

На правах рукописи

Мело Мельчор Гастон

**Вынужденное комбинационное рассеяние света в оптических
волокнах, допированных германием и фосфором.**

(Специальности : 01.04.04 – Физическая электроника,
01.04.21 – Лазерная физика)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт – Петербург - 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования
“Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Петров Михаил Петрович.

Официальные оппоненты : доктор физико-математических наук, профессор
Бережной Анатолий Алексеевич,
доктор физико-математических наук, профессор
Котов Олег Иванович.

Ведущая организация Федеральное Государственное Унитарное предприятие
«Научно-исследовательский и технологический институт
оптического материаловедения Всероссийского научного
центра «ГОИ им.С.И.Вавилова»

Защита состоится “ февраля 2007 года в 16 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.229.01 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет” по адресу :195251, Санкт –Петербург, Политехническая
ул., д.29, второй учебный корпус , ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-
Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан “ декабря 2006 года .

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.01
д.т.н , проф.



Коротков А.С.

2009 А
2275

Общая характеристика работы

Актуальность. Появление лазерной техники привело к бурному развитию исследований в области нелинейной оптики, в частности, к открытию таких явлений, как генерация второй гармоники, комбинационное рассеяние света и др. Дополнительным толчком для нелинейно-оптических исследований послужило развитие световолоконных линий связи [1]. Хотя силикатное стекло (плавленый кварц) является изотропной средой и нелинейно-оптические явления второго порядка в нем в отличие от многих кристаллов запрещены (в силу требований симметрии), тем не менее, оптическое волокно оказалось исключительно важным объектом для нелинейной оптики. Это связано с тем, что, во-первых, в волокне оптическое излучение сосредоточено на малой площади (приблизительно площади сечения сердцевинки волокна), и, поэтому, даже сравнительно небольшие мощности света, вводимого в волокно, обеспечивают гигантские интенсивности света в сердцевинке волокна, и, во-вторых, благодаря малому поглощению света в волокне обеспечивается большая длина (масштаб километра) взаимодействия света с веществом [2]. Подобная ситуация исключительна благоприятна для изучения (и использования) нелинейно-оптических эффектов, хотя, с другой стороны, те же самые нелинейные эффекты могут играть и негативную роль в линиях связи, приводя к перекрестным помехам снижению отношения сигнал/шум. Так существование довольно слабого эффекта Керра позволило, тем не менее, позволило успешно изучать оптические солитоны в оптическом волокне. Возможность возбуждать с помощью умеренных мощностей такие нелинейные эффекты, как вынужденное рассеяние Манделштама - Бриллюэна и вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) света, привело к созданию оптических усилителей [3,4], ВКР лазеров (в том числе перестраиваемых) [5,6], разнообразных нелинейных устройств, в частности, оптических логических элементов [7,8], и датчиков.

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.-Петербург
03 2001...

Настоящая работа посвящена исследованию явления ВКР в оптических волокнах, допированных (легированных) примесями германия и фосфора. Необходимость в таких исследованиях вызвана тем, что различные примеси в кварцевом волокне позволяют оптимизировать свойства этих волокон, что обеспечивает их более широкое практическое применение. Кроме того, эти исследования представляют самостоятельный фундаментальный интерес с точки зрения изучения физических механизмов ВКР, природы микро дефектов и особенностей структуры оптического волокна[9-12], дальнейшей разработки теории нелинейных явлений. Исследования ВКР можно проводить в двух режимах. Один – это, так называемый, режим усиления, когда на вход волокна подается оптический сигнал на частоте стоксова излучения и исследуются свойства усиленного сигнала на выходе волокна. Второй – это режим генерации, когда на входе нет специального сигнала, но, тем не менее, на выходе возникает вынужденное стоксово излучение за счет усиления спонтанного стоксова излучения. В настоящей работе изучался только режим генерации, причем в условиях мощной накачки, когда генерация стоксова излучения была настолько эффективна, что имелась возможность наблюдать несколько порядков вынужденного стоксова излучения. Измерения проводились в импульсном режиме. Была разработана экспериментальная установка и проведены исследования ВКР в оптических волокнах как номинально чистых, так и с примесями германия и фосфора. Полученные результаты позволили сделать достаточно однозначные выводы о природе дефектов, ответственных за дополнительные линии в спектрах ВКР, и обнаружить ангармонизм колебаний молекулярных групп образующих силикатное волокно.

