

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов  
на базе Саратовского филиала Института радиотехники  
и электроники им. В. А. Котельникова РАН

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В СРЕДЕ С ВЫНУЖДЕННЫМ РАССЕЯНИЕМ  
МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЕНА**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Ежова Вадима Олеговича  
студента 4 курса, 4022,  
направления подготовки 03.03.02 Физика  
Института физики

Научный руководитель  
Доцент, к.ф.-м.н.

А.И. Конюхов

Заведующий кафедрой  
компьютерной физики и метаматериалов  
на базе Саратовского филиала Института радиотехники  
и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
д.ф.-м.н. профессор

В.М. Аникин

Саратов 2021

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Молекулярное рассеяние стало предметом интенсивных исследований в 1920–1930-х годах. Сегодня рассеяние на оптических фонах (квантованные состояния колебаний решетки) известно как комбинационное рассеяние (рамановский процесс)<sup>1</sup>, а неупругое взаимодействие света с акустическими фонами названо рассеянием Мандельштама – Бриллюэна в честь Л. И. Мандельштама и Леона Бриллюэна. Из представления о стоячих волнах – сгущениях и разрежениях плотности, модулирующих световую волну, – исходил Л. И. Мандельштам, теоретически предсказавший рассеяние Мандельштама – Бриллюэна в 1918 г. (его статья, написанная в 1918, была опубликована лишь в 1926). Л. Бриллюэн теоретически предсказал рассеяние света на термически возбужденных акустических волнах в 1922 г.

Создание лазеров не только улучшило возможности наблюдения рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, но и привело к открытию так называемого вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ), которое отличается большей интенсивностью и многими качественными особенностями. Исследования рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в сочетании с другими методами позволяют получать ценную информацию о свойствах рассеивающих сред. ВРМБ используется для генерации мощных гиперзвуковых волн в ряде технических применений, в бриллюэновской рефлектометроскопии для локализации и измерения величины натяжения участков оптического волокна.

**Объектом изучения** в выпускной квалификационной работе является вынужденное (стимулированное) рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне (SBS). Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) – это процесс неупругого рассеяния света на акустических фонах, генерируемых за счет взаимодействия падающей и стоксовой волн, при этом рассеянное излучение играет активную роль и лавинообразно нарастает. В системах оптической связи ВРМБ может быть вредным эффектом. В то же время оно может использоваться в ВРМБ-лазерах и усилителях. Результат взаимодействия между световой волной и волной деформации носителя состоит в том, что часть прошедшей световой волны изменяет свой импульс (следовательно, свою частоту и энергию) в определенных направлениях. Если среда представляет собой твердый кристалл, макромолекулярный цепной конденсат или вязкую жидкость или газ, то низкочастотные волны атомной цепной деформации в передающей среде (не

---

<sup>1</sup> См. : Фабелинский И. Л. Открытие комбинационного рассеяния света в России и Индии // УФН. 2003. Т. 173. С. 1137 – 1144.

прошедшая электромагнитная волна) в носителе (представленном как квазичастица) может быть, например: массовые колебательные (акустические) моды (называемые фононами); режимы смещения заряда (в диэлектриках – поляритоны); моды колебаний магнитного спина (в магнитных материалах, называемых магнонами).

**Целью данной работы** является изучение методов управления лазерным излучением с использованием вынужденного рассеяния Манделштама – Бриллюэна (ВРМБ).

**Задачи работы:**

Изучение основных физических понятий неупругого рассеяния света.

Изучение физических свойств оптических волокон с повышенным порогом ВРМБ.

Изучение свойств ВРМБ волоконно-оптических приложениях.

**Структура работы.** Данная работа содержит введение, 5 глав, заключение, список использованной литературы (220 источников)<sup>2</sup>.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В работе проводится обзор физических свойств одномодовых световодов с вынужденным рассеянием Манделштама-Бриллюэна (ВРМБ).

**Во введении** дается общее понятия ВРМБ.

**Основной материал** можно разделить на две части.

**В части 1** работы представлен подробный обзор, посвященный фундаментальным свойствам ВРМБ.

ВРМБ – один из самых ярких оптических нелинейных эффектов. В спонтанном процессе фотон падающей световой волны трансформируется в рассеянный фотон и фонon. Частота рассеянной волны понижается. Она называется волной Стокса в честь Джорджа Стокса, который обнаружил понижение частоты в процессе люминесценции в 19 веке.

