоты лазера накачки. Это достигалось подстройкой длины резонатора ПГС к длине $L_0 \approx 1,5$ м. Точная подстройка осуществлялась перемещением зеркала ЗЗ вдоль оси резонатора ПГС. Ниже на Рисунке 2 представлены зависимости выходной мощности на холостой длине волны от изменения длины резонатора ПГС относительно L_0 при двух различных режимах работы лазера накачки, описанных выше (при $\Delta L_{\text{н}}=300$ мкм и $\Delta L_{\text{н}}=700$ мкм).

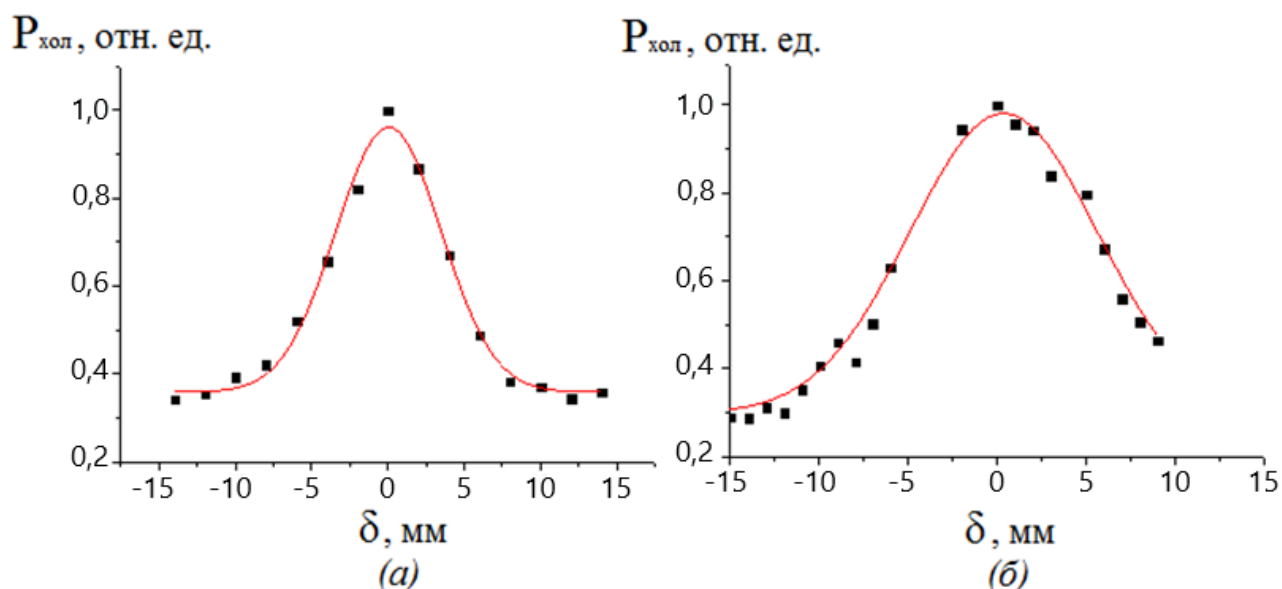


Рисунок 2. Зависимость относительной выходной мощности холостой волны $P_{хол}$ от δ изменения длины резонатора ПГС. (а) – при $\Delta L_n=300$ мкм; (б) – при $\Delta L_n=700$ мкм.

Из данной зависимости видно, что ширина изменения длины резонатора ПГС δ относительно L_0 на полувысоте была на уровне 8 мм в первом случае и 12 мм во втором.

С помощью монохроматора МДР-23 был измерен спектр генерации на сигнальной длине волны. Ширина линии генерации сигнальной волны составила 13 см^{-1} или 400 ГГц. Ширина входной и выходной щелей монохроматора была 50 мкм.

Поскольку всё излучение имело высокие пиковые мощности на длинах волн накачки и параметрической генерации ($\sim 0,1-0,5 \text{ МВт}$), то возникали дополнительные нелинейные взаимодействия в кристалле PPLN, результатом которых были линии видимого диапазона в выходном излучении. Полученная спектрограмма в диапазоне 350-830 нм представлена на рисунке 3. Наряду с линиями генерации вторых гармоник от накачки – 532 нм и сигнальной волны – 754 нм были получены спектральные линии с центрами на 624 нм, 463 нм, 442 нм, 392 нм и 355 нм. Диапазоны перестройки длин волн на линиях 442 нм, 463 нм и 624 нм при изменении температуры нелинейного кристалла от 20 до 150 $^{\circ}\text{C}$ не превышали $\sim 5-10 \text{ нм}$.

Ширины измеренных линий были на уровне 0,3-1 нм. В частотной области ширины измеренных линий равны:

$$\Delta\nu_{355} \approx 190 \text{ ГГц} ; \Delta\nu_{392} \approx 260 \text{ ГГц} ; \Delta\nu_{442} \approx 290 \text{ ГГц} ; \Delta\nu_{463} \approx 300 \text{ ГГц} ; \\ \Delta\nu_{532} \approx 250 \text{ ГГц}; \Delta\nu_{624} \approx 170 \text{ ГГц}, \Delta\nu_{822} \approx 230 \text{ ГГц}.$$

Параметрическая генерация имела место и в режиме суперлюминесценции, когда перед выходным зеркалом 33 помещался непрозрачный экран. В обоих случаях, помимо холостой и сигнальной волн, в спектре выходного излучения присутствовали линии в видимом диапазоне. Максимальная выходная средняя мощность параметрической суперлюминесценции была на уровне ~ 4 мВт.

Раздел 1.3 представляет собой анализ полученных результатов и выводы. Приводятся расчеты коэффициента параметрического усиления $G \approx 3 \times 10^{12}$, выходной пиковой мощности на холостой длине волны $P_m \approx 25 \text{ кВт}$. Указываются причины полученного значения КПД преобразования в холостую длину волны ($\sim 10\%$ по поглощенной мощности).

Анализируются полученные данные по ширине отстройки резонатора ПГС δ . Для нашего случая ширина отстройки составила 8 и 12 мм, что соответствует рассогласованию по времени $\Delta\tau$ в 27 пс и 40 пс. В то время как, в условиях синхронной накачки ПГС, ширина отстройки длины резонатора δ обычно составляет $(1/20 - 1/10)c\tau_p$ [21]. В работе [24], с помощью компенсации дисперсии групповых скоростей импульсов сигнальной длины волны и излучения накачки, увеличили δ до $\sim 0.25c\tau_p$. В нашем случае $\delta \sim c\tau_p$ без использования элементов компенсации дисперсии. Увеличенная ширина δ , относительно других работ по синхронной накачке ПГС ([21, 24]), является следствием малого временного интервала между импульсами по сравнению с временем двойного обхода резонатора в некогерентном режиме.

Объяснено происхождение линий видимого и ближнего ИК диапазона, которые являются результатом процессов смешения частот волны накачки (ω_p) и сигнальной волны (ω_s), возникающих в нелинейном кристалле:

$$2\omega_p = \omega_{532}, \quad 2\omega_s = \omega_{754}, \quad \omega_p + \omega_s = \omega_{624}, \quad 3\omega_p - \omega_s = \omega_{463},$$

$$\omega_p + 2\omega_s = \omega_{442}, \quad 2\omega_p + \omega_s = \omega_{392}, \quad 3\omega_p = \omega_{355}, \quad 2\omega_p - \omega_s = \omega_{822}.$$

Перестраиваемые линии 392, 463 и 822 нм наблюдались впервые.

На основании полученных данных по выходной мощности в режиме суперлюминесценции приводятся способы ее увеличения, которые заключаются: 1) в увеличении длины нелинейного кристалла PPLN; 2) в использовании моноимпульсного режима генерации лазера накачки при увеличении диаметра перетяжки в кристалле, чтобы интенсивность накачки не вызывала паразитных эффектов наведенного поглощения и не превышала порога разрушения.

Вторая глава состоит из четырех разделов и посвящена результатам по получению эффективной параметрической суперлюминесцентной генерации в кристалле PPLN при накачке цугами 45-пикосекундных импульсов от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ, работающего в моноимпульсном режиме. Для увеличения КПД преобразования в суперлюминесцентную параметрическую генерацию, было решено использовать PPLN-кристалл с размерами 1x7x50 мм. Для предотвращения образования серых треков в кристалле и его дальнейшего разрушения был собран новый объектив, который уменьшал расходимость лазера накачки в 3,5 раза. Таким образом была увеличена перетяжка излучения накачки в кристалле PPLN.

В разделе 2.1 подробно описана схема экспериментальной установки суперлюминесцентного (безрезонаторного) ПГС (рисунок 4). Максимальная пиковая мощность излучения накачки составляла ~ 0,5 МВт.

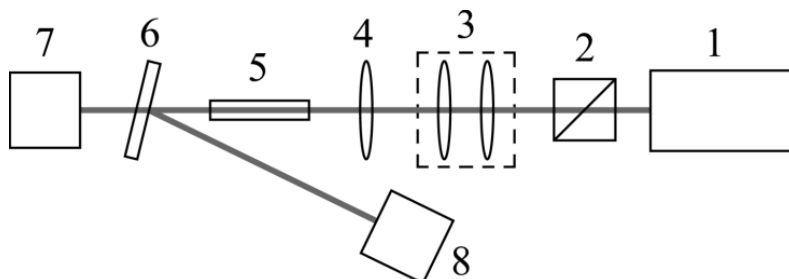


Рисунок 4. Схема эксперимента. 1 – Nd:YAG-лазер с СЗАОМ; 2 – регулятор мощности; 3 – объектив; 4 – фокусирующая линза; 5 – нелинейный кристалл PPLN; 6 – фильтрующий элемент; 7, 8 – измерители мощности.

В качестве регулятора мощности накачки 2 использовался поляризационный аттенюатор. Объектив 3 использовался для уменьшения расходимости лазера накачки в 3,5 раза. Полная расходимость (на уровне e^{-2}) после объектива составила 0,57 мрад. Фокусирующая линза 4 имела фокусное расстояние в 280 мм и выбиралось по соображениям получения максимально возможной выходной мощности. Кристалл PPLN размещался таким образом, чтобы диаметр перетяжки составлял 160 мкм.

Нелинейный кристалл PPLN, допированный MgO (5% mol.), с размерами 1x7x50 мм и $\Lambda=29,5$ мкм не имел просветляющих покрытий на гранях. В качестве фильтрующего элемента 6 использовалось плотное зеркало на 1064 нм или пластинка из германия, соответственно, при измерении суммарной или холостой мощности излучения. Измерителем мощности 7 регистрировалась выходная мощность на холостой длине волны и суммарная выходная мощность на всех длинах волн. Измеритель мощности 8 использовался для измерения падающей и прошедшей через кристалл мощности накачки.

В разделе 2.2 приводятся результаты эксперимента по получению суперлюменесцентной параметрической генерации. Все измерения проводились при комнатной температуре кристалла PPLN 24 °C. Были измерены зависимости выходной средней мощности на холостой длине волны 3820 нм и суммарная выходная мощность на холостой и сигнальной 1475 нм при частоте повторения в 1 и 1,7 кГц в зависимости от мощности накачки.

Максимальная средняя суммарная выходная мощность на холостой и сигнальной длинах волн достигала 115 и 185 мВт при частоте повторения 1 и 1,7 кГц, максимальная пиковая мощность была, соответственно, ~ 210 и 200 кВт. Максимальная средняя мощность на холостой длине волны была 30 мВт при 1 кГц и 46 мВт при 1,7 кГц. Соответственно, пиковая мощность составила ~ 55 и 50 кВт. Максимум истощения накачки составил ~50 и 53%, соответственно, на 1 и 1,7 кГц. Общая эффективность преобразования по поглощенной мощности составляла ~80 и 83% для соответствующих частот повторения 1 и 1,7 кГц.

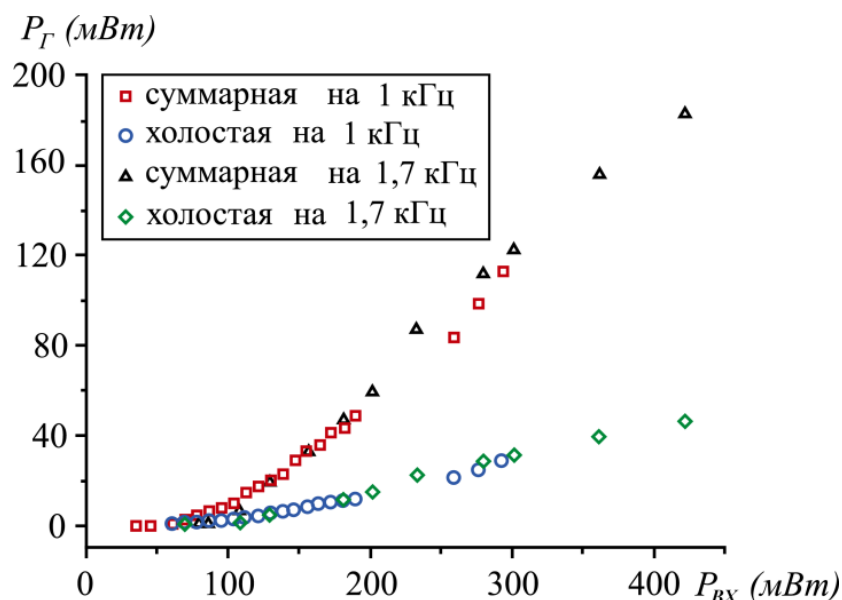


Рисунок 5. Зависимость выходной мощности P_T от входящей в кристалл мощности накачки P_{BX} при частоте повторения 1 и 1,7 кГц.

В коротковолновой части спектра также, как и в главе 1, наблюдались слабые линии генерации. Суммарная мощность коротковолновых линий составляла ~ 1 мВт, поэтому при измерениях суммарной мощности ПГС (в условиях рисунка 5) их можно было не учитывать. Измеренные ширины коротковолновых линий $\Delta\nu$ составили: $\Delta\nu_{467} \sim 270$ ГГц, $\Delta\nu_{491} \sim 330$ ГГц, $\Delta\nu_{516} \sim 610$ ГГц, $\Delta\nu_{618} \sim 310$ ГГц.

На расстоянии $L=2$ м от кристалла PPLN (что соответствует дальней зоне дифракции) были измерены поперечные распределения мощности выходного излучения на длинах волн 1475 нм, 3820 нм, 619 нм и прошедшего через кристалл излучения накачки – 1064 нм. На основании этих распределений для соответствующих длин волн были вычислены полные расходимости излучения, значения которых совпали и были равны 30 мрад.

В разделе 2.3, на основании описанных полученных результатов, проводится детальный анализ полученного КПД преобразования в 83%. Указываются и подробно рассматриваются следующие причины не полного преобразования по поглощенной мощности (потери $\sim 17\%$):

- 1) поглощение излучения на холостой волне ($\sim 3,8$ мкм);
- 2) поглощение холостой волны при каскадной параметрической генерации;

- 3) поглощение слабых кратных и комбинационных гармоник в УФ области;
- 4) светоиндуцированное видимыми линиями поглощение накачки [22, 25].

Объясняется происхождение линий в коротковолновой области спектра выходного излучения. Наряду с ранее наблюдавшимися в главе 1 линиями, которые являются результатом процесса смешения частот волн накачки ω_p , сигнальной ω_s , холостой ω_i и их гармоник, в спектре выходного излучения присутствовали новые линии. Так синяя линия 491,6 нм является третьей гармоникой от сигнальной волны, а линия 416,2 нм является второй гармоникой от суммарной частоты волн накачки и холостой:

$$\omega_{491,6} = 3\omega_s, \quad \omega_{416,2} = 2(\omega_p + \omega_i)$$

В зеленой области спектра помимо линии 532,1 нм (второй гармоники от накачки) наблюдалось еще 8 линий. Линии 516,6 нм, 547,7 нм, 526,1 нм, 526,9 нм, 537,85 нм и 538,4 нм, по-видимому, являются результатом двухступенчатого каскадного процесса – генерации второй гармоники и вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) на продольных и поперечных оптических фононах (ТО и LO-колебаниях) в PPLN [26]. Линия 535,9 нм может быть результатом каскадной параметрической генерации второй гармоники. Согласно расчетам, выполненным в программном пакете SNLO [27], при $\Lambda=29,5$ мкм каскадная параметрическая генерация (при накачке сигнальной волной 1475 нм) дает сигнальную волну (λ_{s2}) на 2162 нм и холостую (λ_{i2}) на 4642 нм. Каскадная сигнальная волна ≈ 2162 нм смешивается с волной накачки 1064,2 нм и даёт излучение на длине волны $\approx 1075,8$ нм, вторая гармоника которого попадает в рассматриваемую область – 535,9 нм. Линия 540,6 нм – четвертая гармоника от каскадной сигнальной.

Независящее от длины волны значение расходимости выходного излучения 30 мрад объясняется тем, что: 1) на более коротких длинах волн, по-видимому, возбуждаются поперечные моды из-за многомодовой структуры волны накачки [23] и коллинеарности параметрической суперлюминесценции; 2) в режиме суперлюминесценции расходимость выходного излучения

определяется углом сходимости излучения накачки в диаметр перетяжки 160 мкм.

В разделе 2.4 обобщаются результаты. Приводятся рекомендации по дальнейшему повышению выходной мощности и КПД преобразования.

Третья глава посвящена сравнению выходных характеристик излучения в двух режимах параметрической генерации света – параметрической суперлюминесценции и синхронно-накачиваемого однорезонаторного ПГС на кристалле PPLN (длиной 50 мм) с накачкой от Nd:YAG-лазера с СЗАОМ в моноимпульсном режиме. Суммарная выходная средняя мощность на сигнальной (1475 нм) и холостой (3820 нм) длинах волн в режиме суперлюминесценции составила ~120 мВт (пиковая мощность ~120 кВт). Максимальная суммарная эффективность преобразования по поглощенной мощности в режиме суперлюминесценции была на уровне 60%. Максимальная эффективность преобразования в холостую длину волны по поглощенной мощности накачки составила 15% и 25% (квантовая 54% и 90%), соответственно, для режима суперлюминесценции и однорезонаторного ПГС. Максимальные значения средней выходной мощности на холостой длине волны составляли ~30 мВт и ~60 мВт при истощении накачки 47% и 55% для режимов суперлюминесценции и однорезонаторного ПГС, соответственно.

Показано, что наличие резонатора приводит к увеличению эффективности преобразования в холостую длину волны ~2 раза и уменьшению порога генерации не менее чем в 1,7 раза по сравнению с режимом суперлюминесценции.

В режиме суперлюминесценции в спектре выходного излучения присутствует мощная сигнальная волна и общая эффективность преобразования по поглощенной мощности довольно высока (60-80%). Общую эффективность преобразования можно существенно повысить за счет получения мощного перестраиваемого излучения в красной области спектра путем суммирования сигнальной волны с волной накачки. Для этого достаточно за исследуемым кристаллом PPLN поместить PPLN с другим периодом Λ (на суммарную

частоту). Как было выше отмечено, эта перестраиваемая линия генерации будет иметь ту же расходимость излучения, что и ИК линии суперлюминесцентной ПГС. Очевидным преимуществом суперлюминесцентной ПГС является отсутствие резонатора и более богатый спектр выходного излучения, в котором возможна одновременная перестройка в его разных областях (видимый, ближний и средний-ИК).

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы:

- 1) Был создан безрезонаторный суперлюминесцентный параметрический генератор с общей эффективностью преобразования по поглощенной мощности $\sim 80\%$ с накачкой от Nd:YAG лазера с СЗАОМ. Изучены его генерационные и спектральные характеристики. Максимальная общая выходная пиковая мощность составила 210 кВт.
- 2) Был создан однорезонаторный ПГС с синхронной накачкой от Nd:YAG лазера с СЗАОМ. Показано, что в немонаимпульсном режиме генерации лазера накачки ширина отстройки резонатора ПГС увеличивается в 10-20 раз.
- 3) Показано, что истощение излучения накачки в суперлюминесцентном и однорезонаторном режиме параметрической генерации остается на уровне $\sim 50\%$ и не зависит от длины кристалла при использовании в качестве лазера накачки Nd:YAG лазера с СЗАОМ.
- 4) В обоих режимах параметрической генерации объяснено происхождение линий в видимой области спектра. Линии на 392, 463, 822 нм в однорезонаторном режиме и линии на 416,2, 491,6, 516,6, 526,1, 526,9, 537,85, 538,4, 540,6 и 547,7 нм в режиме суперлюминесценции наблюдались впервые.
- 5) Показано, что резонатор на сигнальную длину волны для синхронной накачки влияет на параметры суперлюминесцентной генерации следующим образом – уменьшается порог генерации и увеличивается КПД преобразования для холостой длины волны в ~ 2 раза. Ограничивается

спектр выходного излучения до спектра холостой длины волны (средней ИК диапазон).

Список публикаций по теме диссертации

1. Донин В. И., Яковин Д. В., Яковин М. Д. Параметрический генератор света среднего ИК диапазона с синхронной накачкой от Nd:YAG лазера с модуляцией добротности и синхронизацией мод // Квантовая электроника. – 2016 – т. 46 – №12 – с. 601-605
2. Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В., Яковин М. Д. Новый метод модуляции добротности резонатора и синхронизации мод в твердотельных лазерах // Оптический журнал – 2018 – т. 85 – №4 – с. 8-11
3. Donin V. I., Yakovin D.V. Yakovin M.D. Griбанov A.V. Superluminescent high-efficient parametric generation in PPLN crystal with pumping by a Q-switched mode locked Nd:YAG laser // Laser Physics Letters – 2018 – v. 15 – №3 – p. 035005
4. Донин В. И., Яковин М. Д., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Параметрическая генерация в кристалле PPLN при накачке Nd:YAG лазером с модуляцией добротности и синхронизацией мод: сравнение суперлюминесцентного и однорезонаторного режимов // Квантовая электроника. – 2018 – т. 48 – №10 – с. 936-940
5. Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В., Яковин М. Д. Новый метод управления длительностью импульсов генерации в твердотельных лазерах // Труды XXV Международной Конференции "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте", г. Новороссийск, ГМУ имени Ф. Ф. Ушакова, 4-9 сентября 2017г, с.13
6. Donin V. I., Yakovin D. V., Griбанov A. V., Yakovin M. D. New Method of Control of the Duration of Output Pulses in Solid-state Lasers // International Conference on Semiconductors Optoelectronics and Nanostructures, Invited Talks (Day1), p. 27, August 20-21, 2018, Paris, France.
7. Donin V. I., Yakovin D. V., Yakovin M. D. Parametric generation in PPLN crystal with pumping by a Q-switched mode locked Nd:YAG laser: Comparison of super

luminescent and singly-resonant regimes // International Conference on Laser, Optics and Photonics, p. 13, August 23-24, 2018, Paris, France

Список цитируемой литературы

1. Данелюс Р., Пискаркас А., Сируткайтис В. Пикосекундные параметрические генераторы света и их применение в абсорбционной спектроскопии быстропротекающих процессов // Квантовая электроника. – 1982 – т. 9 – №12 – с. 2491-2501
2. Бакулин А. А., Парашук Д. Ю., ванЛоосдрехт П. Х. М., Пшеничников М. С. Сверхбыстрая поляризационная спектроскопия фотоиндуцированных зарядов в полупроводниковом полимере // Квантовая электроника. – 2009 – т. 39 – №7 – с. 643-648
3. Онюшков Г. И., Фомичев А. А., Холодных А. И. Пикосекундный параметрический генератор света с накачкой излучением непрерывно накачиваемого лазера на АИГ:Nd³⁺ // Квантовая электроника. – 1983 – т. 10 – №8 – с. 1525-1526
4. Пискаркас А., Стабинис А., Умбрасас А., Янкаускас А. Параметрический чирп и 20-кратное сжатие импульсов квазинепрерывного пикосекундного ПГС // Квантовая электроника. – 1985 – т. 12 – №11 – с. 2335-2337
5. Пискаркас А., Смильгавичюс В., Умбрасас А., Юодишюс И. Параметрическая генерация пикосекундных световых импульсов в кристалле LiNbO₃ с частотой повторения до 10 кГц // Квантовая электроника. – 1986 – т. 13 – №6 – с. 1281-1284
6. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика // Москва: МИР – 1976 – с. 198
7. McCarthy M. J., Hanna D. C. Continuous-wave mode-locked singly resonant optical parametric oscillator synchronously pumped by a laser-diode-pumped Nd:YLF laser // Optics Letters. – 1992 – v. 17 – №6 – p. 402-404
8. Chen Q., Risk W. P. Periodic poling of KTiOPO₄ using an applied electric field // Electronics Letters – 1994 – v. 30 – №18 – p. 1516-1517

9. Zhu S., Zhu Y., Zhang Z., Shu H., Wang H., Hong J., Ge C. LiTaO₃ crystal periodically poled by applying an external pulsed field // Journal of Applied Physics – 1995 – v. 77 – №10 – p. 5481-5483
10. Magel G. A., Lim E. J., Fejer M. M., Byer R. L. Second harmonic generation in periodically-poled LiNbO₃ // Optics News. – 1989 – v. 15 – №12 – p. 20-21
11. Armstrong J. A., Bloembergen N., Ducuing J., Pershan P. S. Interactions between Light Waves in a Nonlinear Dielectric // Physical Review – 1962 – v. 127 – №6 – p. 1918-1939; Bloembergen N., Sievers A. J. Nonlinear Optical Properties of Periodic Laminar Structures // Applied Physics Letters – 1970 – v. 17 – №11 – p. 483-485
12. Ebrahimzadeh M. Optical Parametric Oscillators: New Horizons // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference – 2017 – 978-1-5090-6736-7
13. Lim H.-H., Prakash O., Kim B.-J., Pandiyan K., Cha M., Rhee B. K. Ultra-broadband optical parametric generation and simultaneous RGB generation in periodically poled lithium niobate // Optics Express. – 2007 – v. 15 – №26 – p. 18294-18299
14. Lin S.-T., Chang G.-W., Huang Y.-C. Monolithic PPLN Bragg Q-switch and Wavelength Converter // Japan Society of Applied Physics-Optical Society of America Joint Symposia – 2013 – 18a_D5_7
15. Ishizuki H., Taira T. Efficient optical parametric generation pumped by a sub-nanosecond MOPA source // High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress – 2018 – MW1C.1
16. Донин В. И., Грибанов А. В., Яковин Д. В. Режимы генерации Nd:YAG-лазера с синхронизацией мод акустооптическим модулятором бегущей волны и сферическим зеркалом // Квантовая электроника – 2018 – т. 48 – №8 – с. 699-702
17. Кравцов Н. В. и др. Синхронизация мод лазера с помощью модулятора на бегущей акустической волне // Письма в ЖТФ. – 1983. – Т. 9. – №. 7. – С. 440-443

18. Bourdet G. L. et al. Active mode locking of a high pressure CW waveguide CO₂ laser // *Applied Physics B*. – 1987. – V. 44. – №. 2. – P. 107-110
19. Надточеев В. Е., Наний О. Е. Использование бегущих акустических волн для синхронизации мод в лазерах // *Квантовая электроника*. – 1989. – Т. 16. – №. 11. – С. 2231-2234
20. Bjorkholm J. E. Some effects of spatially nonuniform pumping in pulsed optical parametric oscillators // *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*. – 1971 – v. 7 – №3 – p. 109-118
21. Graf T., McConnell, Ferguson A. I., Bente E., Burns D., Dawson M. D. Synchronously pumped optical parametric oscillation in periodically poled lithium niobate with 1-W average output power // *Applied Optics* – 1999 – v. 38 – №15 – p. 3324-3328
22. Hirohashi J., Tago T., Nakamura O., Miyamoto A., Furukawa Y. Characterization of GRIIRA properties in LiNbO₃ and LiTaO₃ with different compositions and doping // *Proceedings SPIE* – 2008 – v. 6875 – p. 687516
23. Донин В. И., Грибанов А. В., Яковин Д. В. Структура пикосекундных импульсов генерации в диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере с модуляцией добротности и синхронизацией мод // *Квантовая электроника*. – 2015 – т. 45 – №12 – с. 1117-1120
24. Laporte C., Dherbecourt J.-B., Melkonian J.-M., Raybaut M., Drag C., Godard A. Analysis of cavity-length detuning in diffraction-grating narrowed picosecond optical parametric oscillators // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2014 – v. 31 – №5 – p. 1026-1034
25. Hirohashi J., Pasiskevicius V., Wang S., Laurell F. Picosecond blue-light-induced infrared absorption in single-domain and periodically poled ferroelectrics // *Journal of Applied Physics* – 2007 – v. 101 – №3 – p. 033105
26. Сушинский М. М. Резонансное неупругое рассеяние света в кристаллах // *Успехи Физических Наук* – 1988 – т.154 – №10 – с.353-379
27. Smith A. V. Crystal nonlinear optics: with SNLO examples // *Albuquerque: AS-Photonics* – 2015 – p. 445