

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВРМБ
В ОДНОМОДОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
студента 4 курса 4022 группы Института физики
направления 03.03.02 «Физика»
Антонова Антона Андреевича

Научный руководитель к.ф.-м.н., доцент А. И. Конюхов

Заведующий кафедрой д.ф.-м.н профессор В. М. Аникин

САРАТОВ 2022 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. С середины 1970-х годов интенсивно развивалась волоконная оптика. Все это время интерес к изучению нелинейных эффектов в оптических волокнах оставался чрезвычайно высоким. Сначала он был вызван необходимостью подавления этих эффектов в волоконно-оптических линиях связи как вредных, вносящих дополнительные помехи. Затем акценты сместились в сторону реализации солитонного режима распространения импульсов, где нелинейные эффекты использовались для компрессии световых импульсов, для перестройки длины волны излучения. В начале 90-х годов широко обсуждались распределенные волоконные датчики и волоконные гироскопы на основе нелинейных эффектов.

В ряду нелинейных эффектов, возникающих в оптическом волокне при распространении лазерного излучения, вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна (ВРМБ) занимает особое место.

1. Во-первых, это самый низкопороговый нелинейный эффект в волокне - порог для стандартных одномодовых волокон составляет ~ 10 мВт из расчета на километр волокна.

2. Во-вторых, встречный характер ВРМБ приводит к сложной, но очень интересной пространственно-временной динамике процесса, которая при определенном выборе режимов может быть использована для преобразования временной формы оптических сигналов (компрессии импульсов, периодической модуляции излучения).

3. В-третьих, ВРМБ в многомодовом волокне обладает свойством обращения волнового фронта (ОВФ) излучения лазерной накачки полем рассеянного излучения, что делает его полезным в схемах коррекции волнового фронта, используемых в резонаторах лазера, волоконных интерферометрах.

В последние годы в связи с бурным развитием волоконных лазеров и усилителей на основе волокон, легированных ионами редкоземельных элементов, наметился новый всплеск интереса к исследованиям ВРМБ в волокне. ВРМБ в резонаторе лазера (при наличии обратной связи по стоксовому сигналу) может возникать при мощностях лазерных полей всего в несколько милливольт и протекает при этом с особой эффективностью, оказывая серьезное влияние на процесс развития лазерной генерации. В частности, оно может быть причиной нестабильности лазера или приводить к другим качественным изменениям его работы.

Изучение динамики усиления света за счет механизма ВРМБ (ВРМБ усиление) в оптических волокнах позволяет не только прогнозировать влияние ВРМБ на работу волоконных лазеров, но и создавать новые волоконные конфигурации с активной ролью ВРМБ для управления процессом генерации света.

Несмотря на огромное количество серьезных работ, посвященных изучению ВРМБ в волокне, целый ряд вопросов, касающихся особенностей пространственно-временной динамики ВРМБ в определенных режимах, актуальных, в частности, для целей создания новых волоконных источников света, до

сих пор не был исследован. В частности, не было экспериментов по изучению ВРМБ в многомодовом оптическом волокне в конфигурации ВРМБ усилителя, а режим ОВФ при ВРМБ усилении внешнего стоксового поля в многомодовом волокне не был реализован. Не было работ по изучению нестационарной динамики ВРМБ в ближней к входному торцу области волокна, где происходит эффективный энергообмен между излучением накачки и стоксового поля, а также динамики ВРМБ в присутствии рэлеевского рассеяния.

Благодаря этому данная тема дипломной работы является актуальной.

Цель выпускной квалификационной работы (ВКР) – изучение нестационарного ВРМБ в одномодовом оптическом волноводе в режиме сильного истощения накачки и в волокнах со значительными рэлеевскими потерями.

Задачи работы:

1. Подобрать и проанализировать источники литературы, наиболее соответствующие теме дипломной работы.
2. Исследовать ВРМБ в оптическом волноводе.
3. Рассмотреть вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ).
4. Рассчитать нестационарный ВРМБ в одномодовом оптическом волноводе на основе программы C++.

Объектом исследования являются оптико-электронные системы зондирования и определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне.

Предмет исследования – полигармонические способы и средства зондирования и определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна, как основных характеристик измерительного преобразования температуры и деформаций растяжения/сжатия в одномодовом оптическом волокне.

В процессе исследования были использованы следующие **методы**:

1. теоретический;
2. статистический;
3. методы математической физики;
4. оптомеханики.

Структура и содержание ВКР отвечают цели, задачам и логике проведенного исследования. ВКР включает две части – теоретическую и экспериментальную, содержит список литературы (22 наименования), приложение. Общий объем работы – 37 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ВКР

Во **введении** к приводятся аспектные характеристики ВКР. Обосновывается актуальность работы, формулируются ее цель и задачи, объект, предмет, методы исследования.

В **первом разделе** бакалаврской работы рассматриваются теоретические вопросы волоконной оптики. Данный раздел состоит из трёх подразделов.

1. В первом подразделе дается определение характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне, о проявлении ВРМБ в волоконных световодах, в линиях волоконно-оптической связи. Уже первые работы по применению ВРМБ в волоконных измерительных системах продемонстрировали их высокую эффективность.

Результаты исследований вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, в частности определения параметров контура усиления Мандельштама-Бриллюэна, также находят применение в таких областях как волоконные лазеры, устройства реализации механизма групповой задержки, оптическая обработка высокочастотных микроволновых сигналов.

2. Во втором подразделе поднимается тема о распределённых измерительных системах на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна и других областях его применения. Про спонтанном и вынужденном рассеяния Мандельштама-Бриллюэна частоты обеих рассеянных волн (стоксовой и антистоксовой).

О явлении изменения положения спектральных линий в спектрах ВРМБ-рассеяния может быть использовано для создания распределённых волоконно-оптических датчиков температуры и механического напряжения.

Эффективность спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна практически на 20 дБ ниже, нежели для рассеяния Рэлея в волоконных световодах. Поэтому использование спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна не представляется перспективным. Использование же ВРМБ позволяет за счет явления усиления эффекта рассеяния при трехволновом взаимодействии существенно поднять эффективность процесса рассеяния, что открыло широкие перспективы для его использования в волоконных датчиков.

Спектральная область, занимаемая ВРМБ в кварцевых волокнах, простирается от 20 до 35 МГц. Поэтому, как правило, слабые рассеянные сигналы могут уверенно детектироваться при сохранении высокой чувствительности при применении метода когерентного приема.

Значительное развитие применение метода ВРМБ в волоконнооптических датчиках получило в работах, когда был предложен новый способ обработки сигналов рассеяния, получивший название метода анализа бриллюэновского рассеяния (BOTDA). Суть метода BOTDA заключается во взаимодействии между импульсным и непрерывным световым излучением, распространяющимся навстречу друг другу в оптическом волокне.

Еще одним из направлений развития распределённых систем волоконно-оптических датчиков на основе ВРМБ явилась модификация BOTDA измерительной системы за счет использования эффекта индуцированного ослабления

пробной волны, а не ее усиления, как это было в предыдущем методе. Ослабление непрерывной пробной волны при одновременном усилении импульса волны накачки имеет место, когда частота пробной волны оказывается больше частоты света волны накачки. Использование эффекта ослабления интенсивности пробной волны позволило достичь рекордных результатов. Длина распределенного датчика была доведена до 50 км при сохранении остальных значений его характеристик пространственное разрешение 10 м и температурное разрешение $\pm 1^\circ\text{C}$.

За последние годы также был предпринят ряд успешных попыток по упрощению измерительной системы распределенных ВРМБ-датчиков. В частности, в работах предлагалось использовать только один двухмодовый лазер с управляемой разностью частот между модами. Такая измерительная система позволила обеспечить при длине датчика 24,2 км пространственное разрешение 100 м при температурном разрешении $\pm 1^\circ\text{C}$.

Точное определение характеристик спектра усиления, вызванного эффектом ВРМБ в одномодовом оптическом волокне, необходимо в ряде других применений. К ним относятся: оценка искажений, вносимых ВРМБ в информацию, передаваемую по волоконно-оптическим линиям связи, обработка и преобразование оптических несущих и микроволновых поднесущих в сетях связи типа «радио-по-волокну», измерительное преобразование температуры и деформации в фононной СВЧ-спектроскопии оптического волокна.

3. В третьем подразделе описываются способы зондирования и определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна.

Классический способ определения спектра усиления Мандельштама-Бриллюэна основан на использовании двух лазеров: одного – для накачки ВРМБ, а другого – для зондирования сформированного спектра усиления.

Экспериментальная часть. Для эксперимента были выбраны два вида волокна – одно с сердцевиной из чистого кварца с оболочкой легированной фтором F, другое с сердцевиной легированной оксидом германия GeO_2 и оболочкой из чистого кварца, удовлетворяющих соответствующим условиям $V_{co}^l > V_{cl}^l$ и $V_{co}^l < V_{cl}^l$, где V_{co}^l, V_{cl}^l - продольные скорости акустических мод в сердцевине и оболочке волокна.

Лазер накачки и зондирующий лазер создают две встречно распространяющиеся волны в волокнах. Между лазерами и линией передачи установлены оптические изоляторы.

После того как волны от лазера накачки пройдут через механический прерыватель, лазер накачки действующий на длинах волн $\lambda = 1286$ и 1550 нм может передавать примерно 0,2 и 0,6 мВт оптической мощности соответственно в линию передачи. Зондирующий лазер передает примерно 0,2 мВт мощности в передний конец тестируемого волокна.

Определенный прогресс в системах зондирования и определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна был достигнут при формировании сканирующего двухполосного амплитудно-модулированного зондирующего излучения из излучения накачки.

При увеличении мощности накачки, усиление ВРМБ является более насыщенным. Об этом свидетельствует тот факт, что разность в частоте максимума и минимума характеристики фазы увеличивается. Разрешение измерений составило 1 МГц, хотя при лучшем анализаторе разрешение было бы ограничено только шириной оптических сигналов. Измерения показали, что спектральные контуры Мандельштама-Бриллюэна в тестируемом волокне не были чисто лоренцевскими. Вместо этого присутствовали боковые лепестки, что объясняется последствиями поперечного распределения легирования в волокне.

Однако данный способ характеризуется невысокой чувствительностью, обусловленной необходимостью приема и обработки сигналов в широкой полосе частот (10-20 ГГц), а также существенным влиянием на погрешность измерения наличия верхней боковой полосы частот.

Решение данной проблемы также было получено с помощью применения двухчастотного излучения, сформированного в отличие от для излучения накачки. Одна частота соответствовала частоте накачки, а вторая ее стоксовой компоненте, при этом контуру усиления Мандельштама-Бриллюэна соответствовал сдвинутый по частоте контур поглощения, который использовался для подавления верхней боковой полосы частот.

ВЫВОДЫ

1. В ВКР рассмотрены распределённые измерительные системы на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна и другие области его применения. В области волоконно-оптических датчиков эффект ВРМБ позволил создать новые типы распределенных датчиков температуры и механических напряжений.

Исследования по применению ВРМБ в волоконных измерительных системах продемонстрировали их высокую эффективность – возможно создание распределенных волоконно-оптических датчиков температуры протяженностью до 50 км с температурным разрешением $\pm 1^\circ\text{C}$ и пространственным разрешением 10 м, а также датчиков механических напряжений протяженностью 22 км с разрешением 20 μe и пространственным разрешением 5 м. Для кварцевых волокон сдвиг частоты Мандельштама-Бриллюэна составляет порядка 10-20 ГГц, а усиление Мандельштама-Бриллюэна наблюдается в полосе пропускания 20-100 МГц. ВРМБ также применяется в таких областях как волоконные лазеры, обработка и преобразование оптических несущих и микроволновых поднесущих и т.д.

Определены основные необходимые для нахождения параметры, характеризующие контур усиления: центральная частота контура усиления, его ширина и коэффициент усиления.

2. Проанализированы различные способы зондирования и определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна: от классического, где применяются два лазера – один для накачки, второй для зондирования

ния, до современного метода, основанного на преобразовании спектра усиления Манделъштама-Бриллюэна из оптической области в электрическую с помощью однополосного амплитудно-модулированного излучения. Изучение способов зондирования и определения характеристик контура усиления Манделъштама-Бриллюэна показало, что требуется как усовершенствование существующих методов, так и разработка новых методов зондирования и определения характеристик контура усиления Манделъштама-Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне. Найдены возможности для усовершенствования способов зондирования и определения характеристик контура усиления.

3. Была проделана практическая работа по итерационной схеме в алгоритме 1, которая вычисляет единственную реализацию ВРМБ-взаимодействия при заданном наборе входных параметров, написанная на языке программирования C++.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bao, X. 22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in optical fiber / X. Bao, et al. // Opt. Lett. - 1993. - V. 18. - N. 7. - P. 552-554.
2. Bao, X. 32-km distributed temperature sensor using Brillouin loss in optical fiber / X. Bao, D. J. Webb, and D. A. Jackson // Opt. Lett. - 1993. - V. 18. - Is. 18. - P. 1561-1563.
3. Bao, X. et al. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber // Opt. Lett. - 1994. Vol. 19, № 2. - P. 141-143.
4. Bao, X. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering / X. Bao, J. Dhliwayo, N. Heron, D. J. Webb, and D. A. Jackson // J. Lightwave Technol. - 1995. - V. 13. - Is. 7. - P. 1340-1348.
5. Bernini, R. All frequency domain distributed fiber optic Brillouin sensing /
6. Chraplyvy, A.R. Limitation of lightwave communications imposed by optical fiber nonlinearities // IEEE J. Lightwave. Technol. - 1990. - V. 8. - N. 10. - P. 1548-1557.
7. Culverhouse, D. Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors / D. Culverhouse, F. Faraht, et al. // Electron. Lett. - 1989. - V. 25. - N. 14. - P. 913-915.
8. Culverhouse, D. Stimulated Brillouin scattering a means to realise tunable microwave generator or distributed temperature sensor / D. Culverhouse, F. Faraht, et al. // Electron. Lett. - 1989. - V. 25. - N. 14. - P. 915-916.
9. Czarske, J.W. Simplified distributed temperature sensor using stimulated Brillouin scattering // Proc. 11-th International Conference on Optical Fiber Sensors, Japan, Hokkaido. - 1996. - P. 514-517.
10. Damzen, M.J. et al. Stimulated Brillouin Scattering: Fundamentals and applications. CRS Press. - 2003. - 196 p.
11. Davis, M.A. Simultaneous measurement of temperature and strain using fiber Bragg grating and Brillouin scattering/ M.A. Davis, A.D. Kersey // Proc. Of SPIE. - 1996. - Vol. 2838. - P. 114-123.
12. Heron, N.A. et al. Brillouin loss based distributed temperature sensor using a single source / Proc. of SPIE. - 1996. - V. 2838. - P. 100-103.
13. Horiguchi, T. et al. A technique to measure distributed strain in optical fibers // IEEE Photonics Technology. - 1990. - V. 2. - N. 5. - P. 352-354.
14. Kersey, A.D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology/ A.D. Kersey // Opt. fiber tech. - 1996. - V. 2. - N. 3. - P. 291-317.

15. Kurasima, T. et al. Distributed temperature sensing stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers // Opt. Lett. - 1990. - V. 15. N. 18. - P. 1038-1940.
16. Loayssa, A. Optical carrier Brillouin processing of microwave photonic signals / A. Loayssa, D. Benito, M. J. Garde // Opt. Lett. - 2000. - V. 25. - N. 17. - P. 1234-1237.
17. Mao, X.P. Stimulated Brillouin threshold dependence on fiber type and uniformity / X.P. Mao, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy // IEEE Photon. Technol. Lett. - 1992. - V. 4. - N. 1. - P. 66-69.
18. Patent № 5383207. United States of America. Optical carrier generation using stimulated brillouin scattering / D. Culverhouse. - 1995. - 23 p.
19. R. Bernini, L. Crocco, A. Minardo, F. Soldovieri, L. Zeni // IEEE Sensors Journal. - V. 3. - N. 1. - P. 36-43.
20. Thevenaz, L. Applications of distributed Brillouin fibre sensing / L. Thevenaz, M. Nikles, A. Fellay, M. Facchini, and P. Robert // Proceedings of SPIE. - 1998. - V. 3407. - P. 374-381.
21. Yong, J. C. Brillouin fiber laser pumped by a DFB laser diode / J. C. Yong, L. Thevenaz, and B. Y. Kim // J. Lightwave Technol. - 2003. - V. 21. - N. 2. - P. 546-554.
22. Кульчин, Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит. - 2001. - 272 с.