Как правило, сечение рассеяния стоксова света довольно низкое, но в оптических волокнах свет может распространяться на десятки километров без значительного ослабления. Это делает (стимулированное) рассеяние Манделштама – Бриллюэна заметным и часто нежелательным эффектом в оптических волокнах.

В работе представлен аналитический расчет мощности обратного отражения и порога ВРМБ (SBST) в оптических волокнах с различными профилями показателя преломления. На основе акустооптического взаимодействия описывается зависимость усиления Бриллюэна от профиля показателя преломления оптического волокна. Анализируется мощность стоксова обратного отражения, инициированную термофононами, сравнивается

---

<sup>2</sup> См.: Kobyakov Andrey, Sauer Michael, Chowdhury Dipak. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers // Advances in Optics and Photonics 2, 1–59 (2010). DOI:10.1364/AOP.2.00000111943-8206/10/010001-59

значения SBST, рассчитанные из различных приближений, и обсуждается зависимость SBST от длины волокна. Рассматривается аналитический подход к расчету усиления волоконных усилителей Бриллюэна (BFA) в режиме истощения накачки. В режиме с высоким коэффициентом усиления потери в волокне не являются незначительным эффектом и должны учитываться вместе с истощением накачки. Дается точное аналитическое выражение для усиления BFA и демонстрируются экспериментальные результаты. В заключение части 1 рассматриваются методы подавления SBS, включая акустические направляющие с индексом или сегментированные волоконно-оптические линии.

**Часть 2** посвящена недавним достижениям в волоконно-оптических приложениях, где SBS является важным эффектом. В частности, обсуждается влияние SBS на технологию связи по оптоволокну, повышение эффективности SBS в волокнах с рамановской накачкой, медленный свет из-за оптических линий задержки на основе SBS и SBS, волоконно-оптические датчики Бриллюэна и подавление помех от SBS в мощных волоконных лазерах, а также ВРМБ в многомодовых и микроструктурированных световодах.

ВРМБ – один из самых ярких оптических нелинейных эффектов. В спонтанном процессе фотон падающей световой волны трансформируется в рассеянный фотон и фонон. Частота рассеянной волны понижается. Она называется волной Стокса в честь Джорджа Стокса, который обнаружил понижение частоты в процессе люминесценции в 19 веке.

Хотя спонтанное рассеяние Бриллюэна было предсказано им в 1922 г., стимулированный процесс, когда акустическая волна создается самим световым лучом, был обнаружен только в 1964 г. SBS – нелинейный процесс, т.е. его эффективность зависит от входной мощности. Мощность входного сигнала, при которой мощность стоксовой волны быстро увеличивается и может даже быть сопоставимой с входной мощностью, называется пороговой мощностью или просто порогом SBS (SBST).

В прошлом изучались различные фундаментальные и прикладные аспекты SBS:

- электрострикционный вклад в зависящий от интенсивности показатель преломления исследовался как теоретически, так и экспериментально;
- модель отклика показателя преломления волокна во времени;
- влияние профиля показателя преломления на спектр усиления Бриллюэна (BGS) и на величину коэффициента усиления Бриллюэна;
- влияние легирования Ge на коэффициент акустического демпфирования кварцевых световодов;
- обнаружение большого коэффициента усиления Бриллюэна в халькогенидных стеклах;
- поляризационные свойства рассеянного света и акустооптическая связь;
- взаимодействие между ВРМБ и нелинейным четырехволновым смещением или кросс-фазовой модуляцией;

нестабильности, вызванные взаимодействием четырехволнового смещения с ВРМБ, многокаскадным ВРМБ, поддерживаемым обратным рассеянием Рэлея;

ВРМБ в распределенных волоконных усилителях, легированных Er (EDFA) и в рамановских усилителях;

влияние спектрально уширенной накачки на эффективность рассеяния;

ВРМБ в волоконных брэгговских решетках и динамическое поведение ВРМБ и т.д.

Наиболее заметным источником стимулированного рассеяния Бриллюэна (SBS) является физическое явление, называемое электрострикцией которое проявляется в изменении плотности среды под действием света.

Рассеянный Стоксовый свет интерферирует с входным светом накачки и генерирует акустическую волну через эффект электрострикции. Фактически, распространяющийся свет создает движущуюся плотностную решетку, от которой он рассеивается в обратном направлении. Таким образом, частотное смещение волны Стокса также может быть объяснено эффектом Доплера. Механизм рассеяния света схематически показан на рис. 1. С увеличением интенсивности стоксовой волны интерференционная картина становится более выраженной, а амплитуда акустической волны увеличивается. Распространяющаяся вперед акустическая волна действует как брэгговская решетка, которая рассеивает еще больше света в обратном направлении.

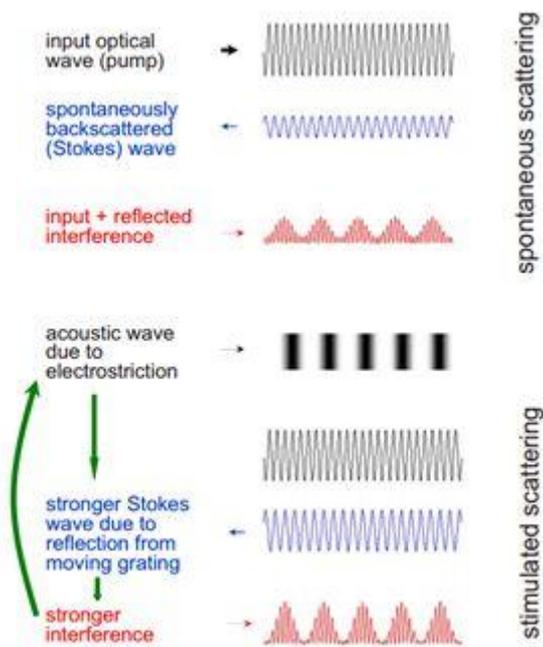


Рис1. Спонтанное (вверху) и вынужденное (внизу) рассеяние Манделштама-Бриллюэна. Обрато рассеянный (стоксов) свет (синий) от акустического шума мешает входной (накачивающей) волне (черный). Картина интерференции показана красным. Абсцисса кривых - координата по длине среды. По ординате отложена амплитуда оптических волн (черная и синяя кривые) и интенсивность интерференции (красная).

Амплитуда акустической волны пропорциональна оптической интенсивности. Акустическая волна, генерируемая в результате электрострикции, дополнительно стимулирует обратное рассеяние, которое, в свою очередь, усиливает интерференцию между накачкой и стоксовыми волнами и усиливает акустическую волну.

. Области применения SBS:

волоконно-оптическая связь, где, например, ВРМБ может проявляться через электрострикционное взаимодействие между солитонами в оптических волокнах;

влияние SBS на цифровые сигналы с модуляцией интенсивности, SBS в системах кабельного телевидения с амплитудной модуляцией;

мощные оптоволоконные лазеры,

оптические линии задержки для оптической памяти или рамановских усилителей SBS;

SBS в многомодовых и фотонно-кристаллических световодах (PCFs).

Тематикой выпускной квалификационной работы ограничено рассмотрение только SBS в оптических волокнах. Одним из ключевых отличий процессов ВРМБ в кристаллах от процессов в оптических волокнах является расширенное пространственное взаимодействие между накачкой и стоксовыми волнами в оптических волокнах. В результате необходимо учитывать оптические потери при возникновении шума в ВРМБ или при усилении Бриллюэна. Другое отличие от объемного взаимодействия связано с природой оптических и акустических волн в волокне. Было обнаружено, что наведение продольных акустических мод волоконной сердцевиной является очень важным эффектом. Зависимость профиля акустической моды от радиального изменения показателя преломления из-за легирования сердцевины световода напрямую влияет на величину усиления Бриллюэна. Волокна с разными профилями индекса имеют разные BGS и, следовательно, разные пороги SBS. Понимание особенностей акустооптического взаимодействия в цилиндрических волноводах позволяет контролировать усилением Бриллюэна посредством формирования профиля показателя преломления. Учет распространения как оптических, так и акустических мод имеет решающее значение для точности теоретического описания процесса рассеяния.

В разделе 2 (раздел *Введение* имеет номер 1) рассматривается физика процесса рассеяния и вводятся ключевые понятия и характеристики. Приемы улучшения SBST оптических волокон обсуждаются в разделе 3. Приложениям посвящен раздел 4. Итоги сформулированы в заключительном разделе работы. Ниже приводится более подробная структура работы:

1. Введение.

2. Основные физические понятия неупругого рассеяния света.

2.1.Связанные уравнения ВРМБ для эволюции управляемой оптической мощности

- 2.2. Шумовое инициирование ВРМБ.
- 2.3а. