

На правах рукописи

ПАРФЕНОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**“Управление взаимодействием встречных ультракоротких импульсов
света во вращающихся кольцевых лазерах на $YAG:Nd^{3+}$ с помощью
акустооптических обратных связей и невзаимных эффектов”**

Специальность 01.04.05 - Оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в Отделе физических проблем квантовой электроники
Научно-исследовательского института ядерной физики имени
Д.В. Скобельцына федерального бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования “Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова”.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник Шелаев Анатолий Николаевич

Официальные оппоненты: Балакший Владимир Иванович, доктор
физико-математических наук, профессор
физический факультет МГУ имени
М.В.Ломоносова.

Крылов Александр Анатольевич,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Научный центр волоконной
оптики Российской академии наук,
научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Защита состоится “ 13 ” февраля 2013 г. в 15:00 на заседании
диссертационного совета Д 501.001.45 на базе МГУ имени М.В. Ломоносова
по адресу: Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5
(19 корпус НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени
М.В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке НИИ
ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ 26 ” декабря 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.45
кандидат физико-математических наук

О.М. Вохник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Во второй половине 20 века в классической оптике появилось, по меньшей мере, два новых раздела - Нелинейная оптика и Оптика лазеров, обусловленных созданием лазеров, что позволило перейти к изучению оптических явлений на качественно новом уровне, в частности, изучать взаимодействие с веществом не только "обычных" световых волн, но и ультракоротких импульсов света (УКИ) внутри различных оптических резонаторов.

Данная диссертация относится к разделу Оптика лазеров и посвящена исследованию возможностей управления взаимодействием встречных УКИ во вращающихся твёрдотельных кольцевых лазерах (ТКЛ) с однородно-уширенной линией усиления активной среды (АС) и медленным временем релаксации инверсной населённости, что представляет большой интерес как с чисто научной точки зрения, так и с точки зрения практических приложений ТКЛ.

Дело, во-первых, в том, что КЛ обладают уникальными возможностями для измерения невзаимных оптических эффектов. При этом параметры КЛ в значительной степени определяются свойствами АС. Твёрдотельные же АС (и, в первую очередь, YAG:Nd^{3+}) по ряду своих лазерно-физических характеристик существенно превосходят газовые АС. Так, за счет большой ширины линии люминесценции и большого коэффициента усиления в ТКЛ, даже при малом периметре резонатора, возможно получение режима вынужденной СМ, в котором моды стабилизированы и эквидистантны, а встречные волны (ВВ) представляют собой периодические последовательности УКИ с длительностью много меньшей времени обхода светом резонатора. Таким образом, благодаря режиму СМ можно существенно улучшить спектрально-временные характеристики излучения ТКЛ и более чем на порядок уменьшить связь ВВ за счет обратного рассеяния и, следовательно, область захвата их частот.

Во-вторых, при переходе от режима свободной генерации к режиму СМ имеется возможность устранить пространственную неоднородность снятия инверсной населенности в АС, негативно сказывающейся на стабильности двунаправленной генерации и режима биений во вращающихся ТКЛ. Так, за счет пространственно-временного разделения встречных УКИ в АС, реализуемого при расположении акустооптического синхронизатора мод (АОСМ) в резонаторе ТКЛ на расстоянии $L / 4$ от центра АС (L - периметр кольцевого резонатора, встречные УКИ встречаются в АОСМ в моменты минимума потерь), снятие инверсной населенности становится однородным.

В-третьих, как показали проведенные нами исследования, для получения режима вынужденной СМ целесообразно применять амплитудную акустооптическую СМ, поскольку она, в отличие от фазовой (электрооптической) СМ, позволяет использовать для стабилизации режима вынужденной СМ дифрагировавшие в АОСМ лучи. Так, при возвращении на АОСМ дифрагировавших в нём лучей, которые затем в результате вторичной дифракции вновь попадают в резонатор ТКЛ, создается ОС по дифрагировавшему лучу, что существенно улучшает характеристики АОСМ на стоячей и бегущей ультразвуковых (УЗ) волнах, стабилизирует параметры УКИ, более чем на порядок расширяет полосу СМ [1,2], а также позволяет управлять АЧХ ТКЛ за счет изменения величины и знака невзаимных амплитудных и фазовых акустооптических эффектов [3].

И, наконец, в-четвёртых, режим СМ позволяет использовать для устранения конкуренции ВВ и стабилизации режима биений во вращающемся ТКЛ предложенную нами эффективную реализацию метода волн автоподсветки (ВА) [4-8]. Суть метода ВА, использующего нелинейное взаимодействие ВВ в АС, заключается в возвращении обратно в резонатор ТКЛ под малым углом к его оси части выходного излучения, что позволяет создавать в АС дополнительные решетки инверсной населенности. Дифракция ВВ на этих

решетках в принципе может обеспечить больший коэффициент усиления для волны меньшей интенсивности. Однако в режимах свободной генерации должны использоваться две ВА, и в цепях ОС должны располагаться невзаимные амплитудные элементы.

В этой связи очень важен поиск оптимальных способов реализации метода ВА именно в режимах СМ. Дело в том, что, вопреки ожидаемой стабилизации амплитуд ВВ в режимах СМ за счёт пространственно-временной развязки встречных УКИ в АС и уменьшения стабилизирующего влияния связи ВВ за счет обратного рассеяния, конкурентное подавление одной из ВВ во вращающемся ТКЛ по сравнению с режимами свободной генерации обычно увеличивается [9,10]. Как показано нами, такая особенность динамики ТКЛ в режимах СМ может быть обусловлена не только созданием разности частот ВВ при вращении ТКЛ, но и невзаимными амплитудными и фазовыми акустооптическими эффектами в АОСМ за счёт возникновения временных сдвигов встречных УКИ от минимума потерь на периоде модуляции [3,11].

Таким образом, задача по управлению взаимодействием встречных УКИ в ТКЛ на $YAG:Nd^{3+}$ актуальна как с точки зрения разработки специальных методов по устранению конкуренции встречных УКИ и стабилизации режимов биений с целью регистрации малых оптических невзаимностей, так и исследования физики нелинейного невзаимного взаимодействия встречных УКИ не только в АС ТКЛ, но и в других средах, в первую очередь, в средах светозвукопроводов АОСМ и других акустооптических модуляторов (АОМ).

Вместе с тем следует подчеркнуть, что, несмотря на перспективность использования ТКЛ на $YAG:Nd^{3+}$ в режимах акустооптической СМ, управление взаимодействием встречных УКИ в такой сложной нелинейной системе, какой является ТКЛ, является весьма непростой задачей. Как показали экспериментальные исследования, на взаимодействие встречных УКИ в режимах акустооптической СМ оказывают влияние целый ряд причин, в частности:

связь встречных УКИ за счет обратного рассеяния на внутрирезонаторных элементах, уровень накачки, частота модуляции потерь, положение АОСМ в резонаторе ТКЛ и т.д. Задача еще более усложняется при учете влияния таких факторов, как наведение динамических инерционных решеток инверсной населенности в АС, которые являются одной из причин нелинейной динамики не только ТКЛ, но и линейных лазеров и допускают существование целого ряда периодических, квазипериодических и хаотических режимов генерации, в том числе весьма нетривиальных режимов пространственно-временного гистерезиса и аномально длительной памяти. Кроме того на взаимодействие встречных УКИ в ТКЛ оказывают влияние различного рода дифракционные акустооптические ОС и элементы, обладающие для встречных УКИ фазовой, амплитудной и поляризационной невязимостями.

Существенно, что до настоящего времени такие акустооптические невязимости изучались исключительно при дифракции ВВ на бегущей УЗ волне. Амплитудные и фазовые характеристики брэгговских акустооптических модуляторов на стоячей УЗ волне при различных углах падения света, длинах акустооптического взаимодействия и т.д. оставались невыясненными. Кроме того специальных исследований относительно влияния акустооптического взаимодействия на параметры встречных УКИ, учитывавших различную геометрию акустооптического взаимодействия световых ВВ и "идеальной" стоячей УЗ волны, не имеющей бегущей компоненты, также не проводилось. Вместе с тем, как нами было теоретически установлено, амплитудные и фазовые акустооптические невязимости, имеют место в АОСМ не только на бегущих, но и на стоячих УЗ волнах. В частности было показано, что при использовании АОСМ на стоячей УЗ волне в режиме дифракции Брэгга при отсутствии фазового синхронизма параметры УКИ могут существенно изменяться. Так теоретический анализ показал, что в результате акустооптического взаимодействия со стоячей УЗ волной в АОСМ встречные УКИ приобретают

невзаимную, меняющую знак по профилю УКИ, частотную модуляцию (чирп), величина которой зависит как от временных сдвигов между прохождением встречными УКИ АОСМ и минимумом потерь, так и от отстройки угла падения света на АОСМ от угла Брэгга. При этом чирп УКИ, проходящих через АОСМ в минус первом порядке дифракции, особенно значителен, а АОСМ помимо своей основной функции - модуляции потерь, выполняет роль невзаимного амплитудного и фазового элемента, вызывающего, кроме того, еще и невзаимную частотную модуляцию. Как нами было показано, эффект сильного чирпа УКИ в минус первом порядке дифракции при использовании АОСМ на стоячей УЗ волне можно использовать для стабилизации режима биений во вращающемся ТКЛ на $YAG:Nd^{3+}$ с сильной конкуренцией встречных УКИ при создании УКИ автоподсветки из луча минус первого порядка дифракции, стабилизирующего двунаправленную генерацию за счёт самодифракции основных УКИ и УКИ автоподсветки на наведённых в АС решётках инверсной населённости.

Вместе с тем детальный анализ частотных характеристик (ЧХ) вращающегося ТКЛ требует учета того, что при дифракции Брэгга в реальных АОСМ на стоячей УЗ волне имеют место как фазовая, так и амплитудная невзаимности, обусловленные “паразитной” бегущей компонентой УЗ волны. Указанное обстоятельство с необходимостью требует комплексного учета всех невзаимных эффектов, имеющих место при акустооптическом взаимодействии встречных УКИ как с бегущими, так и со стоячими УЗ волнами. Добавим к сказанному, что при создании ОС по дифрагировавшему лучу характер этих невзаимностей в зависимости от параметров ОС может существенно меняться.

Актуальность проведенных в настоящей диссертационной работе экспериментальных и теоретических исследований обусловлена, кроме вышеизложенного, еще и тем, что существующий к настоящему времени классический подход, описывающий взаимодействие встречных УКИ в ТКЛ в

режиме амплитудной СМ, сформулирован без учета частотной модуляции УКИ в АОСМ, когда функция АОСМ сводится только к модуляции потерь в резонаторе и связи встречных УКИ через обратное рассеяние на торцах. Таким образом, учет невзаимного чирпирования, амплитудных и фазовых невзаимностей, вносимых АОСМ на стоячей УЗ волне в ТКЛ, необходим, что существенно дополняет задачу по изучению взаимодействия встречных УКИ в АС ТКЛ в режимах акустооптической СМ.

Цель работы

Цель настоящей работы состояла, во-первых, в исследовании неизвестных ранее физических закономерностей и эффектов нелинейного взаимодействия встречных УКИ как в кристаллической АС ТКЛ с одномерно-уширенной линией усиления и медленной релаксацией инверсной населённости, так и в аморфных средах светозвукопроводов АОСМ при взаимодействии со стоячими и бегущими УЗ волнами; во-вторых, с поиском эффективных методов устранения сильной конкуренции встречных УКИ и стабилизации двунаправленной генерации с разными частотами ВВ во вращающихся ТКЛ, работающих в режимах акустооптической СМ, с целью регистрации с помощью ТКЛ скоростей вращения относительно инерциальной системы отсчёта.

Научная новизна.

- Впервые предложено и экспериментально реализовано сочетание в ТКЛ в режимах акустооптической СМ с одной стороны, оптико-физических схем квази- и антирезонансных акустооптических ОС, а с другой стороны, метода ВА, позволяющих, при использовании амплитудных и фазовых невзаимных акустооптических эффектов в АОСМ на стоячих и бегущих УЗ волнах, эффективно управлять конкурентным взаимодействием встречных УКИ и динамикой генерации вращающихся ТКЛ.
- Обнаружены и исследованы новые необычные конкурентные эффекты встречных УКИ во вращающемся ТКЛ в режимах нестационарной СМ, а также

в асимметричных схемах ТКЛ с ВА: а) в ТКЛ с антирезонансной акустооптической ОС, при которой резонатор ТКЛ имеет вид “восьмерки” с осью резонатора, самопересекающейся в АОСМ, и б) в ТКЛ с одной ВА без дифракционной акустооптической ОС. При этом расстояние между АС и центром АОСМ могло быть неравным $L/4$.

° Впервые проведены детальные экспериментальные исследования ЧХ вращающихся ТКЛ на $YAG:Nd^{3+}$, т.е. зависимости разности оптических частот ВВ (частоты биений) от разности частот кольцевого резонатора для ВВ Ω , при устранении конкуренции ВВ с помощью ВА, создаваемой квазирезонансной акустооптической ОС, как стационарной, так и нестационарной.

° Обнаружены и теоретически исследованы невзаимные акустооптические эффекты, возникающие при брэгговской дифракции встречных УКИ на стоячей УЗ волне, при этом исследованы возможности управления амплитудой и фазой световых волн в нулевом и минус первом порядках дифракции в АОМ.

Практическая ценность.

° Предложенные и разработанные в диссертационной работе эффективные методы управления взаимодействием встречных УКИ и динамикой генерации ТКЛ с ВА в режимах акустооптической СМ при использовании различных видов акустооптических ОС существенно расширяют возможности применения ТКЛ для генерации мощных высокостабильных УКИ и для измерения невзаимных оптических эффектов в лазерной гироскопии и гиromетрии.

° Предложен и экспериментально реализован метод: устранения паразитной акустооптической невзаимности, возникающей при взаимодействии встречных УКИ в условиях дифракции Брэгга, а также способ устранения возможности образования системы связанных оптических резонаторов в ТКЛ, при создании только одной ВА, а также создания ВА с псевдообращением волнового фронта при использовании специальных отражателей.

° Исследованные особенности акустооптического взаимодействия в АОСМ на бегущих и стоячих УЗ волнах и связанные с этим оптические невзаимности, позволяют управлять фазовой и амплитудной невзаимностью встречных УКИ в ТКЛ за счёт изменения временных сдвигов между прохождением УКИ АОСМ и минимумом потерь на периоде модуляции, а также отстройки от угла Брэгга.

Новизна и практическая ценность этих методов подтверждается четырьмя Авторскими свидетельствами.

Положения, выносимые на защиту

1. ВА, создаваемая квазирезонансной акустооптической ОС при возвращении на АОСМ дифрагировавшего в нём луча большей интенсивности, позволяет стабилизировать режим биений – двунаправленную генерацию с разными частотами ВВ во вращающемся ТКЛ с однородно-уширенной линией усиления и медленной релаксацией инверсной населённости АС (лазер типа В), работающем в режиме акустооптической СМ, при создании в такой несимметричной схеме ТКЛ начальной амплитудной невзаимности для ВВ за счёт отклонения АОСМ от угла дифракции Брэгга.

2. Две ВА, создаваемые антирезонансной акустооптической обратной связью в кольцевых резонаторах типа “восьмерки” и АОСМ, помещенным в области пересечения оси кольцевого резонатора, позволяют стабилизировать режим биений в симметричной схеме вращающегося ТКЛ при отсутствии компенсирующей амплитудной невзаимности за счёт отклонения АОСМ от угла Брэгга, и наличии автокомпенсации акустооптических невзаимностей за счёт симметричной геометрии акустооптического взаимодействия, практически полном устранении дифракционных потерь и резком возрастании эффективности акустооптической ОС и ВА, обусловленных тем, что УКИ автоподсветки остаются в резонаторе ТКЛ и усиливаются в АС.

3. При брэгговской дифракции встречных УКИ на стоячей УЗ волне имеют место амплитудные и фазовые акустооптические невзаимности, обусловленные

экспериментально обнаруженным эффектом разных временных сдвигов между временами прохождения встречными УКИ АОСМ и минимумом дифракционных потерь на периоде модуляции, возникающих как при создании разности оптических частот ВВ во вращающемся ТКЛ, так и при отстройке частоты модуляции потерь от межмодовой частоты.

4. При дифракции Брэгга на стоячей УЗ волне при условии отсутствия фазового синхронизма акустооптического взаимодействия у встречных УКИ как в нулевом, так и в минус первом порядках дифракции имеет место чирп-частотная модуляция их оптических частот.

5. При изменении разности частот ВВ во вращающемся ТКЛ в режимах нестационарной СМ имеет место устранение подавления одной из ВВ за счёт обнаруженного эффекта автостабилизации - появления больших потерь для УКИ большей интенсивности, возникающих за счёт разных временных сдвигов встречных УКИ от минимума потерь на периоде модуляции.

6. ЧХ $\nu_b(\Omega)$ вращающегося ТКЛ на $YAG:Nd^{3+}$ с УКИ автоподсветки, создаваемыми квазирезонансной акустооптической ОС, может приближаться к идеальной ЧХ КЛ $\nu_b = |\Omega / 2\pi|$ вдали от области захвата ($\Omega \gg \Omega_0$) при оптимизации параметров ТКЛ (в т. ч., отстройки частоты модуляции от межмодовой частоты, величины отклонения АОСМ от угла Брэгга).

7. При нестационарной самодифракции УКИ автоподсветки в АС ТКЛ с дифракционной акустооптической ОС при небольших доплеровских сдвигах оптической частоты УКИ автоподсветки $\Delta\nu_D \leq 100$ кГц имеют место постоянная и знакопеременная светоиндуцированная разности частот ВВ. При этом частота колебаний отражателя в цепи ОС меньше обратного времени релаксации инверсной населённости ($f_K \leq 1/T_1 \sim 5$ кГц), а амплитуда колебаний отражателя $a \geq (0,1-1)\lambda$.

Личный вклад автора. Все изложенные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

Апробация результатов работы. Материалы диссертации докладывались на III Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов “Теоретическая и прикладная оптика”, (Ленинград, 1988), VI Всесоюзной конференции “Оптика лазеров”, (Ленинград, 1990), а также VI Международной научно-практической конференции "Современное состояние естественных и технических наук", (Москва, 20.03.2012), VIII Международной научно-практической конференции "Современное состояние естественных и технических наук", (Москва, 14.09.2012), проводившихся журналом из списка ВАК “Естественные и технические науки”.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 17 печатных работах, включая 8 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК России, 4 - Авторских свидетельства, 4 доклада на всероссийских и международных конференциях и 1 препринт НИИЯФ. Перечень опубликованных автором работ по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка цитированной литературы и приложения (списка сокращений и ключевых слов). Общий объем составляет 148 страниц, включая 39 рисунков и 189 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проводится обоснование актуальности темы исследований, формулируются цели диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, основные положения, выносимые на защиту, приводятся данные о публикациях автора диссертации и об апробации полученных им результатов.

Первая глава посвящена исследованию конкурентного взаимодействия

встречных УКИ во вращающихся ТКЛ на YAG:Nd^{3+} с ВА, создаваемыми с помощью оптических ОС.

В § 1.1, являющемся обзорным, рассмотрены результаты теоретических исследований нелинейно-оптического взаимодействия световых ВВ в ТКЛ с ВА на наведенных в АС динамических решетках инверсной населенности как в режимах свободной генерации, так и в режимах СМ.

В §1.2 приведены данные об экспериментальных установках, использовавшихся при выполнении диссертационной работы. Схема одной из установок показана (см. рис. 1).

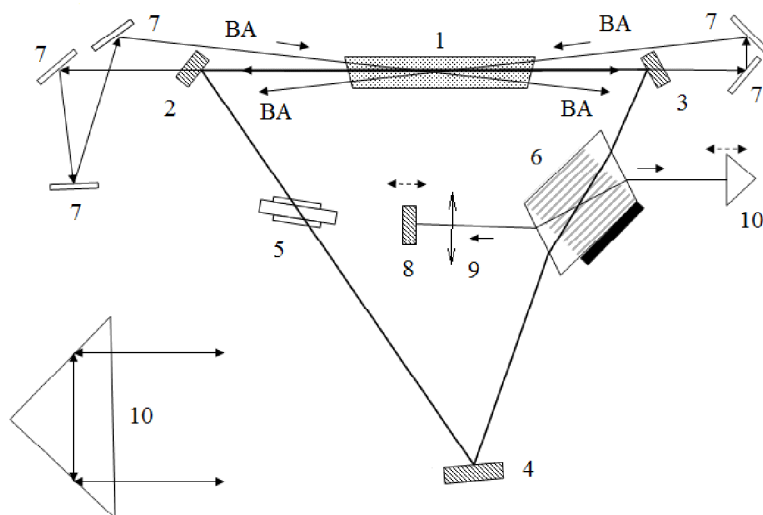


Рис.1. Схема экспериментальной установки ТКЛ на YAG:Nd^{3+} с различными способами создания волн автоподсветки (ВА) в режимах акустооптической синхронизации мод:

1 – активная среда; 2 - 4 – зеркала кольцевого резонатора; 5 – невзаимный частотный фарадеевский элемент; 6 – акустооптический синхронизатор мод (АОСМ); 7 - зеркала для создания ВА; 8 - зеркало с линзой 9 и 10 – уголковая ($\neq 90^0$) призма полного внутреннего отражения для создания ВА и квазирезонансной акустооптической обратной связью (ОС) с помощью дифрагировавших в АОСМ лучей (расстояние между линзой и отражателем равно фокусному расстоянию линз).

В §1.3.1 дается обзор экспериментальных исследований конкурентного взаимодействия встречных УКИ во вращающихся ТКЛ в режимах акустооптической СМ при отсутствии ВА.

В результате обзора проведенных исследований взаимодействия световых ВВ и ВА в АС ТКЛ сделан вывод о том, что использование метода ВА в режимах СМ намного предпочтительнее, чем в режимах свободной генерации, поскольку при пространственно-временной развязке УКИ в АС, когда модулятор располагался на расстоянии $L/4$ (L - периметр кольцевого резонатора) от центра АС при существенном уменьшении связи ВВ в ТКЛ счет обратного рассеяния $m_{1,2}$ эффективность метода ВА существенно возрастает. При этом в режимах свободной генерации должны использоваться две ВА, и в цепях ОС должны располагаться невзаимные амплитудные элементы, пропускающие ВА и ослабляющие обратное излучение.

Вместе с тем экспериментальные исследования показали, что в режиме СМ, даже при реализации пространственно-временной развязки встречных УКИ в АС, при вращении ТКЛ ($|\Omega| > 0$) конкуренция между встречными УКИ обычно значительно возрастала. Так, с ростом $|\Omega|$ в режиме СМ происходило увеличение степени подавления одной из ВВ (обычно подавлялась волна, распространяющаяся по направлению вращения) по сравнению с режимами свободной генерации. Нами было показано, что такая особенность динамики ТКЛ в режимах СМ может быть обусловлена не только созданием разности частот ВВ при вращении ТКЛ, но также невзаимными амплитудными и фазовыми акустооптическими эффектами в АОСМ на стоячей и бегущей УЗ волне за счёт возникновения различных временных сдвигов встречных УКИ от минимума потерь на периоде модуляции, возникающих при отстройке частоты модуляции потерь от межмодовой частоты $|\Delta_M| \neq 0$ и при вращении ТКЛ. При этом разница во временах прохождения встречными УКИ АОСМ приводит к тому, что при изменении знака Δ_M изменяется знак разности эффективных коэффициентов усиления и потерь для встречных УКИ, и, соответственно, знак разности добротностей ВВ.

В § 1.3.2-1.3.3 рассмотрены результаты экспериментальных исследований динамики генерации вращающегося ТКЛ при встречном и попутном взаимодействии ВВ и ВА, создаваемых с помощью внешних отражателей (в том числе с помощью отражателей, осуществляющих квазиобращение волнового фронта), или квазирезонансной ОС. При встречном взаимодействии ВВ и ВА во вращающемся ТКЛ, был обнаружен новый эффект конкурентного взаимодействия УКИ, названный амплитудно-частотной бистабильностью УКИ, обусловленный конкурентными процессами рассеяния встречных УКИ и УКИ автоподсветки на динамических решетках инверсной населенности в АС при создании частотной невзаимности кольцевого резонатора из-за вращения ТКЛ.

В § 1.4 рассмотрены результаты экспериментальных исследований конкурентного взаимодействия встречных УКИ во вращающемся ТКЛ на $YAG:Nd^{3+}$, работающего в режимах акустооптической СМ, с ВА, создаваемой с помощью квазирезонансной дифракционной акустооптической ОС.

Эти исследования позволили установить эффективный способ устранения сильной конкуренции встречных УКИ во вращающемся ТКЛ, а также стабилизировать как режим СМ, так и режим биений. При этом было показано, что стабилизация двунаправленной генерации и разности частот встречных УКИ во вращающемся ТКЛ может быть осуществлена при создании только одной ВА, что позволяет реализовать метод ВА без использования специальных невзаимных амплитудных элементов в цепи ОС. Вместе с тем было установлено, что для выравнивания интенсивностей встречных УКИ в такой несимметричной схеме ТКЛ с одной ВА необходимо было создать начальную амплитудную акустооптическую невзаимность встречных УКИ в АОСМ, что достигается отклонением АОСМ от угла Брэгга.

Показано, что одновременная стабилизация двунаправленной генерации встречных УКИ во вращающемся ТКЛ, режима СМ и сигнала биений ν_b при

использовании только одной ВА обусловлена особенностями дифрагировавшего на АОСМ излучения, а именно: 1) поляризационной развязкой основных и дифрагировавших УКИ, благодаря чему реализуется дифракционная невзаимность цепи акустооптической ОС для встречных УКИ и УКИ автоподсветки, 2) наличием сильного нелинейного чирпа двух (основного и "фонового") дифрагировавших УКИ автоподсветки на периоде модуляции.

В §1.5 приведены результаты экспериментальных исследований конкурентного взаимодействия встречных УКИ в ТКЛ с ВА, создаваемыми антирезонансной акустооптической ОС, реализуемой с самопересекающейся в АОСМ осью кольцевого резонатора под углом α , близким к удвоенному углу Брэгга $\alpha \approx 2\theta_B$ (см. рис. 2 а, б).

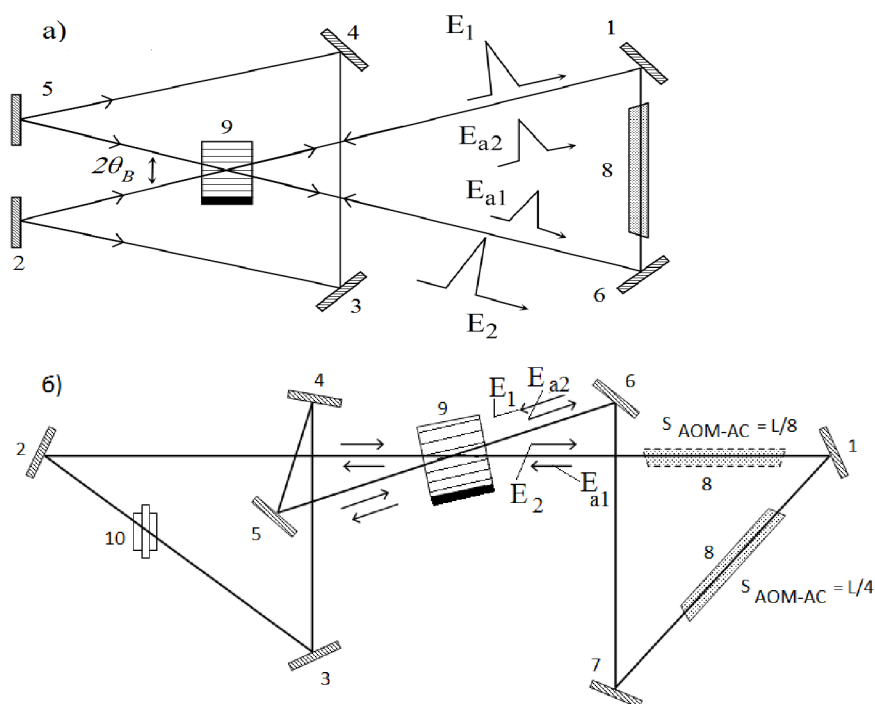


Рис. 2, а, б. Принципиальная (а) и реализованная в эксперименте (б) схемы ТКЛ на $YAG:Nd^{3+}$, работающих в режиме акустооптической СМ с ВА, создаваемыми антирезонансной акустооптической ОС: 1-7 – зеркала кольцевого резонатора вида “восьмерки” а) и “вывернутой восьмёрки” б) для обеспечения: самопересечения оси ТКЛ в АОСМ под двойным углом Брэгга $2\theta_B$ а), б) и чувствительности ТКЛ к вращению б); 8 – АС; 9 – АОСМ на стоячей УЗ волне; 10 – невзаимный частотный фарадеевский элемент.

Показано, что в такой схеме при выборе симметричной геометрии взаимодействия ВВ и ВА в АС (расстояние от АОСМ до АС равно $L/4$) возможна полная компенсация невзаимных акустооптических эффектов. Вместе с тем в асимметричной схеме ТКЛ с антирезонансной акустооптической ОС при расположении АС, например, на расстоянии $L/8$ от АОСМ, возможно управление обнаруженными бифуркационными одноимпульсными режимами, параметрами встречных УКИ и их числом на периоде модуляции при изменении мощности или частоты УЗ волны в АОСМ, а также угловой отстройки от угла Брэгга $|\Delta_B|$.

Вторая глава посвящена исследованию невзаимных эффектов для встречных УКИ и динамики генерации вращающегося ТКЛ при резонансных и нерезонансных периодических возмущениях.

В §2.1 исследовано конкурентное взаимодействие встречных УКИ во вращающихся ТКЛ при наличии невзаимных акустооптических эффектов в условиях дифракции Брэгга на бегущей УЗ волне как при наличии, так и при отсутствии дифракционной акустооптической ОС.

Показано, что для создания компенсирующей амплитудной невзаимности ВВ в ТКЛ с одной ВА можно использовать тот факт, что при брэгговской дифракции ВВ в реальных АОСМ на стоячей УЗ волне, имеющих бегущую компоненту ($\sim 5\%$), при отстройке от угла Брэгга на $|\Delta_B| \approx n\Lambda / 2l$, фазовая невзаимность устраняется, а амплитудная невзаимность, отсутствующая при $|\Delta_B| = 0$, становится максимальной, и ее знак определяется знаком Δ_B (при $\Delta_B > 0$ бóльшие потери имеет ВВ I^- , имеющая проекцию скорости против скорости распространения УЗ волны).

Установлено, что наличие такой начальной акустооптической невзаимности, при неравенстве интенсивностей ВВ в покоящемся ТКЛ, приводит к ситуации когда АХ вращающегося ТКЛ полностью определяются

амплитудной невзаимностью АОСМ, при этом увеличение $|\Omega|$ приводит еще к большему подавлению более слабой волны, и выравнивания интенсивностей встречных УКИ не происходит ни при каких доступных в эксперименте Ω ($|\Omega/2\pi|_{\max} \geq 1$ МГц) (см. рис. 3, кривые 1). Вместе с тем было показано, что величиной и знаком акустооптических невзаимностей ВВ в ТКЛ можно управлять при использовании дифракционной акустооптической ОС с АОМ на бегущей УЗ волне.

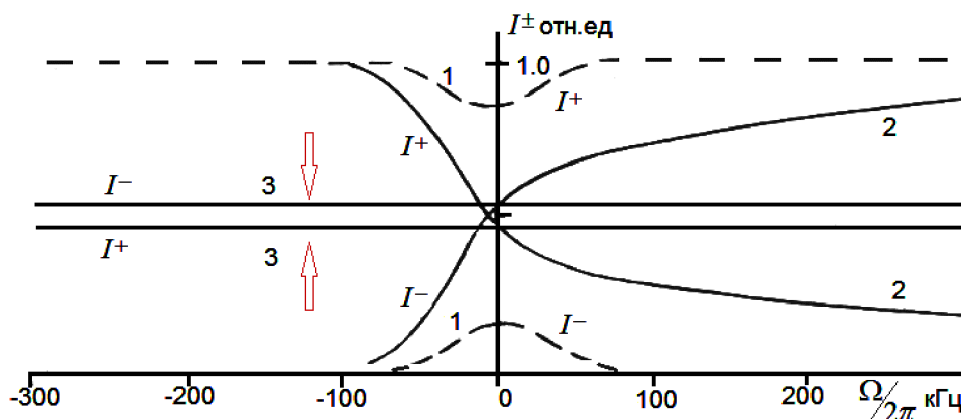


Рис. 3. Характерные экспериментальные зависимости интенсивностей световых встречных волн (ВВ) I^\pm от разности частот резонатора ТКЛ для ВВ Ω во вращающихся ТКЛ на YAG:Nd^{3+} при максимальной амплитудной $\Delta I = (I^- - I^+)/I_{\text{пад}} \approx \Delta I_{\text{MAX}}$ и минимальной фазовой акустооптических невзаимностях $\Delta\Phi = \Phi^- - \Phi^+ \approx 0$, создаваемых акустооптическим модулятором ВВ при дифракции Брэгга на бегущей компоненте стоячей УЗ волны при $\Delta_B^0 = \Theta^0 - \Theta_B \approx n\Lambda/2l \approx +5'$:

Кривые 1 – волна автоподсветки (ВА) отсутствует; Кривые 2, 3 создается одна ВА, получаемая из ВВ большей интенсивности I^\pm (2), или из дифрагировавшего луча большей интенсивности $I^\pm_{\text{Диф}}$ (3). В цепи акустооптической обратной связи, создающих ВА невзаимные амплитудные элементы отсутствуют.

В §2.2 приводятся результаты исследований новых амплитудных и фазовых, постоянных и знакопеременных невзаимных акустооптических эффектов для встречных УКИ при дифракции Брэгга на стоячей ультразвуковой УЗ волне.

Установлено, что главной причиной возникновения акустооптических невязимостей встречных УКИ при взаимодействии со стоячей УЗ волной являются различные временные сдвиги между прохождением встречными УКИ АОМ и минимумом дифракционных потерь Δt_{12} . Исследована возможность управления величиной акустооптических невязимостей за счет изменения как Δt_{12} , так и геометрии акустооптического взаимодействия встречных УКИ со стоячей УЗ волной (см. рис. 4, 5).

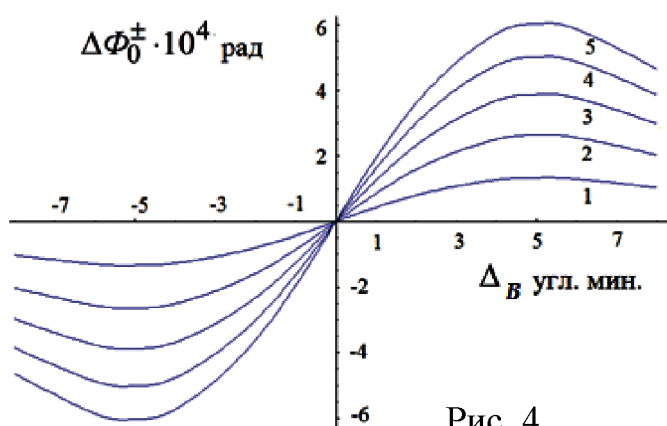


Рис. 4

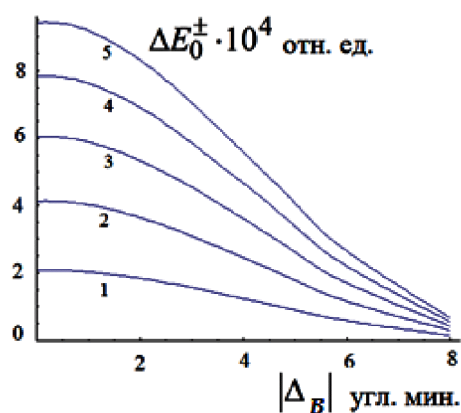


Рис. 5

Рис. 4, 5. Зависимости фазовой $\Delta\Phi_0^\pm = \Phi_0^- - \Phi_0^+$ (рис. 4) и амплитудной $\Delta E_0^\pm = E_0^- - E_0^+$ (рис. 5) невязимостей встречных УКИ на выходе из акустооптического модулятора (АОМ) в нулевом порядке дифракции Брэгга на стоячей УЗ волне от угловой отстройки от угла Брэгга $\Delta_B = \theta - \theta_B$ при различных временных сдвигах между прохождением УКИ АОМ и минимумом дифракционных потерь $\Delta t_\pm = |t_\pm - t_M|$, $\Delta t_\pm = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ нс (кривые 1, 2, 3, 4, 5).

Показано, что независимо от знака Δ_B , АОСМ вносит большие потери для УКИ, проходящих АОСМ с опережением относительно минимума модулирующего напряжения, по сравнению с потерями для УКИ встречного направления. Вместе с тем фазовая невязимость встречных УКИ знакопеременна: направление, в котором УКИ получают больший фазовый набег, определяется знаком Δ_B . При $\Delta_B > 0$ фазовый набег для отстающих

УКИ Φ_0^- больше, чем у опережающих, и наоборот. Таким образом, установлено, что АОМ на стоячей УЗ волне может одновременно выполнять двойную функцию - АОСМ и невзаимного амплитудного и фазового элемента, эффективность которого определяется, в частности, угловой отстройкой от угла Брэгга Δ_B и временной задержкой между прохождением УКИ АОМ и минимумом потерь на периоде модуляции Δt_{12} .

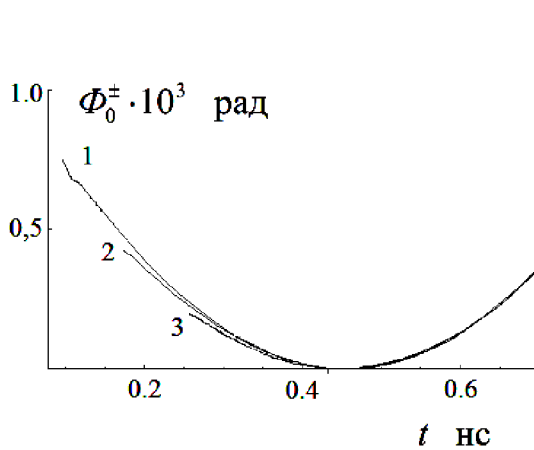


Рис. 6

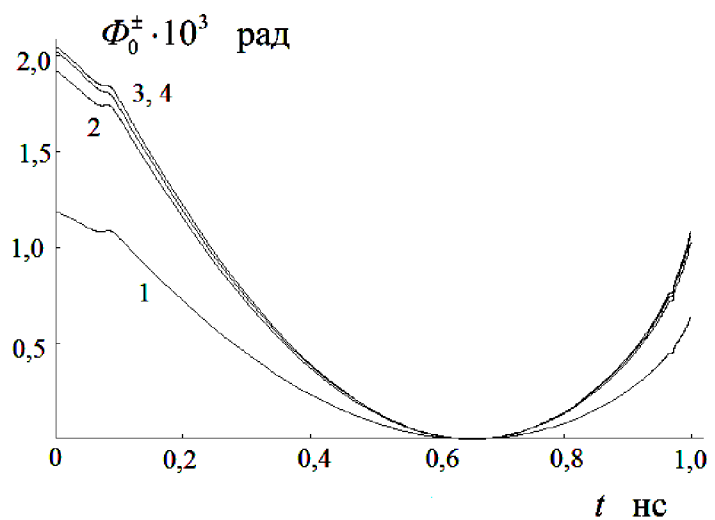


Рис. 7

Рис. 6, 7. Зависимости медленно меняющихся фаз встречных (\pm) УКИ от времени $\Phi_0^\pm(t) = \text{Arg} \tilde{E}_0(t)$ на выходе из акустооптического модулятора (АОМ) в нулевом порядке дифракции Брэгга на стоячей УЗ волне при $\Delta_B = 5'$ для отстающих ($t_- > t_M$) УКИ при разных временных сдвигах между прохождением УКИ АОМ и минимумом дифракционных потерь $\Delta t_\pm = |t_\pm - t_M|$, $\Delta t_- = 0; 0,3; 0,4$ нс, (кривые 1, 2, 3) (рис. 6) и для опережающих ($t_+ < t_M$) УКИ, $\Delta t_+ = 0,4$ нс при различных отстройках от угла Брэгга $\Delta_B = \theta - \theta_B = 2'; 4'; 6'; 5'$ (кривые 1, 2, 3, 4) (рис. 7).

Вместе с тем нами был обнаружен и исследован невзаимный чирп встречных УКИ при дифракции Брэгга на стоячей УЗ волне. Показано, что для встречных УКИ невзаимность по чирпу нелинейна и имеет место при условии отсутствия фазового синхронизма $\Delta_B \neq 0$, при этом установлены зависимости величины и знака чирпа УКИ от временных сдвигов между прохождением

УКИ АОМ и экстремумом модулирующего напряжения Δt_{12} , а также отстройки угла падения света на АОМ от угла Брэгга Δ_B (см. рис. 6, 7).

Установлено, что при отсутствии фазового синхронизма $\Delta_B \neq 0$ знак чирпа определяется знаком Δ_B , причем для переднего и заднего фронта УКИ знак чирпа различен.

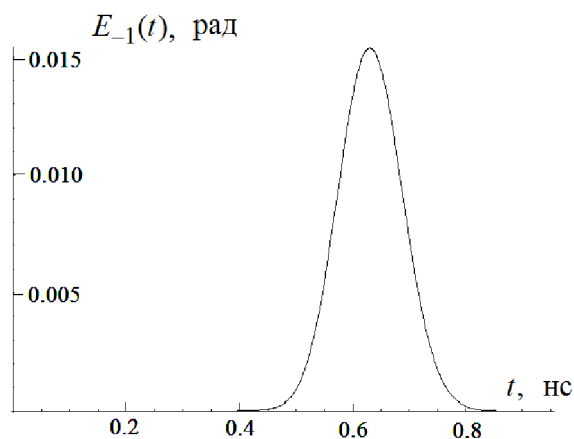


Рис. 8

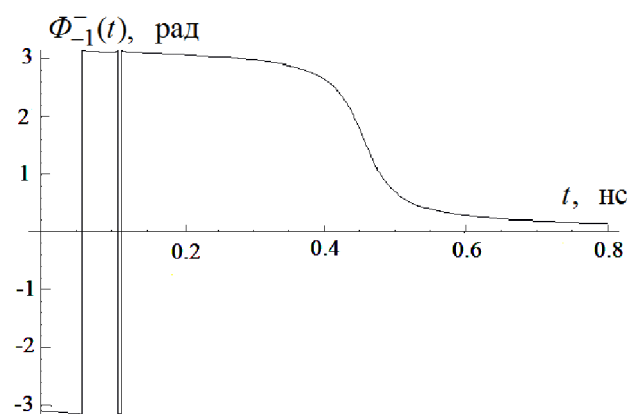


Рис. 9

Рис. 8, 9. Зависимости медленно меняющихся амплитуды поля $E_{-1}(t)$ (рис. 8) и фаз $\Phi_{-1}^{-}(t) = \text{Arg}\tilde{E}_{-1}(t)$ (рис. 9) дифрагировавших отстающих ($t_- > t_M$, временной сдвиг между прохождением УКИ АОМ и минимумом дифракционных потерь $\Delta t_- = |t_- - t_M| = 0.1$ нс) УКИ с параметрами $\beta = 0$, $\varphi = 0$, $\alpha = 1,4 \cdot 10^{-20}$, что соответствует длительности УКИ $\tau = [(2 \ln 2) / \alpha]^{1/2} \approx 0,14$ нс, на выходе из акустооптического модулятора (АОМ) в -1 порядке дифракции Брэгга от времени при отстройке от угла Брэгга $\Delta_B = \theta - \theta_B = 5'$.

Кроме того нами был обнаружен эффект сильного чирпа УКИ, проходящих через АОСМ в минус первом порядке дифракции. Показано, что этот эффект можно использовать для стабилизации режима биений и СМ во вращающемся ТКЛ с сильной конкуренцией ВВ при создании УКИ автоподсветки за счет эффективного усреднения инверсной населенности и поля излучения в резонаторе лазера (см. рис.8, 9).

Теоретически установлена возможность управления как фазой, так и амплитудой световых волн в нулевом и минус первом порядках дифракции в АОМ на стоячей УЗ волне за счёт изменения амплитуды УЗ волны и угла падения света на АОМ (см. рис. 10, 11). В частности, показано, что при некоторой угловой отстройке от угла Брэгга $\Delta_B = \Delta_B^0$, величина которой определяется длиной АОМ и не зависит от мощности УЗ волны, фазовый набег проходящей через АОМ волны Φ_0 имеет экстремум, знак которого определяется знаком отстройки Δ_B , а фазовый набег световой волны в минус первом порядке дифракции Φ_{-1} может быть устранен.

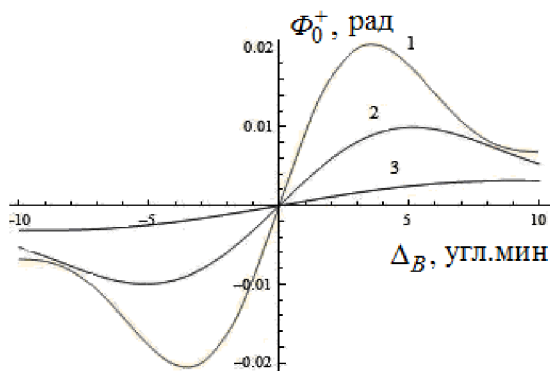


Рис. 10

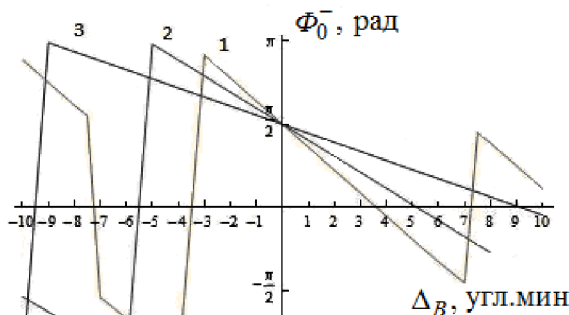


Рис. 11

Рис. 10, 11. Зависимости фазовых набегов в нулевом $\Phi_0(\Delta_B) = \text{Arg}\tilde{E}_0(\Delta_B)$ (рис. 10) и минус первом $\Phi_{-1}(\Delta_B) = \text{Arg}\tilde{E}_{-1}(\Delta_B)$ (рис. 11) порядках дифракции на выходе акустооптического модулятора (АОМ) на стоячей УЗ волне в режиме дифракции Брэгга от угловой отстройки от угла Брэгга $\Delta_B = \theta - \theta_B$. Расчёты проводились при следующих параметрах АОМ со светозвукопроводом из плавленного кварца:

$$l \times h = 23,5 \times 5 \text{ мм}, \quad \lambda = 1,0641 \text{ мкм}, \quad n = \varepsilon_0^{1/2} = 1,4497, \quad \Lambda = 47,68 \text{ мкм}.$$

$$u_{\text{УЗ}} = 5,95 \cdot 10^5 \text{ см/с}, \quad \Omega/2\pi = 125 \text{ МГц}, \quad M_2 = 1,56 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\Gamma, \quad P_{\text{УЗ}} = 1 \text{ Вт}.$$

В §2.3 приводятся результаты исследований взаимодействия встречных УКИ во вращающихся ТКЛ в режимах нестационарной СМ, имеющей место при достаточно больших отстройках частоты модуляции от межмодовой

частоты $0,2 \text{ кГц} \leq |\Delta_M| \leq 100 \text{ кГц}$ и характеризующейся наличием синфазной модуляции интенсивностей встречных УКИ на частотах $|\Delta_M|$ и ее гармониках $f_C = k|\Delta_M|$, ($k_{MAX} \sim 10$).

Экспериментально обнаружен эффект различного временного сдвига встречных УКИ от минимума потерь на периоде модуляции при изменении разности частот ВВ во вращающемся ТКЛ в режиме нестационарной СМ. Показано, что наличие такой разности времен прохождения встречными УКИ АОСМ, а также смещения центра спектров мод УКИ к центру линии усиления АС обеспечивает автостабилизацию двунаправленной генерации во вращающемся ТКЛ. Вместе с тем нами были установлены новые возможности регистрации невзаимных оптических эффектов с помощью ТКЛ – по величине расщепления спектров частот: 1) синфазной модуляции интенсивностей ВВ $f_C(\Omega = 0) = k|\Delta_M|$ в режимах нестационарной СМ и 2) релаксационных синфазных колебаний интенсивностей ВВ $\{f_{PI,PII}(\Omega = 0) = f_P, f_P/\sqrt{2}\}$ в режимах стационарной СМ.

Третья глава посвящена детальному рассмотрению результатов исследований ЧХ вращающихся ТКЛ на YAG:Nd^{3+} с ВА, т.е. зависимости разности оптических частот ВВ (частоты биений ν_b) от разности частот кольцевого резонатора для ВВ Ω , при устранении конкуренции встречных УКИ с помощью акустооптической квазирезонансной ОС (см. § 3.1) и антирезонансной ОС (см. § 3.2).

Установлено, что основным физическим механизмом, определяющим искажения ЧХ вращающегося ТКЛ с ВА, создаваемых с помощью акустооптической квазирезонансной ОС (см. рис. 12), является изменение эффективной связи встречных УКИ вследствие временных сдвигов встречных УКИ от минимума потерь на периоде модуляции ($t_{\pm} \geq L/4c$, $t_+ \neq t_-$) при

изменении как отстройки частоты модуляции Δ_M (см. рис. 13), так и частотной невзаимности кольцевого резонатора Ω .

Установлено, что ЧХ ТКЛ $\nu_b(\Omega)$ с квазирезонансной акустооптической ОС может быть приближена к идеальной ЧХ КЛ $\nu_b = |\Omega / 2\pi|$, вдали от области захвата ($\Omega \gg \Omega_0$) при оптимизации параметров ТКЛ (в том числе, $\Delta_M, \Delta\theta_B$).

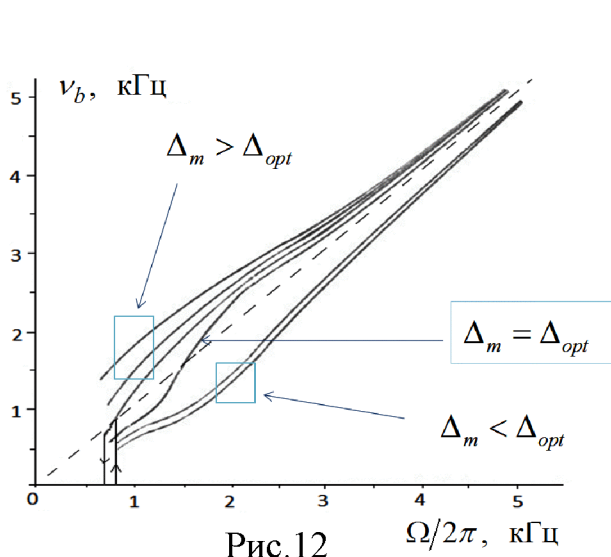


Рис.12

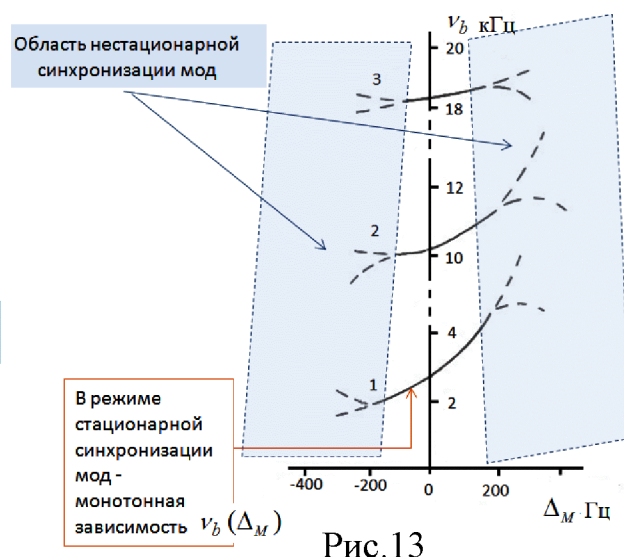


Рис.13

Рис. 12. Характерные экспериментальные зависимости разности частот ВВ ν_b от разности частот кольцевого резонатора для ВВ Ω во вращающемся ТКЛ на YAG:Nd^{3+} в режимах стационарной акустооптической СМ ($|\Delta_M| \leq 200$ кГц) со стабилизацией двунаправленной генерации одной ВА, создаваемой с помощью квазирезонансной акустооптической ОС, при различных значениях отстройки частоты модуляции потерь от межмодовой частоты $\Delta_M = |f_M - c/L|$.

Область захвата ВВ $\Omega_0/2\pi \approx 600$ Гц. Верхние кривые - $\Delta_M \approx 200$ Гц; средние кривые - $\Delta_M \approx 0$; нижние кривые - $\Delta_M \approx -200$ Гц. Пунктирная прямая – идеальная ЧХ КЛ.

Рис. 13. Характерные экспериментальные зависимости разности частот ВВ ν_b от отстройки частоты модуляции потерь от межмодовой частоты $\Delta_M = |f_M - c/L|$ во вращающемся ТКЛ на YAG:Nd^{3+} в режимах акустооптической СМ со стабилизацией двунаправленной генерации одной ВА, создаваемой с помощью квазирезонансной акустооптической ОС, при различных значениях разности частот кольцевого резонатора Ω .

$\Omega/2\pi \approx 3; 10; 18$ кГц (кривые 1, 2, 3). Ширина области захвата частот ВВ $\Omega/2\pi \approx 500$ Гц.

Показано, что “восьмеркообразная” геометрия резонатора ТКЛ, за счет которой реализуется антирезонансная акустооптическая ОС, при значительном возрастании акустооптических невзаимных эффектов в АОСМ при наличии акустооптической ОС, приводит к очень сильной зависимости ЧХ $\nu_b(\Omega)$, а также электромагнитного поля встречных УКИ от асимметрии резонатора, величины отклонения АОСМ от угла Брэгга $\Delta\theta_B$, отстройки частоты модуляции от двойной межмодовой частоты $\Delta_M = (f_M - 2c/L)$.

В §3.3 приводятся результаты экспериментальных ЧХ вращающегося ТКЛ с ВА при нестационарной дифракционной акустооптической ОС, создаваемой за счет колебаний отражателя (диэлектрического зеркала или призмы, поворачивающей изображение на 180^0) в цепи ОС.

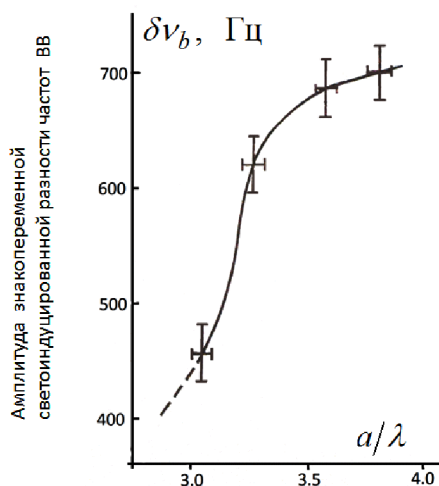


Рис. 14. Экспериментальная зависимость амплитуды знакопеременной светоиндуцированной разности частот встречных волн (ВВ) $\delta\nu_b$ в ТКЛ на $YAG:Nd^{3+}$ в режиме акустооптической синхронизации мод (СМ) со стабилизацией двунаправленной генерации УКИ автоподсветки, создаваемыми с помощью нестационарной акустооптической обратной связи (ОС), от относительной амплитуды колебаний отражателя a/λ в цепи ОС:

Частота колебаний отражателя $f_k \approx 20$ Гц, начальная разность частот ВВ $\nu_{b,0} \approx 8$ кГц. Область захвата частот ВВ $\Omega_0/2\pi \approx 300$ Гц, $c/L \approx 250$ МГц, $\tau_{УКИ} \approx 0.1$ нс.

При этом были обнаружены: а) новые светоиндуцированные знакопеременные и постоянные оптические эффекты при медленной самодифракции УКИ автоподсветки в АС ТКЛ, имеющие место при небольших доплеровских сдвигах оптической частоты УКИ автоподсветки ($\Delta\nu_D \leq 100$ кГц) и малых частотах колебаний отражателя в цепи ОС ($f_K \leq 1/T_1$) (см. рис. 14) и б) эффекты стабилизации сигнала ν_b как в режиме ЧМ УКИ при $\eta f_K \approx m|\Delta_M|$, так и в режиме стационарной СМ $\Delta_M \approx 0$ при $f_p < f_K \leq \eta\omega/Q$.

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты и выводы.

1. Установлено, что стабилизация режима биений – двунаправленной генерации с разными частотами ВВ во вращающемся ТКЛ с однородно-уширенной линией усиления и медленной релаксацией инверсной населённости АС (лазер типа В), работающем в режиме акустооптической СМ может быть осуществлена: во-первых, с помощью одной ВА, создаваемой квазирезонансной акустооптической ОС при возвращении на АОСМ дифрагировавшего в нём луча большей интенсивности, и при создании в такой несимметричной схеме ТКЛ начальной амплитудной невзаимности для ВВ за счёт отклонения АОСМ от угла дифракции Брэгга; во-вторых, с помощью двух ВА, создаваемых антирезонансной акустооптической ОС в симметричных кольцевых резонаторах типа “восьмерки” и АОСМ, помещенным в области пересечения оси кольцевого резонатора.

В то же время, наряду с эффектами автостабилизации, были обнаружены интересные с точки зрения нелинейной динамики оптических систем новые виды конкурентного взаимодействия УКИ - управляемые режимы с несколькими УКИ на периоде модуляции, а также бифуркационные одноимпульсные режимы. Эти эффекты наблюдались в асимметричных схемах ТКЛ с ВА: а) в ТКЛ с “восьмёркообразным” резонатором при расположении АОСМ,

например, на расстоянии $L/8$ (а не, как обычно, на $L/4$) от АС (L - периметр ТКЛ) и б) в ТКЛ с одной ВА без дифракционной акустооптической ОС.

2. Установлено, что основными причинами, приводящими к одновременной стабилизации во вращающемся ТКЛ на $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ режимов СМ и биений при использовании вместо двух только одной ВА, являются особенности дифрагировавшего в АОСМ излучения, а именно: 1) поляризационная развязка основных и дифрагировавших УКИ, благодаря чему реализуется дифракционная невзаимность цепи акустооптической ОС для встречных УКИ и УКИ автоподсветки, 2) обнаруженный эффект сильного нелинейного чирпа основного и "фонового" дифрагировавших УКИ автоподсветки, благодаря чему достигается эффективное усреднение инверсной населенности и поля излучения в резонаторе лазера.

Показано, что для создания компенсирующей амплитудной невзаимности ВВ в ТКЛ с одной ВА можно использовать тот факт, что при брэгговской дифракции ВВ в реальных АОСМ на стоячей УЗ волне, имеющих бегущую компоненту ($\sim 5\%$), при отстройке от угла Брэгга на $|\Delta_B| \approx n\Lambda / 2l$, фазовая невзаимность устраняется, а амплитудная невзаимность имеет максимум.

3. Теоретически показано, что при дифракции Брэгга на стоячей УЗ волне для встречных УКИ имеют место невзаимные амплитудные и фазовые акустооптические эффекты, обусловленные разными временными сдвигами между временами прохождения встречными УКИ АОСМ и минимумом дифракционных потерь на периоде модуляции Δt_{12} . При этом величиной и знаком таких акустооптических невзаимностей можно управлять за счет изменения как Δt_{12} , так и геометрии акустооптического взаимодействия. Установлено, что независимо от знака отстройки от угла Брэгга $|\Delta_B|$, АОСМ вносит большие потери для УКИ, проходящих АОСМ с опережением относительно минимума модулирующего напряжения, по сравнению с потерями для УКИ встречного направления. Вместе с тем знак фазовой невзаимности определяется знаком

Δ_B . При $\Delta_B > 0$ фазовый набег для отстающих УКИ Φ_0^- больше, чем у опережающих, и наоборот.

4. Теоретически установлено, что парциальные величины акустооптических невзаимностей, возникающих при взаимодействии световых ВВ с бегущими и стоячими УЗ волнами могут быть сопоставимы, а их общее влияние на соотношение интенсивностей встречных УКИ в зависимости от направления распространения бегущей компоненты УЗ волны и разности времён прохождения через АОСМ в отсутствие фазового синхронизма акустооптического взаимодействия ($|\Delta_B| \neq 0$) может как усиливаться, так и ослабляться.

При этом набег фазы световой волны в нулевом порядке дифракции Φ_0 при прохождении через АОСМ на стоячей УЗ волне имеет экстремум, знак которого определяется знаком отстройки $|\Delta_B|$, а фазовый набег в минус первом порядке дифракции Φ_{-1} может быть устранен.

5. Теоретически показано, что при дифракции Брэгга на стоячей УЗ волне в нулевом и минус первом порядках дифракции в отсутствие фазового синхронизма акустооптического взаимодействия ($|\Delta_B| \neq 0$) встречные УКИ имеют невзаимный чирп. Установлены зависимости величины и знака чирпа переднего и заднего фронта УКИ в нулевом порядке дифракции от временных сдвигов между прохождением УКИ АОСМ и от отстройки от угла Брэгга.

6. Экспериментально обнаружен эффект разных временных сдвигов встречных УКИ от минимума потерь на периоде модуляции при изменении разности частот ВВ во вращающемся ТКЛ в режиме нестационарной СМ, позволяющий устранить подавление одной из ВВ во вращающемся ТКЛ за счет создания больших потерь для УКИ с большей интенсивностью.

7. Экспериментально показано, что ЧХ вращающегося ТКЛ с квазирезонансной акустооптической ОС может приближаться к идеальной ЧХ КЛ $\nu_b = |\Omega / 2\pi|$ вдали от области захвата ($\Omega \gg \Omega_0$) при оптимизации параметров

ТКЛ (в т. ч., отстройки частоты модуляции от межмодовой частоты, величины отклонения АОСМ от угла Брэгга).

При этом уже в покоящихся ТКЛ обнаружены новые невязимные светоиндуцированные эффекты - постоянные и знакопеременные разности частот ВВ при медленной нестационарной самодифракции УКИ автоподсветки, получаемой при небольших доплеровских сдвигах их оптической частоты ($\Delta \nu_D \leq 100$ кГц) и малых частотах колебаний отражателя в цепи ОС ($f_K \leq 1/T_1$).

Диссертация основывается на следующих публикациях:

1. *Кравцов Н.В., Парфенов, С.В., Шелаев А.Н.* Твердотельный кольцевой лазер. - Авторское свидетельство СССР № 1538845, приоритет от 20.01.1988.

2. *Кравцов Н.В., Парфенов, С.В., Шелаев А.Н.* Амплитудно-частотные характеристики вращающегося твердотельного кольцевого лазера в режимах нестационарной акустооптической синхронизации мод. - Квантовая электроника, 1988, т. 15, № 12, с. 2434-2440.

3. *Кравцов Н.В., Парфенов, С.В., Шелаев А.Н.* Твердотельный кольцевой лазер. - Авторское свидетельство СССР № 1628799, приоритет от 21.02.1989.

4. *Кравцов Н.В., Парфенов, С.В., Шелаев А.Н.* Твердотельный кольцевой лазер. - Авторское свидетельство СССР № 1760932, приоритет от 02.04.1990.

5. *Кравцов Н.В., Клочан Е.Л., Парфенов С.В., Ларионцев Е.Г., Шелаев А.Н.* Твердотельный кольцевой лазер. - Авторское свидетельство СССР № 1759210, приоритет от 02.04.1990.

6. *Корниенко Л.С., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Парфенов С.В., Шелаев А.Н.* Твердотельный кольцевой лазер с волнами автоподсветки и обратной дифракционной акустооптической связью. - Препринт НИИ ядерной физики МГУ №89-27/104, М., 1989, с. 1-43.
7. *Кравцов Н.В., Парфенов С.В., Шелаев А.Н.* Твердотельный кольцевой лазер с волнами автоподсветки и дифракционной акустооптической обратной связью. - Известия АН СССР, сер. физическая, 1990, т. 54, № 12, с. 2414-2419.
8. *Веселовская Т.В., Ключан Е.Л., Ларионцев Е.Г., Парфенов С.В., Шелаев А.Н.* Амплитудная и фазовая невязимности акустооптических модуляторов для встречных световых волн при дифракции Брэгга. - Квантовая электроника, 1990, т. 17, № 7, с. 823-828.
9. *Кравцов Н.В., Парфенов С.В., Шелаев А.Н.* Твердотельный кольцевой лазер с волнами автоподсветки и дифракционной акустооптической обратной связью. - Тезисы докл. VI Всесоюз. конф. "Оптика лазеров", Ленинград, 1990, с. 258. Известия АН СССР, сер. физическая, 1990, т. 54, № 12, с. 2414-2419.
10. *Палеев М.Р., Парфенов С.В.* Стабилизация режима биений в твердотельном кольцевом лазере с помощью волн автоподсветки. Тезисы докладов III Всесоюзной конф. молодых ученых и специалистов "Теоретическая и прикладная оптика", Ленинград, 1988, с. 63-64.
11. *Кравцов Н.В., Парфенов С.В., Шелаев А.Н.* Твердотельный кольцевой лазер с волнами автоподсветки и антирезонансной дифракционной акустооптической обратной связью. - Квантовая электроника, 1990, т. 17, № 11, с. 1408-1411.
12. *Кравцов Н.В., Парфенов С.В., Шелаев А.Н.* Стабилизация режима биений и знакопеременная оптическая невязимность при нестационарной са-

модифракции волн автоподсветки в активной среде твердотельного кольцевого лазера. - Квантовая электроника, 1991, т. 18, № 1, с. 76-78.

13. *Кравцов Н.В., Парфенов С.В., Шелаев А.Н.* Частотные характеристики твердотельного кольцевого лазера с волнами автоподсветки в режиме синхронизации мод. - Квантовая электроника, 1991, т. 18, № 5, с. 566-571.

14. *Парфёнов С.В., Шелаев А.Н.* Фазовые характеристики брэгговских акустооптических модуляторов на стоячей ультразвуковой волне. - Естественные и технические науки, 2011, № 4, с. 45-47.

15. *Парфёнов С.В., Шелаев А.Н.* Невзаимные оптические эффекты для встречных световых УКИ при дифракции Брэгга на стоячей ультразвуковой волне. - Естественные и технические науки, 2011, № 5, с. 22-26.

16. *Парфёнов С.В., Шелаев А.Н.* Стабилизация режима биений во вращающемся кольцевом лазере на $YAG:Nd^{3+}$ с помощью УКИ автоподсветки с чирпом оптической частоты, создаваемом в синхронизаторе мод на стоячей ультразвуковой волне. Материалы VI Международной научно-практической конференции "Современное состояние естественных и технических наук", М., 20.03.2012, с. 22-27.

17. *Парфёнов С.В., Шелаев А.Н.* Управление взаимодействием встречных УКИ во вращающихся твердотельных кольцевых лазерах на $YAG:Nd^{3+}$ с помощью акустооптических обратных связей и невзаимных эффектов. Материалы VIII Международной научно-практической конференции "Современное состояние естественных и технических наук", М., 14.09.2012, с. 10-21.

Список сокращений (ключевых слов):

ТКЛ (ГКЛ) – твёрдотельный (газовый) кольцевой лазер

АЧХ – амплитудно-частотные характеристики

УКИ – ультракороткие импульсы света

ВВ – встречные волны

ВА – волны автоподсветки

ОС - обратная связь

СМ – синхронизация мод

АОСМ – акустооптический синхронизатор мод

АОМ - акустооптический модулятор

УЗ волна – ультразвуковая волна

Подписано в печать: 17.12.2012

Объем: 1,0 п.л.

Тираж: 100 экз. Заказ № 69686

Отпечатано в типографии «Реглет»

119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 39

(495) 363-78-90; www.reglet.ru