

На правах рукописи

Сметанин Сергей Николаевич

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ
КОМБИНАЦИОННО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
В ВКР АКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Специальность: 01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2018 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Официальные оппоненты:

Лосев Леонид Леонидович

доктор физико-математических наук,
Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,
ведущий научный сотрудник лаборатории инновационных лазерных систем

Орлович Валентин Антонович

доктор физико-математических наук, профессор,
Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси,
заведующий лабораторией нелинейной оптики Научного центра “Нелинейная оптика и активированные материалы”

Ошурко Вадим Борисович

доктор физико-математических наук,
Московский государственный технологический университет «Станкин»,
заведующий кафедрой физики

Ведущая организация: Международный учебно-научный лазерный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится 30 апреля 2018 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу: 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, 38, корп.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/disser/compet.php>.

Автореферат диссертации разослан “ ____ ” _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Макаров Вячеслав Петрович
тел.: 8 (499) 503-83-94

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание новых спектрально позиционированных источников когерентного излучения актуально для многих приложений, в основе которых лежит резонансное взаимодействие света с веществом. Благодаря резонансному поглощению многих молекул в инфракрасном диапазоне такие источники востребованы для экологического мониторинга, дистанционного зондирования состава веществ, медицинской диагностики, нано- и биотехнологий. Они также требуются для волоконной, атмосферной и подводной оптической связи в различных “окнах прозрачности” оптоволоконна, атмосферы и вод океана.

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) является простым и эффективным методом нелинейно-оптического преобразования частоты лазерного излучения. Физика ВКР изучается уже на протяжении более 50 лет. Основные результаты широко известны из обзоров Бломбергера [1], Шена [2] и других. Хорошо известно [3], что в ВКР-активной среде реализуется не только ВКР-генерация, но и параметрические четырехволновые взаимодействия (ЧВВ) генерируемых компонент излучения, что обеспечивает генерацию не только стоксовых, но и антистоксовых волн, что было впервые обнаружено Терхьюном еще на заре нелинейной оптики в шестидесятых годах [1]. Нужно отметить, что такие взаимодействия сегодня находят широкое применение в высокоточной когерентной спектроскопии комбинационного рассеяния света, развитой в работах Ахманова и других [4]. С другой стороны четырехволновые комбинационно-параметрические взаимодействия актуальны для нелинейно-оптических преобразователей лазерного излучения благодаря возможности получения новых частотных компонент излучения. Однако эффективность комбинационно-параметрической генерации оказалась недостаточно высокой для ее широкого применения в преобразователях оптической частоты. Попытки повышения ее эффективности не прекращаются до сих пор. В шестидесятых-семидесятых годах – это были работы советских ученых Лугового, Бутылкина, Хронопупо и других [5-7], в восьмидесятых – работы не только советских ученых, например, Паперного и других [8], но и зарубежных ученых – Хикмана и других [9,10], в девяностых и нулевых годах – это были российские работы Грасюка, Лосева, Тункина и других [11-16], а также работы австралийских [17] и китайских ученых [18]. Так в газах удалось повысить эффективность антистоксовой комбинационно-параметрической генерации до 10 % [11,12], но в кристаллах она так и остается на уровне 1 % [17,18] из-за высокой дисперсионной волновой расстройки, хотя теория предсказывает эффективность генерации до 40 % [10]. Представляемая работа направлена на поиск новых возможностей повышения оптической эффективности комбинационно-параметрических преобразователей частоты при использовании ВКР-активных кристаллов.

В последние годы возникла новая волна интереса к кристаллическим лазерам на ВКР. Это вызвано, во-первых, проведенной классификацией известных кристаллических комбинационно-активных материалов и выявлением новых перспективных кристаллических ВКР-активных сред [19], флагманами среди которых являются искусственные кристаллы CVD-алмаза и вольфрамата бария, синтезируемые в ИОФ РАН [20,21], во-вторых, прогрессом в продвижении кристаллических ВКР-лазеров в фемтосекундный диапазон длительностей импульсов излучения [22-24], в-третьих, появлением кристаллических ВКР-лазеров непрерывного действия [25-27]. При этом особое место занимают компактные полностью твердотельные лазеры, в которых один и тот же активный кристалл является не только инвертированной, но и ВКР-активной лазерной средой [28-32]. Известен ряд таких уникальных лазерных кристаллов – вольфраматы, молибдаты и ванадаты, активируемые редкоземельными лазерными ионами, например, кристалл ванадата гадолиния с неодимом, синтезированный в ИОФ РАН. Недавно в кристаллических ВКР-лазерах были получены рекордно большие длины

волн излучения – 3.7 мкм в кристалле вольфрамата бария [33] и 3.8 мкм в CVD-алмазе [34], что в обоих случаях качественно объяснялось комбинационно-параметрическими процессами, происходящими при ВКР.

Основная проблема осуществления эффективной комбинационно-параметрической генерации в ВКР-активных средах обусловлена сложностью поддержания фазового синхронизма ЧВВ. Комбинационно-параметрическая четырехволновая генерация в отличие от ВКР-генерации требует поддержания условия фазового синхронизма, поэтому взаимодействие часто является неколлинеарным, требуется использование дополнительной волны накачки, а при наличии расстройки фазового синхронизма необходимо значительное повышение интенсивности излучения накачки, что ограничено порогом оптического пробоя ВКР-кристаллов.

В нелинейной оптике сред с квадратичной нелинейностью благодаря двулучепреломлению кристаллов реализуется фазовый синхронизм коллинеарного взаимодействия. Например, известна работа [35], в которой кристалл йодата лития, является не только ВКР-генератором, но также имеет квадратичную нелинейность, обеспечивающую при определенной его ориентации параметрическое преобразование генерируемых волн путем их трехволнового взаимодействия. Однако подобные возможности для четырехволновой параметрической генерации непосредственно на нелинейности комбинационного рассеяния света в кристаллах не были реализованы.

Также сдерживающим фактором реализации многоволновой генерации ВКР-компонент излучения является ограниченность аналитических оценок порогов ВКР-генерации не только при наличии параметрической связи, но даже в ее отсутствие при обычном ВКР, если длительность импульса накачки соответствует нестационарному режиму ВКР или если ВКР-среда помещена в резонатор.

Таким образом, исследование комбинационно-параметрической генерации как антистоксовых, так и высших стоксовых компонент излучения в двулучепреломляющих ВКР-кристаллах представляется актуальным для повышения оптической эффективности комбинационно-параметрических преобразователей оптической частоты и создания новых и компактных твердотельных источников когерентного излучения в новых спектральных диапазонах.

Целью диссертационной работы являлись исследования механизмов, условий и режимов коллинеарной комбинационно-параметрической генерации при четырехволновых взаимодействиях, не требующих дополнительных источников возбуждения и поддержания, осуществляющихся непосредственно в генерирующих ВКР-активных кристаллах под действием одночастотной лазерной накачки, для разработки новых методов управления генерацией и создания простых и компактных твердотельных источников лазерного излучения на ВКР.

В рамках этого основного направления решались следующие основные **задачи**:

1. Исследование условий возбуждения ВКР-генерации в комбинационно-активных кристаллах в практически важных случаях произвольной длительности импульса накачки, однопроходного и внутррезонаторного ВКР.

2. Исследование самоподдерживающейся коллинеарной комбинационно-параметрической генерации многих частотных компонент излучения в различных ВКР-активных кристаллах при одночастотной лазерной накачке.

3. Исследование поддержания фазового синхронизма коллинеарного комбинационно-параметрического взаимодействия при ЧВВ ортогонально-поляризованных ВКР-компонент излучения в двулучепреломляющих ВКР-активных кристаллах при одночастотной лазерной накачке.

4. Исследование генерации антистоксовых и высших стоксовых ВКР-компонент излучения при поддержании фазового синхронизма коллинеарного комбинационно-параметрического взаимодействия в двулучепреломляющих ВКР-активных кристаллах при одночастотной лазерной накачке.

5. Исследование эффекта укорочения импульсов лазерного излучения до пикосекундной длительности при внутрирезонаторном комбинационно-параметрическом преобразовании оптической частоты.

Научная новизна результатов, составляющих содержание диссертации, заключается в следующем:

Впервые установлены и экспериментально обоснованы условия возбуждения ВКР-генерации в общем случае произвольной длительности импульса накачки в отличие от известных предельных случаев очень короткого (существенно нестационарный режим ВКР) и очень длинного (квазистационарный режим ВКР) импульсов накачки по отношению к времени дефазировки оптических фононов. В хорошем согласии найденных аналитических оценок с полученными экспериментальными результатами для порогов каскадной ВКР-генерации первой и второй стоксовых ВКР-компонент показаны возможности повышения энергетических характеристик ВКР-генерации первой стоксовой ВКР-компоненты и подавления ВКР-генерации второй стоксовой ВКР-компоненты, практически реализованные во внешнерезонаторном и внутрирезонаторном ВКР-лазерах на кристаллах $BaWO_4$ и $SrMoO_4:Nd^{3+}$ при управлении частотной селективностью резонатора и плотностью мощности излучения накачки.

Установлено, что при определенных условиях управления длиной ВКР-взаимодействия и длительностью лазерного импульса накачки параметрическая четырехволновая связь ВКР-компонент излучения приводит к низкопороговой коллинеарной комбинационно-параметрической генерации многих стоксовых и антистоксовых компонент излучения в ВКР-активных кристаллах под действием одночастотной лазерной накачки несмотря на дисперсионную волновую расстройку четырехволновых взаимодействий генерируемых ВКР-компонент излучения.

Предложено и осуществлено поддержание некритичного фазового синхронизма коллинеарной комбинационно-параметрической генерации при ЧВВ ортогонально поляризованных ВКР-компонент излучения в двулучепреломляющих ВКР-кристаллах под действием одночастотной лазерной накачки. Поддержание некритичного к угловой расстройке фазового синхронизма обеспечивает эффективную генерацию антистоксовых или высших стоксовых ВКР-компонент излучения, не требующую применения дополнительных источников возбуждения и поддержания в отличие от известных схем с бигармонической накачкой и неколлинеарным взаимодействием.

Обнаружен и исследован эффект укорочения импульсов излучения до пикосекундной длительности, вызванный быстрым ВКР-истощением основного излучения лазера с внутрирезонаторным комбинационно-параметрическим преобразованием оптической частоты, что обеспечивает комбинационно-параметрическую генерацию только в кратковременной области временного перекрытия импульсов лазерного и ВКР-излучения. В лазере на кристалле $SrMoO_4:Nd^{3+}$ с пассивной модуляцией добротности кристаллом ИАГ: Cr^{4+} , продольной диодной накачкой и комбинационно-параметрическим самопреобразованием оптической частоты непосредственно в генерирующей лазерной среде осуществлено укорочение длительности импульса параметрически генерируемой второй стоксовой ВКР-компоненты (1.30 мкм) до 300 пс, что на порядок короче длительности импульса основного лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм. Использование режима синхронизации мод для комбинационно-параметрического лазера на лазерном кристалле ИАГ: Nd^{3+} (генерирующем на длине волны 1.338 мкм) и ВКР-кристалле $CaCO_3$ в общем резонаторе позволило осуществить генерацию одиночного интенсивного пикосекундного импульса параметрически генерируемой антистоксовой компоненты излучения (1.168 мкм).

Научная и практическая значимость работы:

Получены согласующиеся с результатами проведенных экспериментов общие аналитические формулы оценки условий селективного возбуждения ВКР-генерации

стоксовых компонент излучения в ВКР-активных кристаллах при произвольной архитектуре ВКР-лазера.

Реализована самоподдерживающаяся параметрическая связь частотных компонент излучения при ВКР в кристаллах, что приводит к снижению требуемой плотности мощности накачки и позволяет разработать более простые и надежные схемы частотного преобразования лазерного излучения.

Осуществлено поддержание нечувствительного к угловой расстройке фазового синхронизма коллинеарной четырехволновой ВКР-генерации антистоксовых и высших стоксовых компонент в двулучепреломляющих ВКР-активных кристаллах, в том числе и активированных лазерными ионами, открывающее новые возможности для создания эффективных, простых и компактных твердотельных источников излучения в новых спектральных диапазонах.

Предложены и экспериментально реализованы новые методы генерации и укорочения лазерных импульсов, основанные на связанных нелинейно-оптических взаимодействиях, происходящих непосредственно в активной лазерной среде и не требующих дополнительных источников возбуждения и поддержания, что служит основой для создания новых, простых и компактных твердотельных источников когерентного излучения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается высоким уровнем экспериментальной техники, сопоставлением данных, полученных различными методами, применением современных методов теоретического исследования и численного моделирования, сравнением с имеющимися литературными данными.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Существует формула оценки условий селективного возбуждения ВКР-генерации различных компонент излучения в ВКР-активных кристаллах не только в предельных случаях существенно нестационарного и квазистационарного режимов ВКР, а в общем случае произвольной длительности импульса накачки для однопроходного и внутриврезонаторного ВКР.

2. Существуют оптимальные условия низкопороговой коллинеарной комбинационно-параметрической генерации мультиоктавной частотной гребенки ВКР-компонент излучения в различных ВКР-активных кристаллах под действием одночастотной лазерной накачки.

3. Поддержание нечувствительного к угловой расстройке фазового синхронизма обеспечивается для коллинеарного комбинационно-параметрического ЧВВ ортогонально поляризованных ВКР-компонент излучения в двулучепреломляющих ВКР-активных кристаллах в условиях одночастотной лазерной накачки.

4. Генерация антистоксовой и высшей стоксовой компонент ВКР-излучения реализуется при поддержании нечувствительного к угловой расстройке фазового синхронизма коллинеарного комбинационно-параметрического четырехволнового взаимодействия в двулучепреломляющих ВКР-активных кристаллах под действием одночастотной лазерной накачки.

5. Эффект укорочения импульса до пикосекундной длительности в режиме модуляции добротности и генерации одиночного интенсивного пикосекундного импульса в режиме синхронизации мод для параметрически генерируемой компоненты излучения происходит посредством быстрого ВКР-источения основного излучения кристаллического лазера с внутриврезонаторным комбинационно-параметрическим преобразованием оптической частоты.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (Москва), Института кристаллографии им А.В. Шубникова РАН (Москва), Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород) и МГУ (Москва). Материалы диссертации обсуждались на международных научных конференциях: International Conference on

Advanced Solid-State Photonics ASSP-2004 (Santa Fe, USA); International Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO/Europe-2003, CLEO/Europe-2015, CLEO/Europe-2017 (Munich, Germany), CLEO/US-2015 (San Jose, USA), CLEO/PR-2017 (Singapore, Singapore); International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / Conference on Lasers, Applications and Technologies ICONO/LAT-2013 (Moscow, Russia); International Conference on Laser Optics LO'2003, LO'2008, LO'2010, LO'2012, LO'2016 (St. Petersburg, Russia); International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'2013 (Budva, Montenegro); International Conference SPIE Optics + Optoelectronics 2017 (Prague, Czech Republic).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 43 работы, из которых: 21 работа опубликована в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК [A1, A2, A3, A4, A5, A8, A9, A13, A14, A20, A21, A23, A24, A26, A27, A30, A32, A33, A37, A39, A41]; 22 работы опубликованы в материалах всероссийских и международных научных конференций [A6, A7, A10, A11, A12, A15, A16, A17, A18, A19, A22, A25, A28, A29, A31, A34, A35, A36, A38, A40, A42, A43].

Личный вклад автора.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, правильно отражают личный вклад автора. Все основные результаты работы получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Часть экспериментальных исследований по ВКР-генерации в кристаллах нитрата и вольфрамата бария выполнена совместно с Гавриловым А.В., Ершковым М.Н., Фединым А.В., сотрудниками Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева. Работы по исследованию параметрической связи ВКР-компонент излучения и комбинационно-параметрической генерации в кристаллах CaCO_3 и $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ выполнены совместно с Шурыгиным А.С., аспирантом Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева. Основные работы выполнены в соавторстве с сотрудниками Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН и Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева, а также в творческом содружестве с зарубежными коллегами из Чешского технического университета (Прага, Чехия), которые принимали участие и оказывали помощь в проведении отдельных исследований. Во всех случаях использования результатов других исследований в диссертации приведены ссылки на источники информации.

Диссертационная работа выполнена в отделе лазерных материалов и фотоники Института общей физики имени А.М. Прохорова РАН. Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке международными грантами МНТЦ № 2022, МНТЦ № 4076 и грантом РФФИ № 13-02-00031-а.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 239 страниц, включая 89 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 154 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Кратко изложены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

Первая глава является обзорной. Рассмотрены известные научные результаты по реализации четырехволновой комбинационно-параметрической генерации в различных комбинационно-активных средах при подаче одной, двух и трех волн на вход нелинейной среды. Обсуждаются вопросы, связанные с различными методами поддержания фазового синхронизма параметрической четырехволновой генерации при ВКР. Приведены известные схемные решения комбинационно-параметрических преобразователей частоты лазерного излучения. Отмечены их достоинства и недостатки. В главе обосновывается

основная цель настоящей работы – поиск новых возможностей осуществления низкопороговой, эффективной и коллинеарной комбинационно-параметрической генерации в комбинационно-активных кристаллах, не требующих дополнительных источников возбуждения и поддержания под действием одночастотной лазерной накачки.

Во второй главе приведены результаты исследований условий возбуждения ВКР в кристаллах в отсутствие параметрической связи не только в предельных случаях стационарного и существенно нестационарного ВКР, а во всех промежуточных случаях, с которыми обычно имеют дело на практике.

В разделе 2.1 на основе существующей теории ВКР теоретически обосновано известное условие порога ВКР для предельных случаев квазистационарного и существенно нестационарного режимов ВКР в различных комбинационно-активных кристаллах при типичных для кристаллических ВКР-лазеров условиях возбуждения.

В приближении медленно меняющихся амплитуд система укороченных уравнений, описывающая попутное ВКР при неистощенной накачке, имеет вид [36,37]

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^*(z,t)}{\partial t} + \Gamma q^*(z,t) &= ik_1 E_S(z,t) E_L^*(t) + F^*(z,t), \\ \frac{\partial E_S(z,t)}{\partial z} &= -ik_2 q^*(z,t) E_L(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, определенные в [37]; $q^*(z,t)$ – медленно меняющаяся комплексная амплитуда колебаний среды; $E_L(t)$ и $E_S(z,t)$ – медленно меняющиеся комплексные амплитуды излучения накачки и стоксова ВКР-излучения соответственно; Γ – коэффициент затухания амплитуды колебаний; z – продольная координата; $t = t - z/u$ – локальное время, бегущее с групповой скоростью света u (различием групповых скоростей $u_{L,S}$ излучения накачки и ВКР-излучения пренебрегаем); $F^*(z,t)$ – затравочная вынуждающая сила колебаний среды, вызывающая спонтанное комбинационное рассеяние света и представляющая собой случайную величину, квадратурные компоненты которой δ -коррелированы в пространстве и времени; верхний индекс * отмечает комплексно сопряженную величину. Приближение (1) справедливо при длине ВКР-среды $L \ll t_L / (u_S^{-1} - u_L^{-1})$, где t_L – длительность лазерного импульса [11,36]. Так, для кристалла $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ при накачке с длиной волны 800 нм и $t_L = 150$ фс имеем $t_L / (u_S^{-1} - u_L^{-1}) = 3.2$ мм [11], а при t_L порядка 10 пс получаем, что L_d составляет десятки сантиметров.

Исходная система уравнений (1) приводится к интегральному уравнению, аналитические решения которого известны [36-38] лишь для предельных случаев очень длинного ($t_L \gg 1/\Gamma$) и очень короткого ($t_L \ll 1/\Gamma$) лазерных импульсов прямоугольной формы. Эти случаи называют стационарным (квазистационарным) и существенно нестационарным режимами ВКР соответственно. Согласно известным решениям процесс ВКР в данных предельных случаях имеет экспоненциальное нарастание $I_S(L) \approx I_S(0)e^G$, где $I_S(0)$ – интенсивность входного (при ВКР-усилении) или эквивалентного затравочного (при ВКР-генерации) ВКР-излучения, $I_S(L)$ – интенсивность ВКР-излучения на выходе ВКР-среды, G – инкремент экспоненциального ВКР-усиления.

В разделе 2.2 производится аналитическое решение задач ВКР-усиления и ВКР-генерации при произвольной длительности прямоугольного импульса накачки. В виду того, что известные решения в обоих предельных случаях являются экспоненциальными функциями, предполагается, что и во всех промежуточных случаях ВКР-усиление является экспоненциальным. Тогда приведение подынтегрального выражения решаемого интегрального уравнения к экспоненциальному виду и разложение показателя экспоненты в ряд Тейлора дает решение для инкремента экспоненциального ВКР-усиления:

$$G = 2\sqrt{2\Gamma t_L G_0} - 2\Gamma t_L + \frac{(\sqrt{2\Gamma t_L G_0} - 2\Gamma t_L)^2}{\sqrt{2\Gamma t_L G_0}} + 2\ln\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\frac{\sqrt{2\Gamma t_L G_0} - 2\Gamma t_L}{\sqrt{2\sqrt{2\Gamma t_L G_0}}}\right), \quad (2)$$

где $G_0 = g I_L L$ – инкремент стационарного ВКР-усиления, g – коэффициент ВКР-усиления, I_L – интенсивность лазерного импульса накачки, L – длина ВКР-взаимодействия; t_L – длительность лазерного импульса накачки. В задаче ВКР-генерации (входное ВКР-излучение отсутствует) также найдено выражение для эквивалентного затравочного сигнала $I_S(0)$, экспоненциально усиливающегося с инкрементом (2). Полученные в настоящей работе аналитические решения для ВКР-усиления и ВКР-генерации справедливы в широком диапазоне длительностей лазерного импульса накачки $\tau_L < 20/\Gamma$ при $G_0 = 30$ (при увеличении G_0 данный диапазон расширяется) и согласуются с известными решениями, справедливыми в предельных случаях очень длинного ($\tau_L \gg 1/\Gamma$) и очень короткого ($\tau_L \ll 1/\Gamma$) лазерных импульсов накачки.

Хотя в отсутствие собственных потерь процесс ВКР-генерации не обладает принципиальным порогом эффекта, но фактически, однако, существует экспериментальный порог, вызванный тем, что на начальном этапе интенсивность ВКР-излучения имеет очень быстрое экспоненциальное нарастание. На пороге ВКР можно полагать $I_S(L) = 0.01I_L$, что удобно с экспериментальной точки зрения, тогда получаем выражение $0.01I_L = I_S(0)e^{G_{th}}$ для определения порогового инкремента ВКР-усиления G_{th} .

На рисунке 1 представлены расчетные зависимости порогового инкремента ВКР-усиления G_{th} от относительной длительности прямоугольного импульса накачки $\Gamma\tau_L$ для кристаллов $Ba(NO_3)_2$ (время дефазировки 26.5 пс), $BaWO_4$ (время дефазировки 6.5 пс) и $KGd(WO_4)_2$ (время дефазировки 2 пс) длиной $L = 1$ см при диаметре пучка накачки $d = 0.11$ мм и длине волны накачки $\lambda_L = 1.06$ мкм.

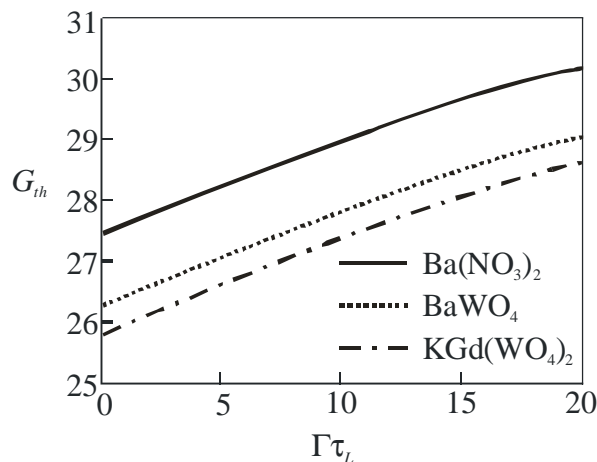


Рисунок 1 – Расчетные зависимости порогового инкремента ВКР-усиления G_{th} от относительной длительности импульса накачки $\Gamma\tau_L$ для кристаллов $Ba(NO_3)_2$, $BaWO_4$ и $KGd(WO_4)_2$ длиной $L = 1$ см при диаметре пучка накачки $d = 0.11$ мм

Видно, что пороговый инкремент ВКР-усиления G_{th} изменяется слабо при многократном изменении как длительности импульса накачки, так и параметров кристаллов (время дефазировки оптических фононов в них изменяется на порядок), и близок к $G_{th} \approx 25-30$, что при экспериментальных исследованиях традиционно считается условием порога ВКР [19]. При $\Gamma\tau_L = 0$ и $\Gamma\tau_L = 20$ зависимости сходятся со значениями, которые были получены из известной теории для предельных случаев существенно нестационарного и квазистационарного ВКР.

В разделе 2.3 представлены аналитические решения для ВКР-усиления и порога ВКР под действием гауссова импульса накачки произвольной длительности. На рисунке 2 графически представлено аналитическое решение для пороговых значений нормированной интенсивности гауссова импульса накачки $g I_L^{th} L$ (сплошная линия) в зависимости от параметра $(2\Gamma\tau_L)^{-1}$. Видно, что найденная теоретическая зависимость $g I_L^{th} L$ от $(2\Gamma\tau_L)^{-1}$ (сплошная линия) близка к линейной (штрихпунктирная линия)

$$g I_L^{th} L \approx 25 + \frac{205}{2\Gamma\tau_L}, \quad (3)$$

сходящейся в пределах $\tau_L \ll 1/\Gamma$ и $\tau_L \gg 1/\Gamma$ с известными теоретическими решениями (пунктирные линии) для существенно нестационарного и квазистационарного режимов ВКР, где I_L^{th} – пороговая интенсивность гауссова лазерного импульса накачки. Поэтому простая формула (3) для порога ВКР оказывается справедливой практически при любой длительности гауссова импульса накачки, что обусловлено не только сходимостью с известными теоретическими решениями в предельных случаях, но и согласием с результатами численного моделирования и физического эксперимента.

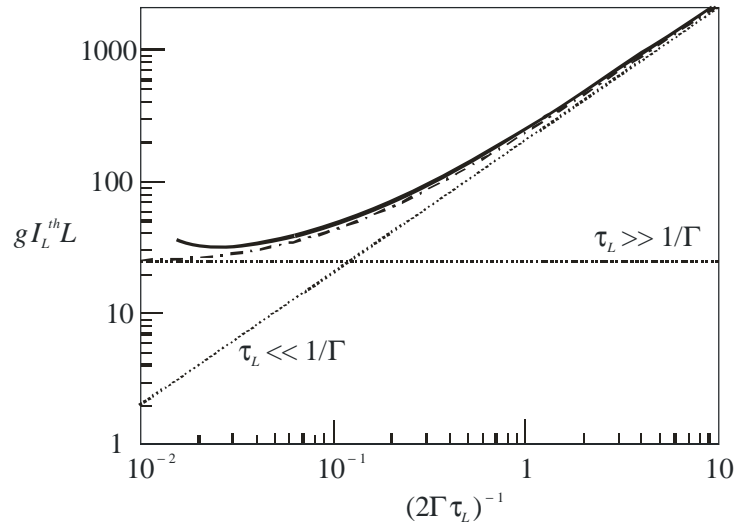


Рисунок 2 – Зависимость пороговых значений нормированной интенсивности гауссова импульса накачки $g I_L^{th} L$ от параметра $(2\Gamma\tau_L)^{-1}$

В разделе 2.4 приведены экспериментальные результаты возбуждения пикосекундного ВКР в различных кристаллах. Показано хорошее согласие формулы аналитической оценки (формула (3)) с экспериментальными результатами определения порога однопроходного пикосекундного ВКР в кристаллах $BaWO_4$ и $SrWO_4$ с известными значениями коэффициента ВКР-усиления, что обосновывает теоретико-экспериментальный экспресс-метод оценки коэффициента ВКР-усиления для новых кристаллов при измерении экспериментального порога пикосекундного ВКР и использовании формулы (3).

В разделе 2.5 рассматривается теоретическая оценка порога внутрирезонаторного квазистационарного ВКР при использовании традиционного порогового условия $g I_L^{th} L_{eff} \approx 25$, где L_{eff} – эффективная длина ВКР-взаимодействия, которую требуется определить. Показано, что использование оптического резонатора эквивалентно увеличению эффективной длины ВКР-взаимодействия благодаря многопроходному развитию ВКР-генерации, поэтому $L_{eff} = L N_{eff}$, где L – длина ВКР-среды, N_{eff} – эффективное число проходов ВКР-излучения по резонатору при условии порога ВКР, определяемое как

$$N_{eff} \approx \left(\frac{L_r}{c t_L} + \frac{1}{25} \ln \frac{1}{T_s \sqrt{R_s}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где R_s – коэффициент отражения выходного зеркала резонатора для ВКР-излучения, T_s – коэффициент пропускания среды ВКР-лазера для ВКР-излучения, определяющий внутренние потери ВКР-лазера, L_r – оптическая длина резонатора ВКР-лазера, c – скорость света в пустоте. Таким образом, для определения порога внутрирезонаторного ВКР теоретически определена зависимость эффективной длины ВКР-взаимодействия не

только от коэффициента потерь резонатора, но и от отношения длительности импульса накачки (τ_L) к времени прохода резонатора (L_r/c).

В разделах 2.6, 2.7 и 2.8 представлены результаты экспериментальных исследований возбуждения внутрирезонаторного наносекундного ВКР при управлении частотной селективностью резонатора и плотностью мощности излучения накачки. В хорошем согласии теоретических оценок порогов каскадного ВКР с полученными экспериментальными результатами показаны возможности повышения энергетических характеристик (эффективности ВКР-преобразования – до 60 % и выходной энергии цуга импульсов ВКР-излучения – до 2 Дж) ВКР-генерации первой стоксовой компоненты и подавления ВКР-генерации второй стоксовой компоненты при управлении добротностью резонатора и плотностью мощности излучения накачки во внешнерезонаторных ВКР-лазерах на кристалле $BaWO_4$ с селективным и неселективным резонаторами, а также в лазере на кристалле $SrMoO_4:Nd^{3+}$ с продольной диодной накачкой и внутрирезонаторным ВКР-самопреобразованием частоты лазерного излучения непосредственно в лазерной среде.

Третья глава посвящена исследованию самоподдерживающейся параметрической четырехволновой связи ВКР-компонент излучения при дисперсионной расстройке фазового синхронизма в кристаллах. Известны возможности коллинейрной комбинационно-параметрической генерации мультиоктавной стокс-антистоксовой гребенки ВКР-компонент излучения в газах [13,15], обладающих малой дисперсией, что актуально для синтеза сверхкоротких импульсов света и метрологии. Однако мультиоктавные гребенки ВКР-компонент в кристаллах [39,40], обладающих сильной дисперсией, в настоящее время генерируются неколлинейрно, что препятствует их применению для указанных целей.

В разделе 3.1 представлена математическая модель нестационарного коллинейрного многоволнового комбинационно-параметрического взаимодействия любых соседних ВКР-компонент излучения при наличии дисперсионных расстройек фазового синхронизма четырехволновых взаимодействий (ЧВВ). В настоящей работе в отличие от известных математических моделей неколлинейрного комбинационно-параметрического взаимодействия [9,41] рассмотрены ЧВВ не только с участием волны накачки и первой стоксовой компоненты, но любых соседних ВКР-компонент. Это необходимо для описания коллинейрного комбинационно-параметрического взаимодействия, где преобладают те ЧВВ, для которых дисперсионная волновая расстройка фазового синхронизма является наименьшей. Благодаря наименьшему различию частот взаимодействующих волн наименьшую дисперсионную волновую расстройку имеют частично вырожденные четырехволновые взаимодействия, в которых участвуют тройки соседних ВКР-компонент. Также в модели произведен учет невырожденных четырехволновых взаимодействий четверок соседних ВКР-компонент. В модели пренебрегается только параметрическая связь ВКР-компонент, не являющихся соседними, для которых частоты взаимодействующих волн сильно различаются, а чувствительность к волновой расстройке такой параметрической связи велика из-за большой дисперсии показателя преломления ВКР-кристаллов.

Получена система связанных укороченных волновых уравнений для каждой (j -й) ВКР-компоненты, подлежащая решению:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_j}{\partial z} + \frac{1}{u_j} \frac{\partial E_j}{\partial t} = -i \frac{p w_j^2}{k_j c^2} N \frac{\partial a}{\partial Q} & \left[E_{j-1} q_{j-1,j}^* + E_{j+1} q_{j,j+1} + E_{j+1} q_{j+1,j+2} e^{i\Delta k_{j+1} z} + \right. \\ & + E_{j-1} q_{j-2,j-1}^* e^{i\Delta k_{j-1} z} + (E_{j-1} q_{j,j+1}^* + E_{j+1} q_{j-1,j}) e^{-i\Delta k_j z} + E_{j+1} q_{j+2,j+3} e^{i\Delta k_{j+1} z} + \\ & \left. + E_{j-1} q_{j-3,j-2}^* e^{i\Delta k_{j-2} z} + E_{j-1} q_{j+1,j+2}^* e^{-i\Delta k_j z} + E_{j+1} q_{j-2,j-1}^* e^{-i\Delta k_{j-1} z} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial q_{j,j+1}}{\partial t} + \Gamma q_{j,j+1} = -\frac{i}{4m\Omega} \frac{\partial a}{\partial Q} E_j E_{j+1}^*, \quad (6)$$

где E_j – медленно меняющаяся комплексная амплитуда j -й ВКР-компоненты излучения; ω_j , k_j и u_j – ее частота, волновое число и групповая скорость; $q_{j,j+1}$ – медленно меняющаяся комплексная амплитуда колебания среды, возбуждаемого волнами E_j и E_{j+1} ; m и N – эффективная масса и концентрация колеблющихся частиц; $\frac{\partial a}{\partial Q}$ – коэффициент

изменения поляризуемости среды; Γ – коэффициент затухания амплитуды колебаний; Ω – центральная частота колебаний. В квадратных скобках уравнений (5) учтены все слагаемые, удовлетворяющие закону сохранения энергии при взаимодействии j -й ВКР-компоненты излучения со всеми соседними ВКР-компонентами не только в двухфотонном процессе ВКР, но и в процессах частично вырожденных ЧВВ троек соседних ВКР-компонент, имеющих волновые расстройки Δk_j , и невырожденных ЧВВ четверок соседних ВКР-компонент, имеющих волновые расстройки ΔK_j .

В разделе 3.2 определены дисперсионные волновые расстройки Δk_j и ΔK_j :

$$\Delta k_j = (n_{j-1} - 2n_j + n_{j+1}) 2p l_j^{-1} + (n_{j-1} - n_{j+1}) 2pn_R, \quad (7)$$

$$\Delta K_j = (n_{j-1} - n_j - n_{j+1} + n_{j+2}) 2p l_j^{-1} + (n_{j-1} + n_{j+1} - 2n_{j+2}) 2pn_R, \quad (8)$$

где λ_j и n_j – длина волны и показатель преломления j -й ВКР-компоненты излучения; $pn_R = \Omega/2pc$ – комбинационный сдвиг частоты, измеряемый в см^{-1} . На примере комбинационно-активного кристалла CaWO_4 с известными комбинационными и дисперсионными характеристиками рассчитаны теоретические зависимости, показывающие, что на длинах волн излучения, близких к длине волны нулевой дисперсии, волновые расстройки близки к нулю, а при удалении от длины волны нулевой дисперсии волновые расстройки возрастают по абсолютной величине, но наименьшие значения имеют волновые расстройки Δk_j , учет которых необходим в первую очередь по сравнению с волновыми расстройками ΔK_j , которые в 2 и более раз выше ($\Delta K_j \approx \Delta k_j + \Delta k_{j+1}$).

В разделе 3.3 приведено аналитическое решение для задачи каскадного стационарного ВКР с произвольным числом генерируемых ВКР-компонент в отсутствие их параметрической связи и определены пороги каскадной ВКР-генерации любой стоксовой ВКР-компоненты с учетом спектральной зависимости коэффициента ВКР-усиления. Расчет для комбинационно-активного кристалла BaWO_4 с известной спектральной зависимостью коэффициента ВКР-усиления показал, что пороги каскадной ВКР-генерации второй, третьей и четвертой стоксовых ВКР-компонент излучения соответственно в 2.5, 4.4 и 7 раз выше порога ВКР-генерации первой стоксовой компоненты.

В разделе 3.4 представлены аналитические решения задачи стационарного ВКР при учете частично вырожденной четырехволновой параметрической связи, и рассмотрено влияние параметрической связи на пороги генерации различных ВКР-компонент. Показано принципиальное различие процессов комбинационно-параметрической генерации антистоксовых и высших стоксовых ВКР-компонент излучения. В отличие от известных решений [6,7] представленные аналитические решения учитывают обратное влияние параметрически генерируемой компоненты на волну накачки, что обеспечивает более точное определение порога генерации как в случае генерации первой антистоксовой компоненты, так и в случае генерации второй стоксовой компоненты. Последнее ранее осуществлялось только численными методами [8].

Из аналитического решения, учитывающего стокс-антистоксову параметрическую связь, следует, что уменьшение волновой расстройки стокс-антистоксовой параметрической связи Δk_0 приводит к повышению пороговой интенсивности излучения накачки и устремлению ее в бесконечность при выполнении фазового синхронизма ($\Delta k_0 = 0$), но интенсивность антистоксовой волны при этом увеличивается, приближаясь к интенсивности стоксовой волны. Влияние стокс-антистоксовой параметрической связи на порог ВКР происходит в относительно узком диапазоне произведения волновой

расстройки Δk_0 на длину ВКР-взаимодействия L , составляющем $0 < \Delta k_0 L < 50$. При увеличении параметра волновой расстройки $\Delta k_0 L$ антистоксова генерация ослабляется по сравнению со стоксовой генерацией, и при $\Delta k_0 L > 50$ антистоксовой генерацией можно пренебречь, а порог ВКР снижается к наименьшему значению $g I_L^{th} L \approx 25$, как в отсутствие параметрической связи.

Найденное аналитическое решение для припороговой комбинационно-параметрической генерации первой и второй стоксовых ВКР-компонент (без участия антистоксовых компонент) показало, что параметрическая связь излучения накачки с первой и второй стоксовыми ВКР-компонентами приводит к снижению порога генерации второй стоксовой компоненты по сравнению со случаем отсутствия параметрической связи. Так, расчет для кристалла $BaWO_4$ показал что, если в отсутствие параметрической связи ($\Delta k_1 \rightarrow \infty$) порог каскадной ВКР-генерации второй стоксовой компоненты в 2.5 раза выше, чем для первой стоксовой компоненты, то при поддержании фазового синхронизма параметрической связи ($\Delta k_1 = 0$) порог генерации второй стоксовой компоненты оказывается лишь в 1.12 раза выше порога ВКР-генерации первой стоксовой компоненты.

Численное моделирование стационарной комбинационно-параметрической генерации многих ВКР-компонент показало, что влияние параметрической связи стоксовых компонент на пороги ВКР-генерации происходит в более широком (на порядок) диапазоне значений параметра волновой расстройки $\Delta k_{1,2,3}L$ – от нуля до 400, чем в случае связи с антистоксовой волной, но при этом параметрическая связь наоборот снижает пороги ВКР-преобразования в отличие от случая ЧВВ-связи с антистоксовой волной.

В разделе 3.5 приведено сравнительное экспериментальное исследование многоволновой ВКР-генерации в кристаллах $Ba(NO_3)_2$ и $BaWO_4$ при одинаковой наносекундной лазерной накачке с длиной волны 1.064 мкм.

На рисунке 3 представлены экспериментальные зависимости средней мощности (P_{av}) и энергии (W_i) отдельных импульсов первой (1), второй (2) и третьей (3) стоксовых ВКР-компонент излучения от средней мощности (P_p) и энергии (W_p) отдельных импульсов излучения накачки при ВКР в кристаллах $Ba(NO_3)_2$ и $BaWO_4$.

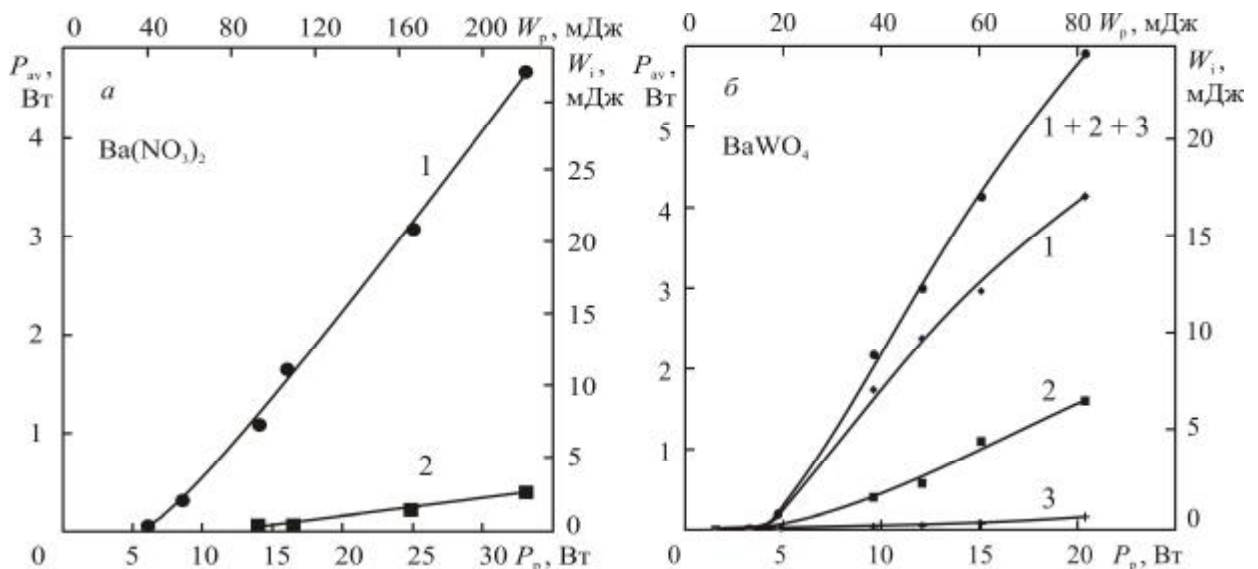


Рисунок 3 – Экспериментальные результаты по ВКР-генерации первой (1), второй (2) и третьей (3) стоксовых компонент излучения в кристаллах $Ba(NO_3)_2$ (а) и $BaWO_4$ (б)

Из графиков видно, что в кристалле $Ba(NO_3)_2$ пороги генерации стоксовых ВКР-компонент сильно различаются, что указывает на каскадный характер процесса. Напротив, в кристалле $BaWO_4$, имеющем меньшую дисперсию в инфракрасном диапазоне, пороги генерации ВКР-компонент очень близки друг к другу и ниже, чем в кристалле $Ba(NO_3)_2$, что можно объяснить сильной параметрической связью ВКР-

компонент излучения. При этом в первом кристалле эффективно генерируются только первые две стоксовы ВКР-компоненты излучения, а во втором – три (и с большей мощностью, чем в первом случае). Последняя из стоксовых компонент с длиной волны $\lambda_3 = 1.51$ мкм соответствует безопасному для глаз диапазону длин волн, важному с практической точки зрения.

В разделе 3.6 представлено сравнительное математическое моделирование самоподдерживающейся осевой комбинационно-параметрической генерации многих частотных компонент излучения при нестационарном пикосекундном ВКР в кристаллах CaWO_4 , SrWO_4 и BaWO_4 . Показано, что при каскадной ВКР-генерации высших стоксовых компонент (при подавленной параметрической связи, когда длина ВКР-кристалла велика) в нестационарном режиме значения превышения порога генерации высших (второй и третьей) стоксовых компонент над порогом генерации первой стоксовой компоненты оказываются существенно больше ($I_L^{th2} / I_L^{th1} \approx 4$ и $I_L^{th3} / I_L^{th1} \approx 7$ для кристалла BaWO_4), чем при стационарном каскадном ВКР ($I_L^{th2} / I_L^{th1} = 2.5$ и $I_L^{th3} / I_L^{th1} = 4.4$ для кристалла BaWO_4). Это обусловлено уменьшением ВКР-усиления в нестационарном режиме из-за сокращения длительности импульса излучения при увеличении порядка генерируемой стоксовой ВКР-компоненты. Следовательно, обеспечение параметрической четырехволновой связи ВКР-компонент, реализуемое при уменьшении длины ВКР-кристалла и снижающее пороги генерации высших стоксовых волн, оказывается весьма полезным именно для случая нестационарного ВКР при накачке сверхкороткими лазерными импульсами.

В разделе 3.7 представлены экспериментальные результаты по многоволновой генерации многих ВКР-компонент в различных комбинационно-активных кристаллах (BaWO_4 , SrWO_4 , PbMoO_4 , $\text{PbMo}_{0.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_4$, $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$) при пикосекундной накачке ВКР, демонстрирующие снижение порогов ВКР-генерации высших стоксовых ВКР-компонент благодаря самоподдерживающимся четырехволновым взаимодействиям при малых длинах кристаллов в согласии с результатами математического моделирования.

Рисунок 4 (графики слева) демонстрирует зарегистрированные спектры ВКР-излучения в кристалле SrWO_4 длиной 4.7 см (рис. 4,а), в кристалле BaWO_4 длиной 1.2 см (рис. 4,б) и в кристалле BaWO_4 длиной 0.8 см (рис. 4,в), соответствующие порогу генерации третьей стоксовой ВКР-компоненты излучения в данных кристаллах. Справа для сравнения показаны результаты моделирования кинетики генерации.

Из рисунка видно, что при уменьшении длины кристалла порог генерации третьей стоксовой компоненты наблюдается при меньших интенсивностях предыдущих стоксовых ВКР-компонент, что качественно согласуется с результатами моделирования и объясняется повышением влияния параметрической связи при уменьшении длины ВКР-кристалла.

Также нужно заметить, что порог генерации третьей стоксовой компоненты в кристалле малой длины (1.2 см) оказался заметно ниже, чем в кристалле в 4 раза большей длины (4.7 см) – $W_L^{th3} = 1.06$ мДж против $W_L^{th3} = 1.44$ мДж. Результат снижения порога генерации при сокращении длины ВКР-кристалла демонстрирует практическую значимость обеспечения параметрических четырехволновых взаимодействий ВКР-компонент излучения для генерации высших стоксовых ВКР-компонент.

В разделе 3.8 представлены результаты исследования оптимальных условий коллинеарной комбинационно-параметрической генерации мультиоктавной стокс-антистоксовой гребенки оптических частот при нестационарном ВКР в кристаллах, что было экспериментально реализовано при пикосекундной накачке кристаллов CaCO_3 различной длины. Данная задача актуальна для синтеза сверхкоротких импульсов света и метрологии.

В согласии результатов математического моделирования и экспериментальных исследований установлено, что для эффективной коллинеарной генерации многих

антистоксовых компонент параметр волновой расстройки $\Delta k_0 \cdot L$ должен иметь значение около 15 при длительности импульса накачки в 5-20 раз больше времени дефазировки оптических фононов, что обеспечивает низкопороговую коллинеарную генерацию наибольшего числа антистоксовых и стоксовых ВКР-компонент излучения при оптимальной длине кристалла $L_{\text{opt}} \approx 15/\Delta k_0$ под действием одночастотной лазерной накачки. В согласии с расчетом экспериментальные исследования в зависимости от длины ВКР-кристалла при пикосекундной накачке позволили определить оптимальную длину кристалла CaCO_3 , которая составила $L_{\text{opt}} = 9\text{-}13$ мм при малой дисперсионной волновой расстройке $\Delta k_0 = 17 \text{ см}^{-1}$ на длине волны накачки 1.064 мкм и $L_{\text{opt}} = 3\text{-}9$ мм при большой дисперсионной волновой расстройке $\Delta k_0 = 59 \text{ см}^{-1}$ на длине волны накачки 0.532 мкм, что обеспечило коллинеарную генерацию наиболее широкой стокс-антистоксовой частотной гребенки ВКР-компонент излучения.

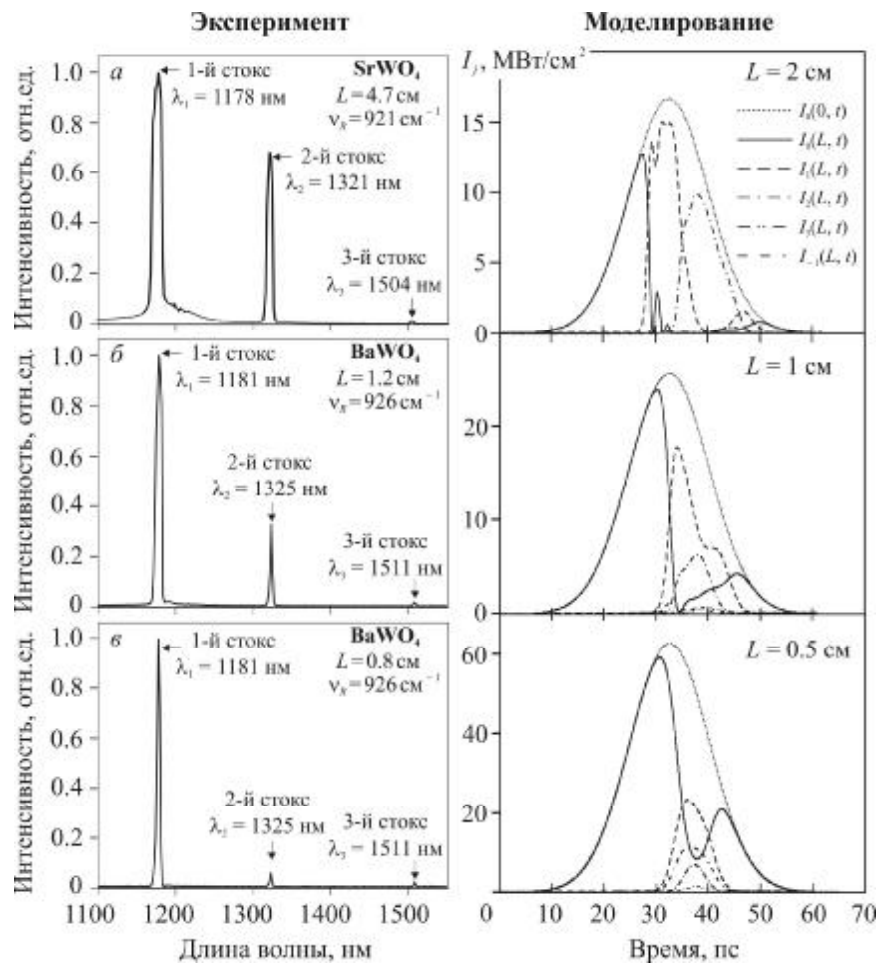


Рисунок 4 – Спектры (слева) ВКР-излучения, соответствующие порогу генерации третьей стоксовой ВКР-компоненты излучения. Справа для сравнения показаны результаты моделирования кинетики генерации

Рисунок 5 показывает спектры коллинеарной комбинационно-параметрической генерации в кристалле CaCO_3 длиной 33 мм (рис. 5,а) и 13 мм (рис. 5,б) при накачке лазерным импульсом длительностью 20 пс, энергией 90 мкДж и длиной волны 1.064 мкм.

Можно видеть, что использование кристалла с оптимальной длиной ($L_{\text{opt}} = 13$ мм) позволяет расширить гребенку генерируемых частот в антистоксову область и получить коллинеарную генерацию стокс-антистоксовой гребенки оптических частот шириной более октавы.

Рисунок 6 демонстрирует фотографии коллинеарно генерирующихся ВКР-компонент излучения, разделенных с помощью дисперсионных призм, при накачке лазерным импульсом длительностью 20 пс и длиной волны 0.532 мкм.

Из рисунка 6 видно, что в кристаллах с малой длиной 3.3 и 9.3 мм, близкой к оптимальной ($L_{opt} = 3-9$ мм), при малой энергии импульса накачки 50 мкДж генерируются не менее двух как стоксовых, так и антистоксовых ВКР-компонент, а в более длинном кристалле (33 мм) даже при наибольшей энергии накачки 1100 мкДж, соответствующей оптическому пробую кристалла, генерируется не более одной антистоксовой компоненты, что вызвано дисперсионной расстройкой коллинеарной антистоксовой генерации. Это демонстрирует важность использования оптимальной длины кристалла для коллинеарной генерации наиболее широкой стокс-антистоксовой частотной гребенки ВКР-компонент.

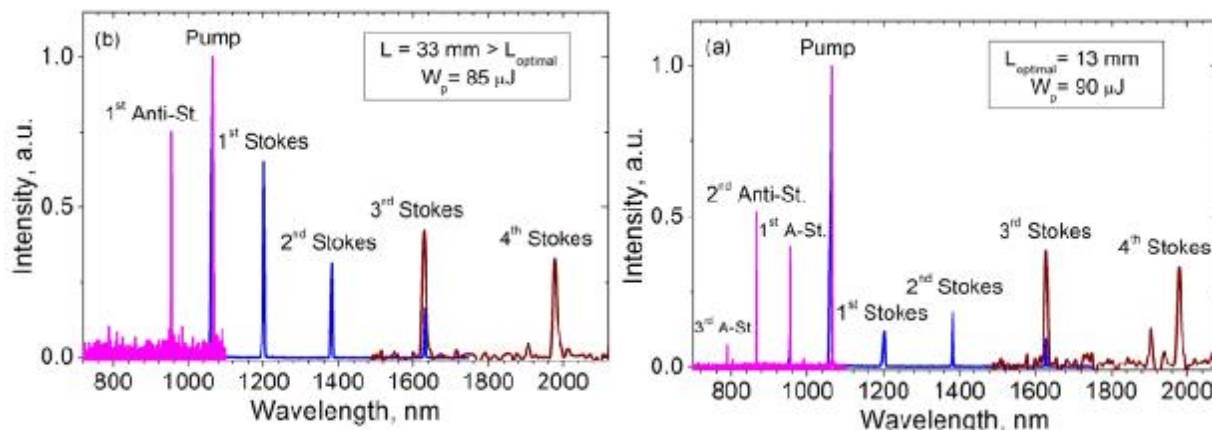


Рисунок 5 – Спектры излучения в кристалле CaCO_3 при накачке с $\lambda_0 = 1.064$ мкм

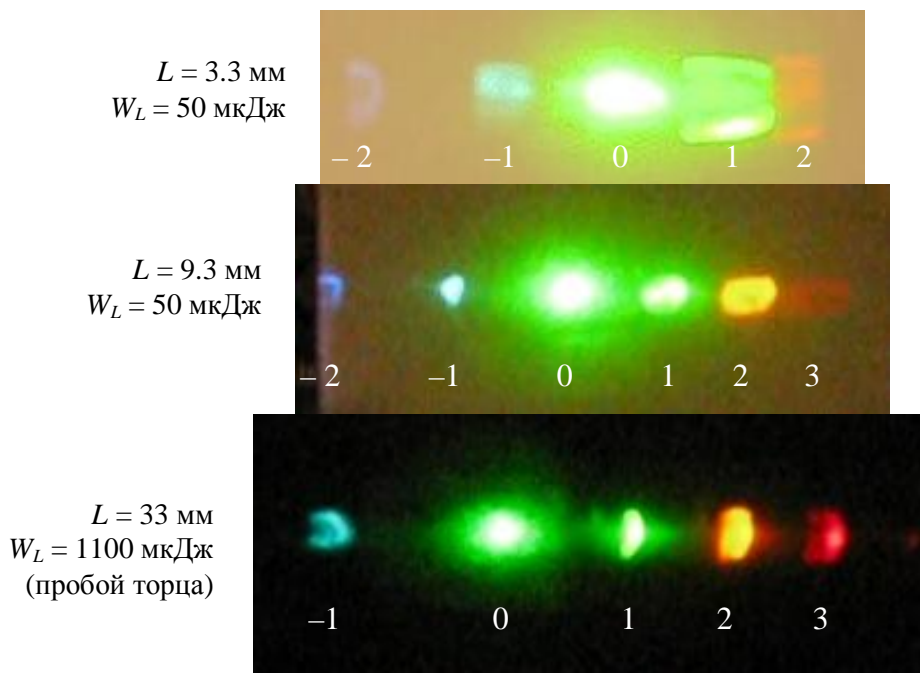


Рисунок 6 – Фотографии разделенных ВКР-компонент при накачке с $\lambda_0 = 0.532$ мкм

Четвертая глава посвящена исследованию поддержания фазового синхронизма коллинеарной комбинационно-параметрической генерации стоксовых и антистоксовых компонент излучения при ВКР в двулучепреломляющих кристаллах под действием одночастотной лазерной накачки.

В разделе 4.1 предложено поддержание фазового синхронизма комбинационно-параметрической генерации ортогонально поляризованных ВКР-компонент излучения в двулучепреломляющих комбинационно-активных кристаллах, при котором обеспечивается коллинеарная генерация избранной антистоксовой или высшей стоксовой компоненты излучения под действием продольной одночастотной лазерной накачки в отличие от известных комбинационно-параметрических преобразователей с неколлинеарной [14,17,18] и бигармонической (двухчастотной) накачкой [10,12,16]. При

этом для обеспечения одночастотной лазерной накачки предлагается использование частично вырожденного ЧВВ при генерации требуемой для ЧВВ второй волны накачки посредством ВКР, а для поддержания фазового синхронизма комбинационно-параметрического ЧВВ предлагается использование ортогонально поляризованных ВКР-компонент излучения, распространяющихся коллинеарно в определенном направлении двулучепреломляющего ВКР-активного кристалла.

В разделах 4.2 и 4.3 при использовании известных данных по дисперсии показателя преломления (формулы Селлмейера) и характеристик комбинационного рассеяния света в различных двулучепреломляющих ВКР-активных кристаллах исследованы дисперсионные волновые расстройки и произведен расчет направлений (углов) синхронизма в кристаллах CaCO_3 , BaWO_4 , SrWO_4 , CaWO_4 и SrMoO_4 .

Условие фазового синхронизма частично вырожденного ЧВВ j -го порядка в двулучепреломляющем кристалле записывается для волновых векторов ортогонально поляризованных (о или е) взаимодействующих волн:

$$\mathbf{k}_{j-1}^{o,e} - \mathbf{k}_j^{o,e} = \mathbf{k}_j^{o,e} - \mathbf{k}_{j+1}^{o,e}. \quad (9)$$

где j – номер ВКР-компоненты излучения, являющейся волной ЧВВ-накачки ($j < 0$ – антистоксова волна, $j > 0$ – стоксова волна, $j = 0$ – волна ВКР-накачки); $j - 1$ и $j + 1$ – номера ВКР-компонент излучения, являющихся соответственно сигнальной и холостой волнами. Определенное сочетание верхних индексов (о или е) для четырех волновых векторов в выражении (9) определяет тип синхронизма ЧВВ. Для частично вырожденного ЧВВ существует пять типов синхронизма [42] – I (еooo, оeee), II (ооое, ееео), III (ееоо, ооee), тип IV (еоое, оeeо) и V (еоee, оeeо). При $j = 0$ имеем процесс генерации антистоксовой волны, а при $j = 1$ – процесс генерации второй стоксовой волны.

На рисунке 7 представлены расчетные зависимости углов Θ_{PM} синхронизма различных типов (I-III) процессов четырехволновой генерации антистоксовой и второй стоксовой ВКР-компонент излучения от длины волны ВКР-накачки λ_0 для ВКР-кристаллов BaWO_4 , SrWO_4 и CaCO_3 в видимом диапазоне спектра.

Из рисунка 7 видно, что при переходе от кристалла BaWO_4 с малым двулучепреломлением ($n_o - n_e = 0.002$) к кристаллу CaCO_3 с большим двулучепреломлением ($n_o - n_e = 0.173$) величины углов синхронизма уменьшаются. Так в кристалле BaWO_4 существует синхронизм типов I (еooo) и II (ооое) с относительно большими углами синхронизма, но не существует синхронизма типа III (ееоо) из-за малости двулучепреломления данного кристалла. Для кристалла SrWO_4 , имеющего в 5 раз большее двулучепреломление, углы синхронизма типа I и II снижаются, и появляется синхронизм типа III для генерации антистоксовой и второй стоксовой компонент с относительно большими углами синхронизма. В кристалле CaCO_3 с очень большим двулучепреломлением наблюдаются все рассмотренные типы синхронизма четырехволновой генерации. Все углы синхронизма оказываются очень малы (близки к нулю) и очень слабо изменяются в зависимости от длины волны ВКР-накачки в рассматриваемом видимом диапазоне спектра.

В разделе 4.4 произведен учет анизотропии комбинационного рассеяния света для одноосных кристаллов класса шеелитов и исландского шпата [4]. Рассмотрена зависимость коэффициента нелинейной четырехволновой связи от направления распространения света в кристалле.

Показано, что фазовый синхронизм ЧВВ имеет конечную угловую ширину, которая оказывается наибольшей при $\Theta_{PM} \rightarrow 90^\circ$. Это хорошо известно из нелинейной оптики сред с квадратичной нелинейностью [43], где подобный 90° -ный синхронизм трехволновых взаимодействий является некритичным к угловой расстройке. Еще одним преимуществом 90° -ного синхронизма является отсутствие сноса необыкновенных волн, что обеспечивает наибольшую эффективную длину коллинеарного нелинейного взаимодействия [43]. Поэтому для ВКР-кристаллов простых вольфраматов и молибдатов, вырезанных в таком традиционном направлении ($\Theta = 90^\circ$), имеет интерес нахождение длины волны

возбуждения λ_0 , обеспечивающей 90° -ный ($\Theta_{PM} = 90^\circ$) синхронизм типа III (наиболее эффективный при учете тензора рассеяния, нечувствительности к угловой расстройке и отсутствии сноса необыкновенных волн) для низкороговой ЧВВ-генерации антистоксовой или высшей стоксовой компоненты излучения при ВКР. Особый интерес представляет поиск ВКР-кристаллов, для которых длина волны λ_0 возбуждения 90° -ного синхронизма ЧВВ типа III совпадает с длинами волн неодимового лазера 1.06 и 1.34 мкм. Таким кристаллом является кристалл SrMoO_4 , который может быть активирован ионами неодима для обеспечения комбинационно-параметрического самопреобразования лазерного излучения непосредственно в одной и той же лазерной среде.

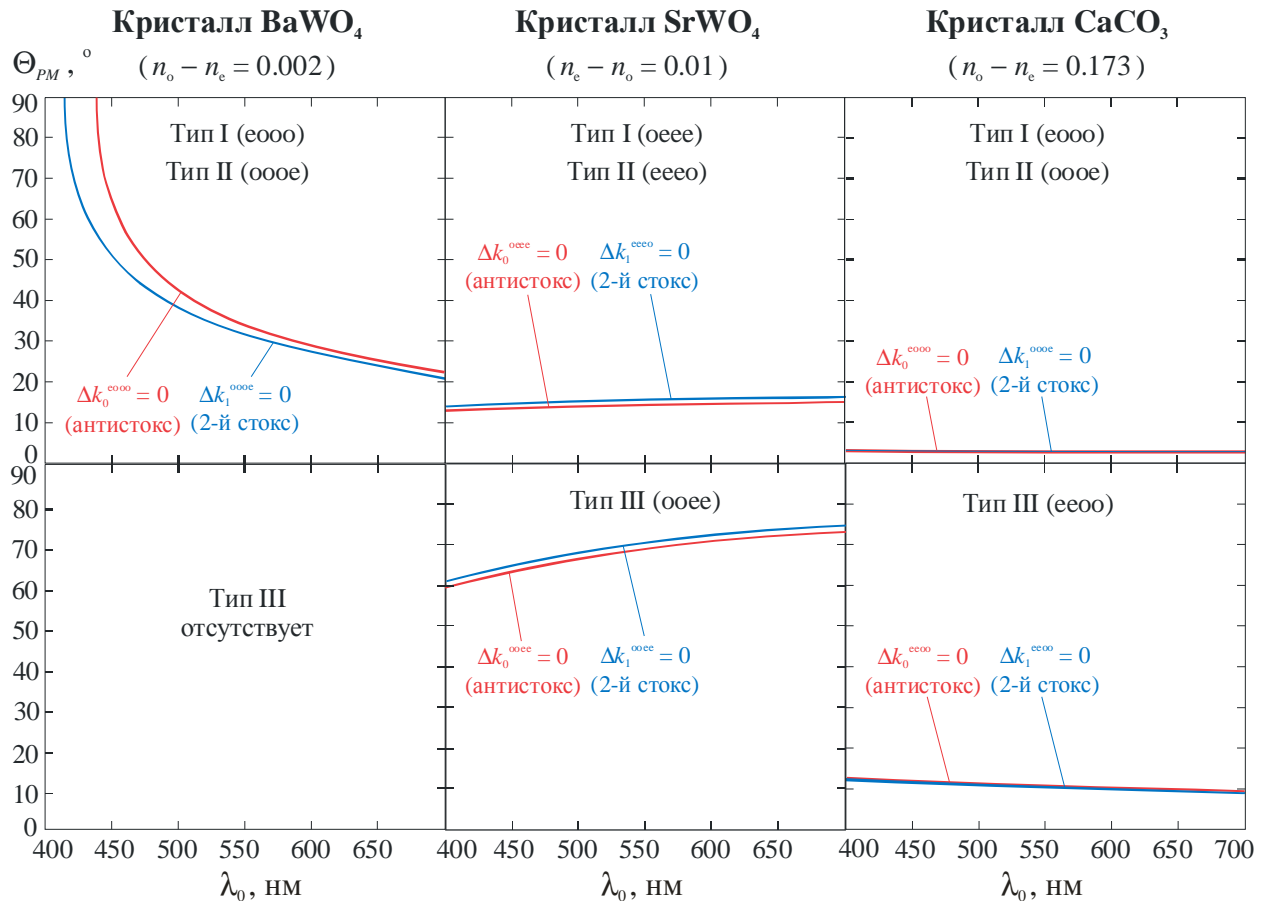


Рисунок 7 – Зависимости углов синхронизма Θ_{PM} различных типов (I-III) процессов коллинеарной комбинационно-параметрической генерации антистоксовой и второй стоксовой ВКР-компонент излучения от длины волны ВКР-накачки λ_0 для различных ВКР-кристаллов в видимом диапазоне спектра

В разделах 4.5 и 4.6 описываются расчет и экспериментальная реализация поддержания синхронизма ЧВВ при внутррезонаторном ВКР в кристалле CaCO_3 под действием одночастотной продольной лазерной накачки. Использовался кристалл CaCO_3 , помещенный в неселективный оптический резонатор с высокоотражающими зеркалами, при продольной накачке второй гармоникой (532 нм) ИАГ: Nd^{3+} -лазера. В согласии с расчетом при определенных углах поворота кристалла CaCO_3 , соответствующих различным типам синхронизма ЧВВ, впервые осуществлена низкороговая коллинеарная комбинационно-параметрическая генерация второй стоксовой ВКР-компоненты под действием одночастотной продольной лазерной накачки. Представленный метод выгодно отличается от метода Джордмэйна и Кайзера [43] тем, что не требует для поддержания синхронизма ЧВВ при ВКР дополнительной (пробной) волны на входе ВКР-среды.

На рисунке 8 представлена экспериментальная зависимость интенсивности второй стоксовой ВКР-компоненты излучения от угла падения света на ВКР-кристалл CaCO_3 при

энергии импульса возбуждающего лазерного излучения 11 мДж, в 1.5 раза превышающей пороговое значение для генерации первой стоксовой ВКР-компоненты излучения.

Видно, что при углах падения на ВКР-кристалл $\alpha \approx 4.8^\circ$ и $\alpha \approx 18.2^\circ$ наблюдаются узкие пики интенсивности генерации второй стоксовой ВКР-компоненты излучения, совпадающие с расчетными углами для различных типов синхронизма ЧВВ.

Несмотря на ожидание более интенсивной генерации в синхронизме типа III, интенсивность пика при $\alpha \approx 18.2^\circ$, соответствующего синхронизму типа III, оказалась относительно низкой, что объясняется сильным сносом пучков необыкновенных волн, проявляющемся при больших отклонениях направления распространения света от кристаллооптических осей c ($\Theta = 0$) и a ($\Theta = 90^\circ$) [43]. Это вносит дополнительное требование компенсации вредного эффекта сноса для повышения длины эффективного взаимодействия в кристаллах с большим двулучепреломлением.

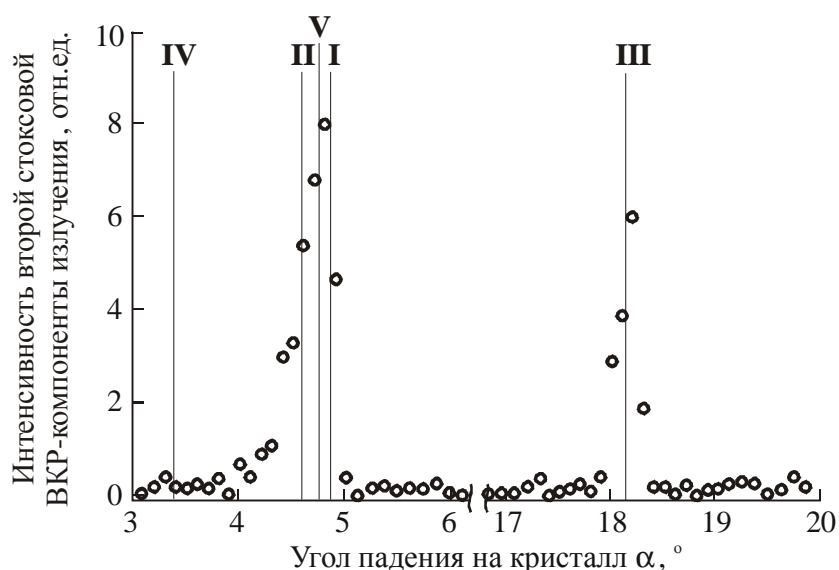


Рисунок 8 – Экспериментальная зависимость интенсивности второй стоксовой ВКР-компоненты излучения от угла падения света на ВКР-кристалл CaCO_3 : точки – результаты измерений; вертикальные линии – расчет; I-V – типы синхронизма

В разделе 4.7 приводится аналитическое исследование угловой ширины синхронизма комбинационно-параметрического взаимодействия в кристаллах. Установлено, что низкая (расчет предсказывает эффективность до 40 %) эффективность генерации (порядка 1 %) известных кристаллических комбинационно-параметрических преобразователей [16-18] объясняется узкой угловой шириной синхронизма по сравнению с расходимостью пучков излучения. Проведенный анализ показал, что при комбинационно-параметрическом четырехволновом взаимодействии ортогонально поляризованных ВКР-компонент излучения возможна реализация не критичного к угловой расстройке фазового синхронизма, если векторы Умова-Пойнтинга для излучения накачки и параметрически генерируемой компоненты являются коллинеарными, т.е. компенсируется снос для пучков необыкновенных волн. Подобный фазовый синхронизм, называемый в литературе касательным (tangential), ранее был исследован только в нелинейной оптике сред с квадратичной нелинейностью для трехволновых взаимодействий [45-47].

В разделе 4.8 представлено экспериментальное исследование возможности увеличения эффективности комбинационно-параметрической генерации не только при поддержании условия фазового синхронизма антистоксова процесса ЧВВ, но и при компенсации сноса пучков необыкновенных волн. Схема эксперимента показана на рис. 9.

В представленной схеме впервые экспериментально реализовано повышение эффективности антистоксова (503 нм) преобразования из пробной волны (532 нм) до значения 30 %, близкого к теоретическому пределу (около 40 %), при полной оптической

эффективности антистоксовой генерации до 3.5 % в пикосекундном комбинационно-параметрическом лазере на кристалле кальцита, возбуждаемом одночастотным лазерным источником накачки с длиной волны 532 нм.

В разделе 4.9 приводится сравнительное экспериментальное исследование каскадной и четырехволновой ВКР-генерации второй стоксовой компоненты излучения $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ -лазера с продольной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности кристаллом ИАГ: Cr^{4+} . Использование не критичного к угловой расстройке 90° -ного синхронизма ЧВВ в кристалле $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ позволило впервые экспериментально реализовать эффект укорочения лазерных импульсов при комбинационно-параметрическом самопреобразовании лазерного излучения непосредственно в активированной ВКР-лазерной среде.

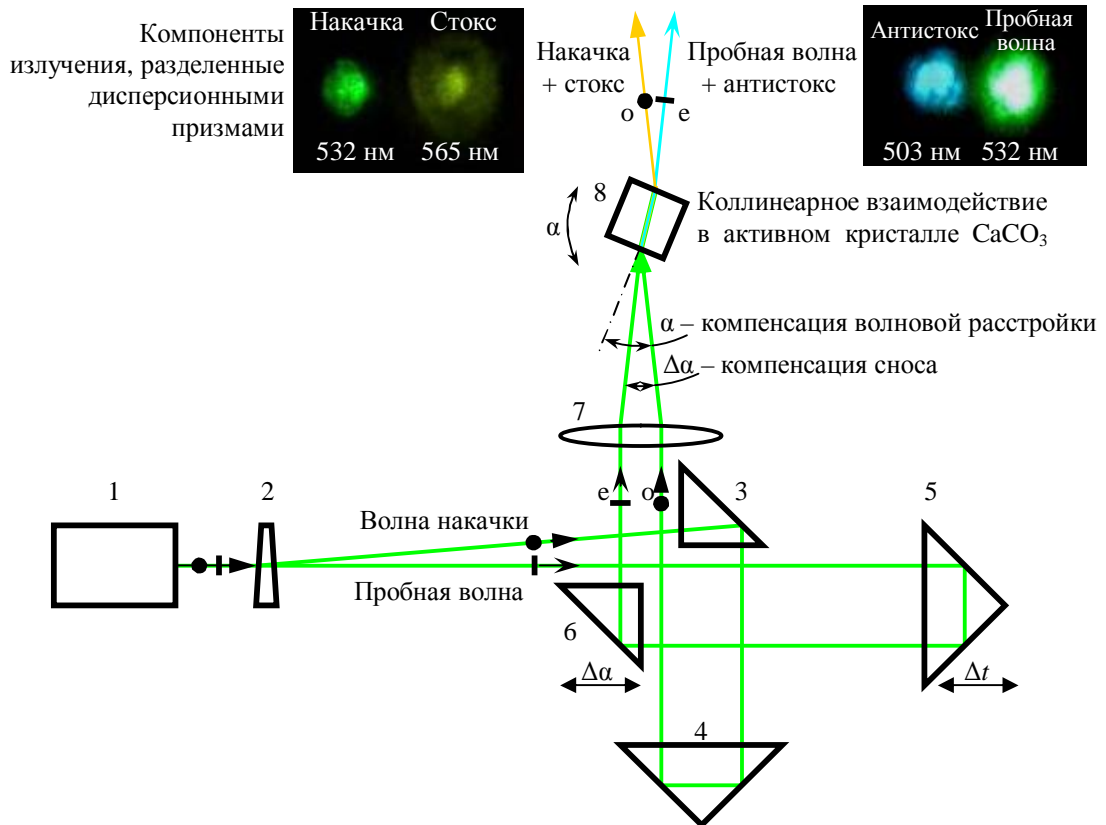


Рисунок 9 – Оптическая схема комбинационно-параметрического лазера: 1 – лазерный источник накачки; 2 – поляризатор; 3-6 – призмы полного внутреннего отражения; 7 – широкоапертурный фокусирующий объектив; 8 – активный кристалл комбинационно-параметрического лазера

На рисунке 10 представлены характерные осциллограммы генерации $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ -лазера с коэффициентами отражения выходного зеркала для второй стоксовой компоненты $R_{1300} = 90\%$ (рис. 10,а) и $R_{1300} = 20\%$ (рис. 10,б).

Видно, что при высоком отражении выходного зеркала $R_{1300} = 90\%$ (рис. 10,а) наблюдается обыкновенная каскадная ВКР-генерация [2] сначала основного лазерного излучения, затем первой стоксовой ВКР-компоненты и наконец второй стоксовой ВКР-компоненты, но использование выходного зеркала с низким отражением $R_{1300} = 20\%$ обеспечивало предотвращение каскадной ВКР-генерации второй стоксовой компоненты, поэтому осуществлялась (рис. 10,б) ее комбинационно-параметрическая генерация, происходящая только в кратковременной области перекрытия истощенного импульса основного лазерного излучения и импульса первой стоксовой компоненты, генерируемой путем ВКР. Это приводило к генерации укороченного импульса второй стоксовой компоненты длительностью 280 пс.

Усовершенствование системы диодной накачки позволило увеличить энергию укороченного импульса второй стоксовой компоненты до 1 мкДж при сохранении его длительности (300 пс). При этом энергия импульса основного лазерного излучения составила 8 мкДж, а первой стоксовой компоненты – 56 мкДж.

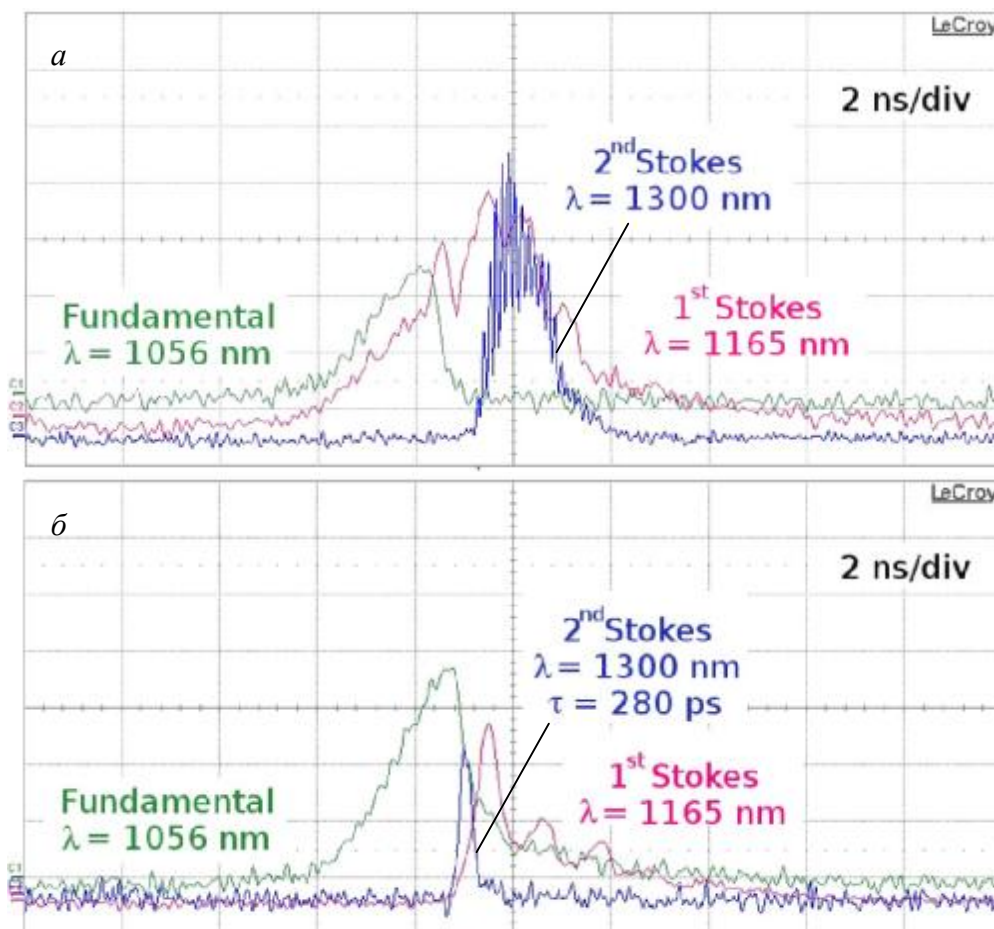


Рисунок 10 – Характерные осциллограммы (развертка – 2 нс/дел.) генерации SrMoO₄:Nd³⁺-лазера с коэффициентами отражения выходного зеркала для второй стоксовой компоненты $R_{1300} = 90\%$ (а) и $R_{1300} = 20\%$ (б): С1 – основное лазерное излучение (1056 нм), С2 и С3 – первая (1165 нм) и вторая (1300 нм) стоксовы компоненты ВКР-излучения

В разделе 4.10 аналитически исследован механизм укорочения импульсов при сопоставлении с экспериментальным исследованием и сформулирован новый метод укорочения импульсов излучения комбинационно-параметрического лазера. Показано, что экспериментально реализованное укорочение длительности импульса второй стоксовой компоненты на порядок до 280 пс обусловлено ВКР-истощением наносекундного импульса основного лазерного излучения при его внутриврезонаторном ВКР-преобразовании в первую стоксову компоненту. Аналитическая оценка длительности укороченного импульса параметрически генерируемой второй стоксовой ВКР-компоненты, оцениваемая как длительность этапа ВКР-истощения основного лазерного излучения, составила около 250 пс, что имеет согласие с экспериментальным значением (280 пс).

В разделе 4.11 приведены результаты прогностического математического моделирования коллинеарной внутриврезонаторной комбинационно-параметрической генерации, устанавливающие оптимальные условия для укорочения генерируемых импульсов при любой конфигурации комбинационно-параметрического преобразователя лазерного излучения. Найдены наилучшие условия не только для количественного укорочения, но и для увеличения качества укороченного импульса излучения. Так, отношение длительности импульса лазерного излучения накачки ко

времени прохода резонатора должно быть меньше 30, а интенсивность входного лазерного импульса внутрирезонаторной накачки должна быть примерно в 5 раз меньше порогового значения для однопроходной внешней накачки ВКР-лазера.

В разделе 4.12 предложено и осуществлено выделение одиночного интенсивного пикосекундного импульса из цуга пикосекундных лазерных импульсов в режиме самосинхронизации мод для параметрически генерируемой антистоксовой компоненты излучения (1.168 мкм) в комбинационно-параметрическом лазере на лазерном кристалле ИАГ:Nd³⁺ и ВКР-кристалле CaCO₃ в общем резонаторе. Генерация основного лазерного излучения в кристалле ИАГ:Nd³⁺ осуществлялась на длине волны 1338 нм, что обеспечивало коллинеарный фазовый синхронизм стокс-антистоксова комбинационно-параметрического взаимодействия в кристалле CaCO₃ благодаря близости к длине волны нулевой дисперсии данного нелинейного кристалла (для обыкновенной волны).

Рисунок 11 демонстрирует осциллограммы генерации различных компонент излучения комбинационно-параметрического лазера.

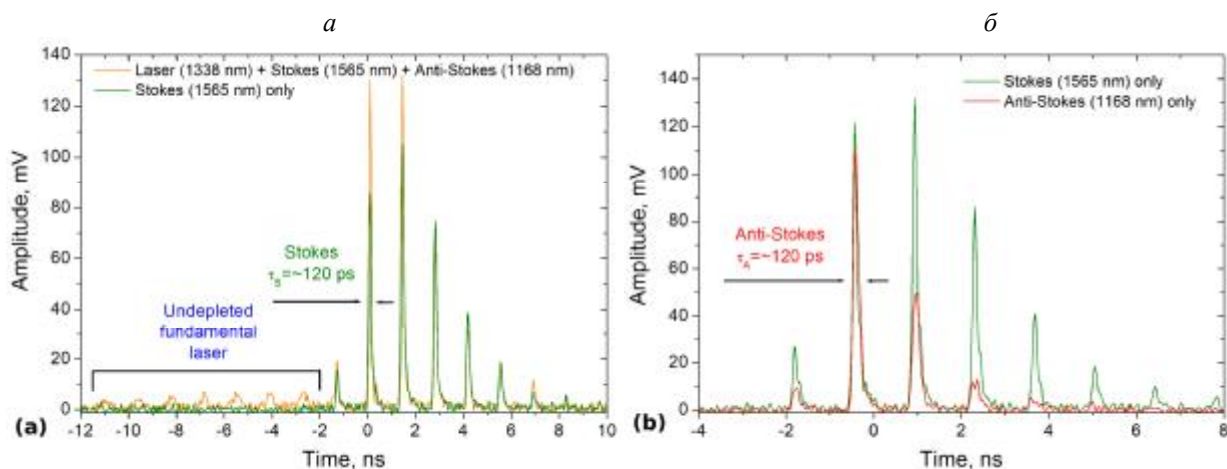


Рисунок 11 – Осциллограммы генерации комбинационно-параметрического лазера

Из рис. 11,а видно, что генерация стоксова ВКР-излучения (1565 нм) была значительно более интенсивной по сравнению с основным лазерным излучением (1338 нм), что объясняется нелинейной разгрузкой резонатора с многократным укорочением генерируемых импульсов с 400 пс (основное лазерное излучение) до 120 пс (ВКР-излучение). При этом импульсы основного лазерного излучения испытывали сильное ВКР-истощение в той части цуга импульсов, где эффективно генерировались интенсивные импульсы стоксова ВКР-излучения. Из рис. 11,б видно, что произошло заметное укорочение цуга генерируемых антистоксовых импульсов (1168 нм) так, что он содержит только один высокоинтенсивный антистоксов импульс (другие антистоксовы импульсы в цуге – в 2 и более раз ниже), выделение которого не требует использования электрооптической ячейки. Длительность антистоксова импульса составляла также 120 пс. Выделение одиночного интенсивного пикосекундного антистоксова импульса из цуга генерируемых пикосекундных лазерных импульсов в режиме синхронизации мод обусловлено тем, что при ВКР-истощении основного лазерного излучения комбинационно-параметрическая антистоксова генерация наблюдается только в кратковременной области перекрытия цугов импульсов истощенного основного лазерного излучения и стоксова ВКР-излучения. Энергия наиболее интенсивного антистоксова сверхкороткого импульса достигала 1.1 мкДж (пиковая мощность около 10 кВт), что составляло 7 % от полной энергии цуга импульсов выходного лазерного излучения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В результате проведенных в работе научных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Установлены и экспериментально обоснованы условия селективного возбуждения ВКР-генерации стоксовых компонент излучения в ВКР-активных кристаллах в общем случае произвольной длительности импульса накачки для однопроходного и внутривибраторного ВКР.

2. Найдены оптимальные условия (длина эффективного взаимодействия и длительность импульса накачки) для низкопороговой коллинеарной комбинационно-параметрической генерации мультиоктавной частотной гребенки ВКР-компонент излучения в ряде ВКР-активных кристаллов (BaWO_4 , SrWO_4 , PbMoO_4 , $\text{PbMo}_{0.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_4$, CaCO_3) под действием одночастотной лазерной накачки.

3. Предложено и осуществлено поддержание не критичного к угловой расстройке фазового синхронизма коллинеарного комбинационно-параметрического четырехволнового взаимодействия ортогонально поляризованных ВКР-компонент излучения в двулучепреломляющих ВКР-активных кристаллах под действием одночастотной лазерной накачки.

4. Реализована генерация антистоксовой и высшей стоксовой компонент ВКР-излучения при поддержании не критичного к угловой расстройке фазового синхронизма коллинеарного комбинационно-параметрического четырехволнового взаимодействия в двулучепреломляющих ВКР-активных кристаллах CaCO_3 и $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ под действием одночастотной лазерной накачки.

5. Обнаружен и исследован эффект укорочения импульса лазерного излучения, позволивший достичь пикосекундной длительности импульса излучения в режиме модуляции добротности и генерации одиночного интенсивного пикосекундного импульса в режиме синхронизации мод при внутривибраторном комбинационно-параметрическом преобразовании частоты лазерного излучения в двулучепреломляющих ВКР-активных кристаллах CaCO_3 и $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Сметанин С.Н. Определение порога вынужденного комбинационного рассеяния при произвольной длительности импульса накачки // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 121. – № 3. – С. 430-440.
- A2. Сметанин С.Н. Теоретическое исследование коллинеарной генерации гребенки оптических частот при многоволновом нестационарном ВКР в кристаллах // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – № 11. – С. 1012-1021.
- A3. Сметанин С.Н. Нестационарное вынужденное комбинационное рассеяние в кристаллах при движении населенностей колебательных состояний // ЖЭТФ. – 2014. – Т. 146. – Вып. 1 (7). – С. 45-59.
- A4. Басиев Т.Т., Дорошенко М.Е., Ивлева Л.И., Сметанин С.Н., Елинек М., Кубечек В., Елинкова Х. Четырехволновая генерация ВКР-компонент излучения в кристаллах BaWO_4 и SrWO_4 при пикосекундном возбуждении // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43. – № 7. – С. 616-620.
- A5. Smetanin S.N., Doroshenko M.E., Ivleva L.I., Jelínek M., Kubeček V., Jelínková H. Low-threshold parametric Raman generation of high order Raman components in crystals // Appl. Phys. B. – 2014. – V. 117. – N 1. – P. 225-234.
- A6. Smetanin S.N. Four-wave mixing oscillation of frequency components at transient stimulated Raman scattering in crystals // Conference paper. International Conference on

- Coherent and Nonlinear Optics ICONO-2013, Moscow, Russia, 18-22 June 2013. – 2013. – Paper IWP29. – P. 65.
- A7. Shurygin A.S., Basiev T.T., Fedin A.V., Smetanin S.N. Four-wave mixing of the Stokes radiation components in solid-state Raman lasers // Technical digest of 14th International conference on Laser optics “LO-2010”, St. Petersburg, Russia, 28 June – 2 July 2010. – 2010. – Paper WeR1-p06.
- A8. Басиев Т.Т., Сметанин С.Н., Федин А.В., Шурыгин А.С. Внутривибрационная ВКР-генерация в полифункциональном лазерном кристалле SrMoO₄:Nd³⁺ при диодной накачке // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – № 8. – С. 704-709.
- A9. Басиев Т.Т., Басиева М.Н., Гаврилов А.В., Ершков М.Н., Ивлева Л.И., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. Эффективное преобразование излучения Nd:YAG-лазера в безопасный для глаз спектральный диапазон при вынужденном комбинационном рассеянии в кристалле BaWO₄ // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – № 8. – С. 710-715.
- A10. Basiev T.T., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Smetanin S.N., Ershkov M.N. Development of a high-effective nanosecond Raman laser with conversion of 1.32-micron Nd:YAG-laser radiation into eye-safe region // Technical digest of 13th International conference on Laser optics “LO-2008”, St. Petersburg, Russia, 23-28 June 2008. – 2008. – P. 57.
- A11. Гаврилов А.В., Ершков М.Н., Солохин С.А., Сметанин С.Н., Федин А.В. Внутривибрационное ВКР-преобразование ИАГ:Nd-лазерного излучения в безопасный для зрения спектральный диапазон // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: сб. тр. 9-й Всерос. конф. с элементами молодеж. науч. шк., Саранск, 5-8 окт. 2010 г. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – 184 с., стр. 71.
- A12. Ershkov M.N., Gavrilov A.V., Basiev T.T., Basieva M.N., Fedin A.V., Smetanin S.N. High-average-power eye-safe Raman BaWO₄-YAG:Nd laser // Technical digest of 14th International conference on Laser optics “LO-2010”, St. Petersburg, Russia, 28 June – 2 July 2010. – 2010. – Paper WeR1-p13.
- A13. Сметанин С.Н., Басиев Т.Т. ВКР-генерация в синхронизме четырехволновых взаимодействий ВКР-компонент излучения в двулучепреломляющих комбинационно-активных кристаллах // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т. 114. – № 6. – С. 9-18.
- A14. Basiev T.T., Danileiko Yu.K., Doroshenko M.E., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Osiko V.V., Smetanin S.N. High-energy BaWO₄ Raman laser pumped by a self-phase-conjugated Nd:GGG laser // Laser Physics. – 2004. – V. 14. – N 7. – P. 891-894.
- A15. Basiev T.T., Danileiko Yu.K., Doroshenko M.E., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Osiko V.V., Smetanin S.N. High-energy BaWO₄ Raman laser pumped by a self-phase-conjugated Nd:GGG laser // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 2004. – V. 5481. – P. 23-26.
- A16. Basiev T.T., Danileiko Yu.K., Doroshenko M.E., Osiko V.V., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Smetanin S.N. Powerful BaWO₄ Raman lasers pumped by self-phase-conjugated Nd:YAG and Nd:GGG lasers // Conference paper. Advanced Solid-State Photonics ASSP-2004, Santa Fe, USA, 1-4 February 2004. – 2004. – Paper TuB11.
- A17. Basiev T.T., Danileiko Yu.K., Doroshenko M.E., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Osiko V.V., Smetanin S.N. High-energy BaWO₄ Raman laser pumped by a self-phase-conjugated Nd:GGG laser // Conference Digest of 11th International Conference on Laser Optics (LO-2003). St. Petersburg, Russia, 26-30 June 2003. – 2003. – P. 69.

- A18. Shurygin A.S., Basiev T.T., Fedin A.V., Smetanin S.N. Compact 58-microjoule self-Raman Nd:SrMoO₄ laser with laser diode pumping and passive LiF:F₂⁻ Q-switch // Technical digest of 14th International conference on Laser optics “LO-2010”, St. Petersburg, Russia, 28 June – 2 July 2010. – 2010. – Paper WeR1-p14.
- A19. Шурыгин А.С., Федин А.В., Сметанин С.Н. SrMoO₄:Nd-лазер с ВКР-самопреобразованием лазерного излучения и полупроводниковой накачкой // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: сб. тр. 9-й Всерос. конф. с элементами молодеж. науч. шк., Саранск, 5-8 окт. 2010 г. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – 184 с., стр. 72.
- A20. Басиев Т.Т., Федин А.В., Шурыгин А.С., Сметанин С.Н. Параметрическая связь частотных компонент излучения при вынужденном комбинационном рассеянии в твердом теле // УФН. – 2010. – Т. 180. – № 6. – С. 639-646.
- A21. Басиев Т.Т., Федин А.В., Шурыгин А.С., Сметанин С.Н. Параметрические четырехволновые процессы при многокаскадном ВКР-преобразовании излучения неодимовых лазеров в безопасный для глаз диапазон // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 107. – № 3. – С. 378-384.
- A22. Basiev T.T., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Smetanin S.N., Shurygin A.S. Parametric four-wave processes under multi-cascade SRS-conversion of Nd-laser radiation into eye-safe region // Technical digest of 13th International conference on Laser optics “LO-2008”, St. Petersburg, Russia, 23-28 June 2008. – 2008. – P. 57.
- A23. Basiev T.T., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Osiko V.V., Smetanin S.N. SRS transformation of the radiation of a self-pumped phase-conjugate laser // Laser Physics. – 2003. – V. 13. – N 8. – P. 1013-1016.
- A24. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Осико В.В., Федин А.В., Сметанин С.Н. ВКР-преобразование излучения с высокой средней мощностью в кристалле BaWO₄ // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 7. – С. 649-651.
- A25. Basiev T.T., Fedin A.V., Osiko V.V., Gavrilov A.V., Smetanin S.N. High-average-power BaWO₄ Raman laser pumped by a self-phase-conjugated Nd-laser // Conference Digest of International Conference on Lasers and Electro-Optics-Europe (CLEO/Europe-2003). Munich, Germany, 22-27 June 2003. – 2003. – P. 85.
- A26. Basiev T.T., Doroshenko M.E., Ivleva L.I., Smetanin S.N., Kubeček V., Jelínek M., Jelínková H. Stimulated Raman scattering of 18 picosecond laser pulses in strontium barium niobate crystal // Laser Phys. Lett. – 2012. – V. 9. – N 7. – P. 519-523.
- A27. Basiev T.T., Doroshenko M.E., Smetanin S.N., Jelínek M., Kubeček V., Jelínková H., Shekhovtsov A.N., Kosmyna M.B. Multi-wave SRS oscillation in PbMoO₄ and PbMo_{0.5}W_{0.5}O₄ crystals under 18 picosecond laser pumping // Laser Phys. Lett. – 2012. – V. 9. – N 12. – P. 853-857.
- A28. Jelinek M., Kubecek V., Jelinkova H., Smetanin S.N. Low-threshold collinear parametric Raman comb generation in calcite // Technical digest of the Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO/US 2015, San Jose, USA, 12-14 May 2015. – 2015. – Paper JTh2A.24. – P. 41.
- A29. Smetanin S., Jelinek M., Kubecek V., Jelinkova H. Investigation of optimal conditions for collinear parametric Raman comb generation in calcite under 532 and 1064 nm picosecond laser pumping // Technical digest of the Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO/Europe 2015, Munich, Germany, 21-25 June 2015. – 2015. – Paper CA-P.37. – P. 34.

- A30. Smetanin S.N., Jelínek M., Kubeček V., Jelínková H. Low-threshold collinear parametric Raman comb generation in calcite under 532 and 1064 nm picosecond laser pumping // *Laser Phys. Lett.* – 2015. – V. 12. – N 9. – P. 095403.
- A31. Smetanin S.N., Basiev T.T. Phase matching of four-wave mixing of Raman components in birefringent Raman-active crystals. Technical program of 15th International conference on Laser optics “LO-2012”, St. Petersburg, Russia, 25-29 June 2012. – 2012. – P. 38.
- A32. Сметанин С.Н., Басиев Т.Т. Синхронизм четырехволновых взаимодействий ВКР-компонент в двулучепреломляющих ВКР-кристаллах // *Квантовая электроника.* – 2012. – Т. 42. – № 3. – С. 224-227.
- A33. Сметанин С.Н., Федин А.В., Шурыгин А.С. Реализация синхронизма четырехволнового смешения частотных компонент излучения при внутрирезонаторном вынужденном комбинационном рассеянии в кристалле кальцита // *Квантовая электроника.* – 2013. – Т. 43. – № 6. – С. 512-518.
- A34. Smetanin S.N. Shurygin A.S., Fedin A.V. Collinear phase-matched four-wave mixing generation of Raman radiation components in the calcite parametric Raman laser // Conference paper. The 21th annual International Conference on Advanced Laser Technologies ALT-2013, Budva, Montenegro, 16-20 September 2013. – 2013. – Paper LS-O-5. – P. 141.
- A35. Smetanin S.N., Jelínek M., Kubeček V. Parametric Raman anti-Stokes laser at 503 nm with collinear beam interaction of phase-matched orthogonally polarized Raman components in calcite under 532 nm 20 ps laser pumping. Technical digest of the Conference on SPIE Optics + Optoelectronics 2017, Prague, Czech Republic, 24-27 April 2017, p. 23 (2017).
- A36. Jelínek M., Kubeček V., Jelínková H., Ivleva L., Smetanin S., Shurygin A. Cascade-like and four-wave-mixing second Stokes generation at nonlinear cavity dumping of subnanosecond Nd:SrMoO₄ self-Raman laser // Technical digest of the Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO/Europe 2015, Munich, Germany, 21-25 June 2015. – 2015. – Paper CA-P.41. – P. 34.
- A37. Smetanin S.N., Jelínek M., Kubeček V., Jelínková H., Shurygin A.S. Four-wave-mixing and nonlinear cavity dumping of 280 picosecond 2nd Stokes pulse at 1.3 μm from Nd:SrMoO₄ self-Raman laser // *Laser Phys. Lett.* – 2016. – V. 13. – N 1. – P. 015801.
- A38. Smetanin S.N., Jelínek M., Kubeček V., Jelínková H., Ivleva L.I., Shurygin A.S., Ershkov M.N. The diode-pumped Nd:SrMoO₄ self-Raman-parametric laser generation of shortened 300-picosecond pulses without any mode-locking device // Technical program of 17th International conference “Laser Optics 2016”, St. Petersburg, Russia, 27 June – 1 July 2016. – 2016. – Paper WeR1-p24. – P. 22.
- A39. Smetanin S.N., Jelínek M., Kubeček V., Jelínková H., Ivleva L.I. Parametric second Stokes Raman laser output pulse shortening to 300 ps due to depletion of pumping of intracavity Raman conversion // *Appl. Phys. B.* – 2016. – V. 122. – N 10. – P. 260-271.
- A40. Smetanin S., Jelínek M., Kubeček V. Parametric Raman anti-Stokes laser at 503 nm with phase-matched collinear beam interaction of orthogonally polarized Raman components in calcite under 5320 nm 20 ps laser pumping // *Proc. SPIE.* – 2017. – V. 10228. – 102280U.
- A41. Smetanin S.N., Jelínek M., Kubeček V. Parametric Raman crystalline anti-Stokes laser at 503 nm with collinear beam interaction at tangential phase matching // *Appl. Phys. B.* – 2017. – V. 123. – P. 203.
- A42. Jelínek M., Kubeček V., Smetanin S. Generation of 120 ps, 1168 nm anti-Stokes pulses from the all-solid-state, self-mode-locked, parametric Raman CaCO₃ laser with intracavity pumping by 1338 nm Nd:YAG laser // *Proc. SPIE.* – 2017. – V. 10603. – 106030Z.

A43. Smetanin S., Jelínek M., Kubeček V. Parametric Raman crystalline anti-Stokes laser at 503 nm with collinear orthogonally polarized beam interaction at tangential phase matching // Technical digest of the 2017 CLEO Pacific Rim Conference, Singapore, Singapore, 31 July-04 August 2017. – 2017. – P1-014. – P. 66.

Список цитированной литературы

1. Бломберген Н. Вынужденное комбинационное рассеяние света // УФН. – 1969. – Т. 97. – С. 307-352.
2. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики (М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989).
3. Бутылкин В.С., Каплан А.Е., Хронопуло Ю.Г., Якубович Е.И. Резонансные взаимодействия света с веществом (М.: Наука, 1977).
4. Ахманов С.А., Коротеев Н.И. Спектроскопия рассеяния света и нелинейная оптика, нелинейнооптические методы активной спектроскопии комбинационного и рэлеевского рассеяния // Успехи физических наук. – 1977. – Т. 123. – С. 405-471.
5. Луговой В.Н. Дополнительные конусы излучения антистоксовых компонент ВКР в кальците // Письма в ЖЭТФ. – 1968. – Т. 7. – С. 52-55.
6. Бутылкин В.С., Венкин Г.В., Протасов В.П., Смирнов Н.Д., Хронопуло Ю.Г., Шалаяев М.Ф. Пространственно-ограниченный захват фаз и осевое антистоксово излучение при ВКР в газах // Письма в ЖЭТФ. – 1973. – Т. 17. – С. 400-405.
7. Бутылкин В.С., Венкин Г.В., Кулюк Л.Л., Малеев Д.И., Хронопуло Ю.Г., Шалаяев М.Ф. Роль параметрического и комбинационного процессов при генерации осевой второй стоксовой компоненты ВКР // Квантовая электроника. – 1977. – Т. 4. – С. 1537-1546.
8. Андреев Р.Б., Горбунов В.А., Гулидов С.С., Паперный С.Б., Серебряков В.А. О роли параметрических эффектов при генерации высших компонент ВКР в газах // Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9. – С. 56-60.
9. Hickman A.P., Bischel W.K. Theory of Stokes and anti-Stokes generation by Raman frequency conversion in the transient limit // Phys. Rev. A. – 1988. – V. 37. – P. 2516-2523.
10. Reiser C., Raymond T.D., Michie R.B., Hickman A.P. Efficient anti-Stokes Raman conversion in collimated beams // J. Opt. Soc. Am. B. – 1989. – V. 6. – P. 1859-1869.
11. Losev L.L., Song J., Xia J.F., Strickland D., Brukhanov V.V. Multifrequency parametric infrared Raman generation in $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ crystal with biharmonic ultrashort-pulse pumping // Opt. Lett. – 2002. – V. 27. – P. 2100-2102.
12. Грасюк А.З., Лосев Л.Л., Луценко А.П., Сазонов С.Н. Комбинационно-параметрическая генерация антистоксова излучения в режиме усиления внешнего стоксова сигнала // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 5. – С. 599-602.
13. Лосев Л.Л., Луценко А.П., Сазонов С.Н. Эффективная параметрическая генерация высших компонент ВКР с дифракционной расходимостью // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 8. – С. 960.
14. Грасюк А.З., Лосев Л.Л., Луценко А.П., Сазонов С.Н. Комбинационно-параметрический антистоксов лазер // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 10. – С. 1245-1247.
15. Андреев А.В., Валеев А.А., Морозов В.Б., Оленин А.Н., Тункин В.Г. Временная динамика комбинационно-параметрического преобразования в среде с наведенной вращательной когерентностью // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 1. – С. 54-58.

16. Grasiuk A.Z., Kurbasov S.V., Losev L.L. Picosecond parametric Raman laser based on $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ crystal // *Opt. Comm.* – 2004. – V. 240. – P. 239-244.
17. Mildren R.P., Coutts D.W., Spence D.J. All-solid-state parametric Raman anti-Stokes laser at 508 nm // *Opt. Express.* – 2009. – V. 17. – P. 810-818.
18. Wang C., Zhang X., Wang Q., Cong Zh., Liu Zh., Wei W., Wang W., Wu Zh., Zhang Yu., Li L., Chen X., Li P., Zhang H., Ding Sh. Extracavity pumped BaWO_4 anti-Stokes Raman laser // *Opt. Express.* – 2013. – V. 21. – P. 26014-26026.
19. Basiev T.T., Osiko V.V., Prokhorov A.M., Dianov E.M. Crystalline and fiber Raman lasers. In: *Solid-state mid-infrared laser sources. Topics in Applied Physics*, V. 89 (Berlin: Springer, 2003), p. 351-400.
20. Зверев П.Г., Басиев Т.Т., Соболев А.А., Скорняков В.В., Ивлева Л.И., Полозков Н.М., Осико В.В. Вынужденное комбинационное рассеяние в кристаллах щелочноземельных вольфраматов // *Квантовая электроника.* – 2000. – Т. 30. – С. 55-59.
21. Kaminskii A.A., Ralchenko V.G., Konov V.I. CVD-diamond – a novel $\chi^{(3)}$ -nonlinear active crystalline material for SRS generation in very wide spectral range // *Laser Phys. Lett.* – 2006. – V. 3. – P. 171-177.
22. Конященко А.В., Лосев Л.Л., Теняков С.Ю. Генерация стоковых импульсов длительностью менее 100 фс при ВКР в кристалле нитрата бария // *Квантовая электроника.* – 2010. – Т. 40. – С. 700-703.
23. Orlovich V.A., Malakhov Yu.I., Popov Yu.M., Busko D.N., Danailov M.B., Demidovich A.A., Apanasevich P.A., Chulkov R.V. Raman conversion of femtosecond laser pulses in crystals // *Laser Phys. Lett.* – 2012. – V. 9. – P. 770-774.
24. Murtagh M., Lin J., Mildren R.P., McConnell G., Spence D.J. Efficient diamond Raman laser generating 65 fs pulses // *Opt. Express.* – 2015. – V. 23. P. 15504-15513.
25. Lisinetskii V.A., Grabtchikov A.S., Apanasevich P.A., Schmitt M., Kuschner B., Schlücker, Orlovich V.A. Continuous-wave solid-state Raman laser for spectroscopic applications // *J. Raman Spectrosc.* – 2006. – V. 37. – P. 421-428.
26. Lee A.J., Pask H.M., Piper J.A., Zhang H., Wang J. An intracavity, frequency-doubled BaWO_4 Raman laser generating multi-watt continuous-wave, yellow emission // *Opt. Express.* – 2010. – V. 18. – P. 5984-5992.
27. Kores C.C., Jakutis-Neto J., Geskus D., Pask H.M., Wetter N.U. Diode-side-pumped continuous wave $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ self-Raman laser at 1176 nm // *Opt. Lett.* – 2015. – V. 40. – P. 3524-3527.
28. Grabtchikov A.S., Kuzmin A.N., Lisinetskii V.A., Orlovich V.A., Ryabtsev G.I., Demidovich A.A. All solid-state diode-pumped Raman laser with self-frequency conversion // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – V. 75. – P. 3742-3744.
29. Basiev T.T., Vassiliev S.V., Konjushkin V.A., Osiko V.V., Zagumennyi A.I., Zavartsev A.I., Kutovoi S.A., Shcherbakov I.A. Diode pumped 500-picosecond $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ Raman laser // *Laser Phys. Lett.* – 2004. – V. 5. – P. 237-240.
30. Басиев Т.Т., Дорошенко М.Е., Ивлева Л.И., Осико В.В., Космына М.Б., Комарь В.К., Шульц Я., Елинова Х. Генерационные свойства ВКР-активных кристаллов молибдатов и вольфраматов, активированных ионами Nd^{3+} при селективной оптической накачке // *Квантовая электроника.* – 2006. – Т. 36. – С. 720-726.
31. Basiev T., Doroshenko M., Ivleva L., Voronina I., Konjushkin V., Osiko V., Vasilyev S. Demonstration of high self-Raman laser performance of a diode-pumped $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ crystal // *Opt. Lett.* – 2009. – V. 34. – P. 1102-1104.

32. Lee C.Y., Chang C.C., Tuan P.H., Cho C.Y., Huang K.F., Chen Y.F. Cryogenically monolithic self-Raman lasers: observation of single-longitudinal-mode operation // *Opt. Lett.* – 2015. – V. 40. – P. 1996-1999.
33. Basiev T.T., Basieva M.N., Doroshenko M.E., Fedorov V.V., Osiko V.V., Mirov S.B. Stimulated Raman scattering in mid IR spectral range 2.31-2.75-3.7 μm in BaWO_4 crystal under 1.9 and 1.56 μm pumping // *Laser Phys. Lett.* – 2006. – V. 3. – P. 17-20.
34. Sabella A., Piper J.A., Mildren R.P. Diamond Raman laser with continuously tunable output from 3.38 to 3.80 μm // *Opt. Lett.* – 2014. – V. 39. P. 4037-4040.
35. Джотян Г.П., Дьяков Ю.Е., Першин С.М., Холодных А.И. Конкуренция ВКР и параметрического процесса в резонаторе параметрического генератора на кристалле LiIO_3 // *Квантовая электроника.* – 1977. – Т. 4, № 6. – С. 1215-1226.
36. Ахманов С.А., Драбович К.Н., Сухоруков А.П., Чиркин А.С. Вынужденное комбинационное рассеяние в поле сверхкоротких импульсов света // *ЖЭТФ.* – 1970. – Т. 59. – С. 485-499.
37. Raymer M.G., Mostowski J. Stimulated Raman scattering: Unified treatment of spontaneous initiation and spatial propagation // *Phys. Rev. A.* – 1981. – V. 24. – P. 1980-1993.
38. Carman R.L., Shimizu F., Wang C.S., Bloembergen N. Theory of Stokes pulse shapes in transient stimulated Raman scattering // *Phys. Rev. A.* – 1970. – V. 2. – P. 60-72.
39. Kaminskii A.A., Lux O., Rhee H., Eichler H.J., Ueda K., Yoneda H., Shirakawa A., Zhao B., Chen J., Dong J., Zhang J. New manifestations of $\chi^{(3)}$ -nonlinear laser interactions in tetragonal LuVO_4 and YbVO_4 crystals attractive for SRS-converters and self-Raman lasers // *Laser Phys. Lett.* – 2012. – V. 9. – P. 879-887.
40. Lux O., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., Konov V.I., Sharonov G.V., Shirakawa A., Yoneda H., Rhee H., Eichler H.J., Mildren R.P., Kaminskii A.A. Multi-octave frequency comb generation by $\chi^{(3)}$ -nonlinear optical processes in CVD diamond at low temperatures // *Laser Phys. Lett.* – 2014. – V. 11. – P. 086101.
41. McDonald G.S., New G.H.C., Losev L.L., Lutsenko A.P., Shaw M. Ultrabroad-bandwidth multifrequency Raman generation // *Opt. Lett.* – 1994. – V. 19. – P. 1400-1402.
42. Jain R.K., Stenersen K. Phase-matched four-photon mixing processes in birefringent fibers // *Appl. Phys. B.* – 1984. – V. 35. – P. 49-57.
43. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004).
44. Giordmaine J.A., Kaiser W. Light scattering by coherently driven lattice vibrations // *Phys. Rev.* – 1966. – V. 144. – P. 676-690.
45. Warner J. Phase-matching for optical up-conversion with maximum angular aperture – theory and practice // *Opto-Electronics.* – 1969. – V. 1. – P. 25-28.
46. Barnes N.P., Corcoran J. Parametric generation processes: special bandwidth and acceptance angles // *Applied Optics.* – 1976. – V. 15. – P. 696-699.
47. Milton M.J.T., McIlveen T.J., Hanna D.C., Woods P.T. High-efficiency infrared generation by difference-frequency mixing using tangential phase matching // *Opt. Comm.* – 1992. – V. 87. – P. 273-277.