Цель работы. Изучение явления ВКР в оптических волокнах, допированных германием и фосфором, с целью выяснения стекольной структуры этих волокон и установления корреляций между спектрами ВКР и химическим составом изучаемых волокон. Для решения поставленной задачи необходимо разработать экспериментальную

установку для изучения ВКР в импульсном режиме, провести тестовые измерения ВКР в различных волокнах и при различных условиях возбуждения ВКР с тем, чтобы убедиться в работоспособности установки и в достоверности получаемых результатов, изготовить световолокна высокого оптического качества с различной концентрацией легирующих примесей (германий и фосфор), выполнить измерения ВКР в этих волокнах и дать объяснение полученным результатам.

Научная новизна. В работе получены новые экспериментальные данные для волокон, содержащих германий. Впервые проведено сопоставление ВКР для волокон с различной концентрацией германия (10 и 45 молярных процента). Впервые указано на возможность новых механизмов ангармоничности колебаний молекул в кварцевом волокне. Впервые указано на возможность вклада стоковского излучения третьего порядка в ВКР спектры в волокнах, содержащих фосфор. Кроме того, совокупность всех полученных результатов позволила более достоверно интерпретировать связь наблюдаемых спектров ВКР с определенными типами молекулярных колебаний в кварцевом стекле.

Практическая значимость работы. В результате проведенных исследований получены данные о спектрах ВКР, которые могут быть использованы при конструировании ВКР лазеров и ВКР усилителей, поскольку полученные результаты помогают установить, какие именно и в каком количестве надо вводить примеси в кварцевое волокно, чтобы получить необходимую полосу пропускания ВКР усилителя или частоту генерации ВКР лазера. Полученные результаты представляют интерес также для технологии изготовления кварцевых волокон, так как дают информацию о типе микродефектов, которые возникают (или наоборот исчезают) при введении в кварцевое волокно примеси германия или фосфора.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Импульсная ВКР спектроскопия является мощным средством изучения свойств оптических волокон и молекулярных колебаний в этих волокнах.
2. Допирование волокон германием приводит к уменьшению числа дефектов, связанных с немостиковым кислородом.
3. Допирование волокон фосфором приводит к увеличению числа дефектов, связанных с немостиковым кислородом.
4. Имеется ангармонизм колебаний тетраэдрических групп SiO_2 , причем ангармонизм уменьшается с увеличением концентрации примеси германия.

Достоверность и надежность результатов основана на том, что, во-первых, были проведены тестовые измерения, позволившие убедиться в надежности и достоверности экспериментальных данных, полученных с помощью разработанной установки. Во-вторых, на том, что сопоставление полученных тестовых измерений вполне удовлетворительно согласуется с литературными данными. В-третьих, на том, что полученные оригинальные результаты не противоречат надежно установленным ранее опубликованным данным, что позволило выдвинуть физическую модель наблюдаемых явлений, которая непротиворечиво объясняет как новые оригинальные данные, так и уже известные результаты.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ, в том числе: одна статья в рецензируемом журнале, входящем в перечень ВАК РФ; одна статья в рецензируемом международном журнале [A1, A2], а также три доклада на международных конференциях [A3- A5].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 100 стр., куда включены 25 рисунков и 75 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы.

Первая глава посвящена обзору литературы и содержит формулировку постановки задачи. В этой главе даны краткие сведения о важнейших параметрах оптических волокон, используемых для систем оптической связи, введены необходимые термины и даны соответствующие определения. Затем качественно рассматривается физическая природа явления вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Наибольшее внимание уделено возможным применениям явления ВКР. Это обусловлено тем, что в настоящее время оптические усилители на основе ВКР активно исследуются во многих научных центрах, эти усилители уже находят широкое практическое применение. Большой практический интерес представляют также ВКР лазеры. При изготовлении оптических волокон широко используется допирование окиси кремния окислами германия, фосфора и других элементов для придания волокну наперед заданных свойств. Германий является главной примесью для создания требуемого профиля показателя преломления в сердцевине волокна. Хорошо известно также, что допирование германием обеспечивает повышение коэффициента усиления в волоконных усилителях на основе вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР) [6]. Этот коэффициент относительно невелик (порядка $5 \text{ дБ км}^{-1} \text{Вт}^{-1}$) в стандартных волокнах, которые содержат около 4 молярных процента GeO_2 , но может возрасти с увеличением концентрации германия. Так допирование 75% (молярных) GeO_2 увеличивает коэффициент усиления для излучения со стоксовым сдвигом в 440 см^{-1} до $300 \text{ дБ км}^{-1} \text{Вт}^{-1}$ [6].

Кроме того, исследования ВКР весьма полезны для уточнения микроструктуры кварцевых волокон и для выяснения природы микро дефектов в волокнах, что представляет интерес для оптимизации технологии изготовления кварцевых волокон

[9,10]. Именно большая практическая ценность данных, получаемых из измерений ВКР в кварцевых волокнах, делает весьма актуальными тему диссертации.

Вторая глава содержит описание установки, на которой производились измерения, и приводятся основные экспериментальные данные.

В качестве источника возбуждения ВКР использовано излучение второй гармоники лазера на алюмо-иттриевом гранате, активированном ионами Nd^{3+} (фирменная марка лазера ЛТИПЧ-6). Лазер позволял работать как в квазинепрерывном режиме с частотой следования импульсов 12,5Гц, так и в режиме псевдоодиночных импульсов. Длительность псевдоимпульса составляла $\Delta t=15$ нс. Пиковая мощность излучения $P=0,01-0,5$ Вт, длина волны второй гармоники $\lambda=532$ нм, ширина линии излучения $\gamma \approx 0,2$ см⁻¹. На выходе лазера устанавливался оптический фильтр, отсекающий остаточное излучение на длине волны 1,06мкм.

Детальный анализ временной огибающей импульса накачки, выполненный с помощью быстродействующей камеры 'АГАТ', имеющей временное разрешение ± 2 пс, (разработка ВНИИОФИ), показал, что 15 -ти наносекундная огибающая импульса накачки представляет собой последовательность импульсов более короткой длительности ($\Delta t_p=35$ пс ± 2 пс), сгруппированных в пачки длительностью 1-1,5нс.

Модовый состав излучения лазера накачки варьировался подстройкой резонатора лазера, а в отдельных случаях для подстройки вводились селективирующие элементы (диафрагмы различного диаметра) внутрь оптического резонатора лазера. Обычно использовался режим генерации одной поперечной моды, который контролировался путем визуального наблюдения распределения интенсивности излучения лазера на рассеивающем экране в дальней зоне. Для эффективного ввода излучения накачки в исследуемый волоконный световод с диаметром сердцевинки от 15 до 50 мкм (когда излучение накачки практически полностью заполняет сердцевину световода) был использован просветленный микрообъектив 10X фирмы "Spectra Physics" с воздушным промежутком в линзовой системе. Это позволяло вводить в световод высокоинтенсивное излучение без разрушения микрообъектива. Серия диафрагм и фильтров, установленных перед микрообъективом обеспечивала возможность изменения мощности излучения накачки на входе световода и устойчивого пространственного согласования излучения накачки с исследуемым световолокном. На выходе световолокна была расположена коллимирующая система (линза или микрообъектив и в некоторых случаях дифракционная решетка 1500 (штрихов на миллиметр) с максимальной эффективностью

на длине волны 700нм). Анализ преобразованного излучения производился на стандартном интерферометре (Фабри –Перо) ИТ-28-30 со сменной базой (1,5-15,5 см⁻¹) (изменение базы проводилось путем установки калиброванных металлических колец между зеркалами интерферометра для изменения расстояния между зеркалами), спектрографе СТЭ-1, посредством визуальной регистрации , фотографирования с экрана в дальней зоне и на скоростном фотохронографе 'АГАТ', имеющем динамический диапазон 10 для световых импульсов в спектральной области 400-1100нм. Измерения энергии световых импульсов накачки и стоксовых компонент ВКР выполнены с помощью прибора ФПМ-02 с цифровой индикацией. Первичная обработка результатов измерений сводилась к микрофотометрированию пленок с прибора СТЭ-1 и камеры Агат на приборе ИФО-451.

Образцы многомодового Ge - допированного волокна имели ступенчатый профиль показателя преломления и пластиковую оболочку. Образцы со стандартной концентрацией германия (<10%) были получены из Научно исследовательского технологического института оптического материаловедения (НИТИОМ) (ФГУП НИТИОМ «ВНЦ ГОИ им. С.И.Вавилова»). В многомодовых волокнах типичные значения диаметра сердцевины составляли 50 мкм, длина волокон была 5-100 метров, оптические потери на длине волны 1,06 мкм порядка 2 дБ/км. В экспериментах использовались также одномодовые допированные волокна фирмы Корнинг с 45% концентрацией Ge (потери на длине волны 1,06 мкм порядка 1 дБ/км). В последнем случае диаметр внутренней жилы составлял 6 мкм , а длина волокна 30 метров.

Для возбуждения ВКР использовались в основном одиночные импульсы лазера на алюмоиттриевом гранате с неодимом (производство российской фирмы Тантал). Использовалась вторая гармоника ($\lambda = 532\text{нм}$), длительность импульсов составляла 35 пс, излучаемая пиковая мощность была $10^4\text{-}10^5\text{вт}$. В отдельных случаях использовался цуг импульсов. Порог накачки составлял 100-200 кВт. На рис.1 показаны спектры ВКР в номинально "чистом " волокне (без повышенной концентрации германия) [12]. Заметим сразу, что этот спектр отличается от спектра спонтанного КР. Так известно [10],

что в спонтанном КР имеется довольно узкая линия на 606 см^{-1} и отсутствует полоса 570 см^{-1} , в то время как в

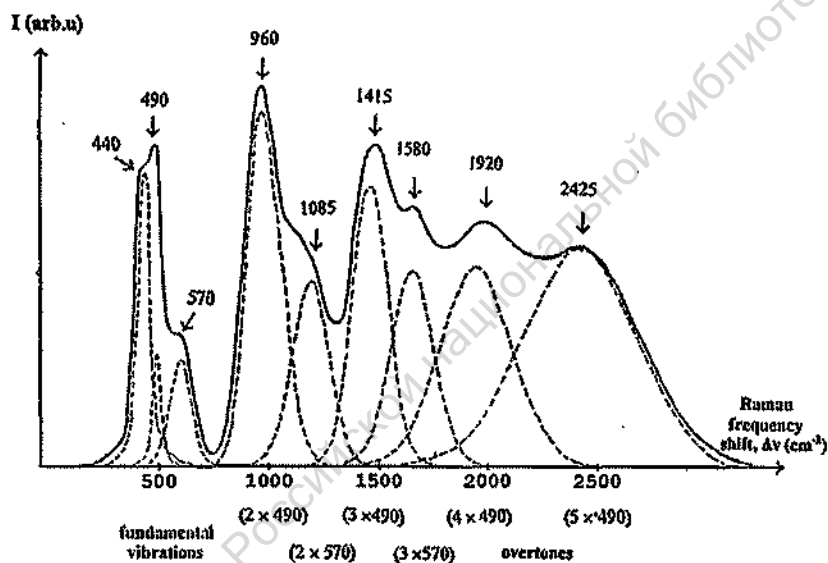


Рис.1 Спектр ВКР чистого кварцевого световолокна [12].

представленном на рис.1 спектре имеется линия 570 см^{-1} и нет линии на 606 см^{-1} . Кроме того, относительно возрос сигнал на 490 см^{-1} . Примечательная особенность приведенного спектра состоит в том, что на нем хорошо видны обертона (высшие порядки) основных стоксовых сигналов, соответствующих 490 см^{-1} и 570 см^{-1} . Эти обертона занимают частотный интервал $600\text{-}2500\text{ см}^{-1}$. На рис.1 приведена расшифровка (деконволюция)

спектра (пунктирные линии). Следует подчеркнуть, что эта расшифровка весьма однозначна, поскольку изменение положения расшифрованных спектров на 10 см^{-1} уже не позволяет восстановить исходный (экспериментальный) спектр. В отличие от спектра ВКР в чистом волокне спектр ВКР в допированном волокне (рис.2) содержит лишь основную линию на 440 см^{-1} и ее обертона. На рис.2 представлены спектры ВКР кварцевых волокон допированных германием с концентрацией 10 и 45 молярных процентов [A2]. Отличительная особенность ВКР спектров для оптического волокна с малыми потерями заключается в появлении большого числа обертонов (высших стоксовых порядков). В целом число обертонов может превосходить 20 без появления каких либо дополнительных спектральных полос за счет дефектов. На рис.2 видно, что стоксовой полосе ВКР, которая принадлежит фундаментальному колебанию (с частотой около 440 см^{-1}) в Ge- допированном кварцевом волокне, сопутствуют обертона вплоть до седьмого стоксова порядка. Причем отчетливо наблюдается монотонное увеличение частотного сдвига для высших стоксовых порядков для 45% концентрации Ge по сравнению с 10% концентрацией Ge. Из этих данных рассчитывались константы ангармоничности молекулярных колебаний.

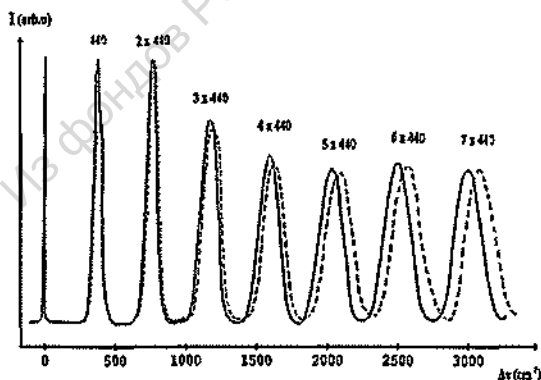


Рис.2. Спектр ВКР в волокне, допированном 10% германия (сплошная линия) и 45% германия (штриховая линия) [A2].

Природа ангармоничности описана в [14,15].

На рис.3 показан пример спектра ВКР кварцевого волокна, допированного фосфором.

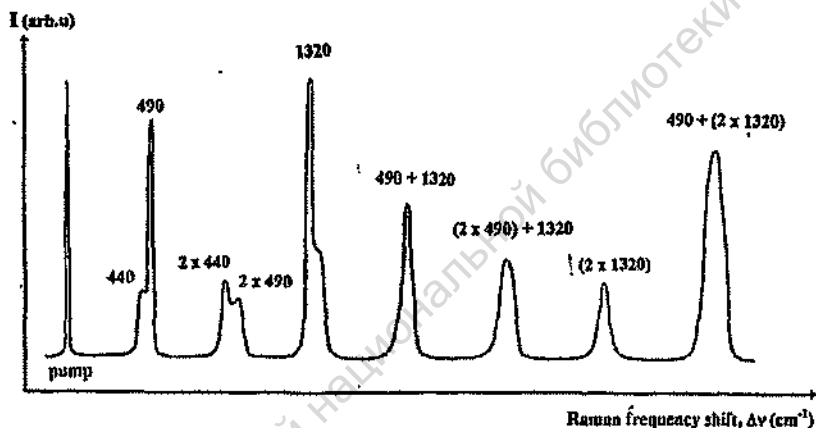


Рис.3.

Концентрация фосфора составляла 1-2 молярных процента, длина волокна 50 метров, порог накачки 100 кВт, изготовитель волокна НИТИОМ.

Экспериментальные условия аналогичны тем, которые были при измерениях волокна, допированного германием. Как видно из приведенного спектра, при введении фосфора резко возрастает интенсивность полосы 490 см^{-1} и относительно ослабляется полоса 440 см^{-1} . Появляются также комбинационные частоты. Обсуждение и интерпретация полученных данных приводится в следующей главе.

В конце второй главы рассматриваются источники возможных погрешностей эксперимента при изучении спектров ВКР. Показано, что в среднем точность измерения положения одиночной полосы при достаточно хорошем отношении сигнал/шум

составляет $1-3 \text{ см}^{-1}$. Для широких полос или при низком отношении сигнал/шум погрешность может доходить до 10 см^{-1} . Приблизительно такая же точность и в оценке ширины полосы спектра ВКР. Указанная погрешность является относительно небольшой, поэтому делается вывод, что метод ВКР обеспечивает весьма хорошую разрешающую спектральную способность. Несколько сложнее дело обстоит с относительной точностью измерения интенсивности сигналов. Хотя при высоком значении отношения сигнал/шум точность измерения интенсивности сигнала высокая (масштаб единиц процентов), тем не менее, из-за сильной нелинейности и конкуренции в потреблении энергии накачки при формировании сигнала ВКР две линии могут отличаться значительно по интенсивности, хотя разница в количестве молекул (или соответствующих групп молекул), ответственных за возникновение этих линий, будет небольшой. Поэтому выводы о соотношении концентраций тех или иных дефектов или молекулярных групп могут делаться лишь качественно.

При определении порога генерации экспериментально почти невозможно установить начальный момент возникновения генерации ВКР. Поэтому обычно в литературе за порог условно принимается такое значение интенсивности накачки, при котором стоксово излучение становится равным излучению накачки на выходе волокна. Точность определения порога по такому критерию практически равна точности измерения интенсивности стоксова сигнала и сигнала накачки на выходе. Реально это величина порядка 10%.

В третьей главе кратко излагается теория ВКР и приводится анализ и интерпретация экспериментальных данных. В рамках феноменологической теории явление ВКР описывается с помощью нелинейной поляризации. Нелинейная часть поляризации $P^{(N)}$ в общем случае содержит квадратичные, кубические и более высокие члены в разложении по электрическому полю, то есть [2,16]:

$$P^{(N)} = \chi^{(2)} E E + \chi^{(3)} E E E + \dots \quad (1).$$

Здесь использована условная запись, когда не показано суммирование по проекциям поля \mathbf{n} не указаны различные индексы для различных полей. В нашем случае (изотропная среда) $\chi^{(2)}=0$, поэтому в стекле наиболее сильными являются нелинейные эффекты третьего порядка. Величина $\chi^{(3)}$ в общем случае есть тензор четвертого ранга. В нашем случае (изотропное стекло) $\chi^{(3)}$ это просто число (но, вообще говоря, комплексное число). Однако из всех возможных комбинаций тройного произведения $\mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E}$ мы будем рассматривать только такую, которая обеспечивает стоксово излучение, а именно, $\mathbf{E}_s |\mathbf{E}_p|^2$. Феноменологический подход не объясняет физическую причину появления стоксовой волны в тройном произведении. Но из микроскопического рассмотрения известно, что возникновение \mathbf{E}_s обусловлено взаимодействием поля накачки \mathbf{E}_p с ансамблем молекул, которые совершают молекулярные колебания на частоте ω_m . В результате возникает стоксова волна с частотой $\omega_s = \omega_p - \omega_m$ (где ω_p частота волны накачки) и волновым вектором $\mathbf{K}_s = \omega_s n_s / c$. Здесь c - скорость света в вакууме, n_s - показатель преломления для стоксовой волны. При ВКР в стекле нет проблемы фазового синхронизма, т.к. волна накачки взаимодействует не с собственной модой колебаний среды, у которой имеется характерное дисперсионное соотношение, а с набором не связанных между собой колеблющихся молекул. Заметим, что для ВКР в кристаллах ситуация иная. Там происходит взаимодействие накачки с оптическими фононами, и в этом случае необходимо обеспечить не только выполнение закона сохранения энергии, но и выполнение закона сохранения импульса. В результате, из-за существования определенного дисперсионного соотношения для фононов возникает проблема фазового синхронизма. В нашем случае для ВКР нелинейная поляризация имеет вид

$$\mathbf{P}_s^{(3)} = i \chi_s^{(3)} |\mathbf{E}_p|^2 \mathbf{E}_s \quad (2).$$

Здесь $\chi_s^{(3)}$ есть мнимая часть нелинейной восприимчивости третьего порядка на частоте стоксова излучения. Тогда уравнение для стоксовой волны имеет вид:

$$\nabla^2 \bar{E}_s - \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{E}_s}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{P}_s^{nl}}{\partial t^2} \quad (3).$$

Будем искать решение в виде $\bar{E}_s = \bar{E}_s(r) \exp i(\omega_s t - K_s^z z)$. Кроме того будем считать, что волна распространяется вдоль оси z (это означает $K_s^z = K_s z$, и обоснованием этого допущения является то, что мы рассматриваем все процессы в волокне, где z ось волокна), а поле волны и поляризация линейно поляризовано. Рассматриваем установившийся режим и, считая, что огибающая $E_s(z)$ медленно меняется с расстоянием, имеем уравнение для огибающей:

$$\frac{\partial E_s(z)}{\partial z} = \frac{2\pi\omega_s \chi_s^{(3)} |E_p|^2 E_s(z)}{cn_s} \quad (4).$$

Далее, вводя обозначения $\frac{2\pi\omega_s \chi_s^{(3)}}{cn_s} = g_R$, $|E_p|^2 = I_p$ и $E_s(r)E_s^*(r) = I_s(z)$

получим уравнение:

$$\frac{\partial I_s(z)}{\partial z} = g_R I_p I_s(z) \quad (5).$$

Решение этого уравнения очевидно:

$$I_s(z) = I_s(0) \exp(g_R I_p z) \quad (6),$$

где $I_s(0)$ есть интенсивность электромагнитного излучения на стоксовой частоте на входе в волокно. В режиме усиления $I_s(0)$ есть внешний сигнал, а в режиме генерации - это интенсивность спонтанного стоксова излучения. Уравнение (5) и, соответственно, решение (6) справедливо лишь на начальном этапе развития процесса ВКР, поскольку оно не учитывает истощения накачки (I_p считается константой). Кроме того, в уравнении (5) не учитывается затухание. Если затухание стоксовой волны учесть в форме $\exp(-\alpha z)$, где α - параметр затухания, то выражение для интенсивности стоксовой волны имеет вид

$$I_s(z) = I_s(0) \exp[(g_R I_p - \alpha)z] \quad (7).$$

Откуда следует, что ВКР является пороговым эффектом и для возникновения ВКР необходимо, чтобы интенсивность накачки удовлетворяла условию $I_p > a/g_R$. Это очень важное обстоятельство при интерпретации экспериментальных данных. Дело в том, что восприимчивость $\chi_s^{(3)}$ (и, соответственно, g_R) зависит от многих факторов (концентрация молекул или дефектов, обеспечивающих рассеяние, поляризуемость этих центров, затухание и неоднородное уширение молекулярных колебаний), а возможность наблюдения той или иной линии ВКР зависит от порога ВКР, то - есть от g_R . Наблюдаться будут только те линии, у которых порог минимален, остальные линии не будут наблюдаться, т.к. для них просто не хватает энергии накачки, хотя это совершенно не значит, что не имеется таких центров, которые могли бы обеспечить рассеяние на других частотах стоксова излучения при спонтанном рассеянии. Поэтому, требуется определенная осторожность при интерпретации экспериментальных результатов, когда делаются выводы о наличии или отсутствии дефектов из данных ВКР. Выше мы рассматривали ВКР в феноменологическом приближении. В главе 3 диссертации кратко также рассматривается квантовое приближение[16], и в итоге стоксова излучение описывается в терминах чисел заполнения фотонов со стоксовой частотой. Этот подход очень нагляден, т.к. описывает процесс ВКР как процесс поглощения фотонов накачки с одновременным рождением фотонов стоксова излучения и квантов молекулярных колебаний среды (в нашем случае стекла). В заключительной части третьей главы проводится анализ экспериментальных данных, обсуждается природа дефектов, ответственных за наблюдаемые спектры ВКР, а также роль ангармонизма молекулярных колебаний спектральных свойствах высших порядков стоксова излучения в оптических волокнах, допированных германием.

В **Заключении** кратко сформулированы основные результаты работы, которые сводятся к следующему.

1. Разработана экспериментальная установка для исследований ВКР с помощью лазерных импульсов пикосекундного диапазона.
2. Проведены предварительные тестовые измерения ВКР в многомодовых волокнах с целью отработки оптимальных условий основных измерений (условий ввода света в волокно, методов обработки торцов волокна и др.)
3. Получены спектры ВКР в номинально чистом волокне, в оптических волокнах, допированных германием с концентрацией германия 10% и 45%, и в волокнах, допированных фосфором с концентрацией порядка 1-2 %, что позволило сделать выводы о влиянии этих примесей на концентрацию дефектов, связанных с нестиковым кислородом.
4. Обнаружен ангармонизм колебаний тетраэдрических групп в оптических волокнах, допированных германием.
5. Установлена корреляция между концентрацией германия и степенью ангармонизма колебаний (ангармонизм уменьшается с увеличением концентрации германия).
6. Проведено сопоставление полученных экспериментальных результатов с имеющимися литературными данными и проведена идентификация молекулярных групп, ответственных за наблюдаемые ВКР сигналы. Показано, что полученные результаты в целом соответствуют имеющимся в литературе моделям, но в то же время дополняют их. Так показано, что за линию 440см^{-1} ответственны объемные колебания кремниевых (и германиевых) тетраэдров, за линию 490см^{-1} ответственны дефекты с нестиковыми атомами кислорода, за линию 570см^{-1} ответственны парамагнитные центры окраски E, и за линию 1320см^{-1} группы, содержащие окислы фосфора, и третья гармоника ВКР сигнала от объемных колебаний тетраэдров.

Основные результаты опубликованы в следующих работах.

- A1. Nesterova Z.V., Gaston Melo Melchor, Aleksandrov I.V. Medium-range ordering in glass structure as a background of photosensitivity in silica fibers // Journal of Non-Crystalline Solids J.Non-Cryst.Solids. 2005. No. 351, 3789
- A2. И.В.Александров†, Г.Мело Мельчор, Д.Н.Виноградов, М.П.Петров. Корреляция между концентрацией примесей и ангармонизмом деформационных колебаний в кварцевых волоконных световодах // Письма в Журнал Технической Физики. - 2006, том 32, вып. 10. С.56-60.
- A3. Nesterova Z.V., G.Melo Melchor, and Aleksandrov I.V. , “Mean ordering in glass structure as a background of photosensitivity in silica fibers”, CLEO/Europe-EQEC Conference (23-27 June, 2003, Munich, Germany) .
- A4. Aleksandrov I.V., G.Melo Melchor, and Vinogradov D.N., “ Correlation between dopant concentration and vibrational anharmonicity in silica- based fibers”, CLEO/Europe-EQEC Conference (23-27 June, 2003, Munich, Germany) .
- A5. Z.V.Nesterova, Gaston Melo Melchor, I.V.Aleksandrov†. Spectroscopic Characterization of Silica-Based Fibers using picosecond SRS Technique // SPIE Proceedings, 4638-21, San Jose, CA. - 2003.

Цитированная литература.

1. Wim Van Etten and Jan van der Plaats, Fundamentals of optical fiber Communications, (1990), Prentice Hall.
2. Агравал Г., Нелинейная волоконная оптика, (1996), Изд. Мир.
3. Ikeda M., Opt.Comm.,39, 148, (1981).
4. Davison A.S., White I.H. Electron .Lett., 23, 1344, (1987).

5. Karpov V.I., Dianov E.M., Paramonov V.M., Medvedkov O.I., Bubnov M.M., Semenov S.L., Vasiliev S.A., Protopopov V.N., Egorova O.N., Hopin V.F., Gurryanov A.N., Bachinski M.P., Clements W.R.L., *Opt.Lett.*, **24**, 887, (1999).
6. Курков А.С., Дианов Е.М., *Квантовая электроника*, **34**, 881, (2004).
7. Петров М.П., Белотицкий В.И., Кузин Е.А., Спирин В.В., *Квантовая электроника*, **22**, 1245, (1995).
8. Belotitskii V.I., Kusin E.A., M.P.Petrov, Spirin V.V. , *Electron .Lett.*, **29**, 49,(1993).
9. Lucovsky G., Wong C.K., and W.B.Pollard, in *The structure of Non Crystalline Materials*, Taylor and Francis ,London (1983).
10. Walfaren G.E., Stone J., *Appl. Spectrosc.* ,**29**, 337 (1975).
- 11.. Aleksandrov I.V., Nesterova Z.V. and G.T.Petrovskii , *J.Non-Cryst.Solids* **123** ,223,(1990).
12. Aleksandrov I.V., Nesterova Z.V. and G.T.Petrovskii , *J.Non-Cryst.Solids* **167**, 117, (1994).
13. Нестерова З.В., Александров И.В., *Ж.Прикл.Спектр*, **XLV**, 670, (1986).
14. Ельяшевич М.А. , *Атомная и молекулярная спектроскопия* , Физ.Мат.Гиз. (1962).
15. Свердлов Л.М., Ковнер М.А. и Крайнов Е.П. , “*Колебательные спектры многоатомных молекул* ”, Москва, (1970).
16. Mills D.L., *Nonlinear optics (Basic concept)*, (1991).

Из фондов Российской национальной библиотеки

Лицензия ЛР №020593 от 07.08.97

Подписано в печать 21.12.2006. Формат 60x84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ 1100b.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в Цифровом типографском центре Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: 550-40-14
Тел./факс: 297-57-76

Из фондов Российской национальной библиотеки

Из фондов Российской национальной библиотеки

Из фондов Российской национальной библиотеки

1007A
1175

1007A
1175

3

Из фондов Российской национальной библиотеки

91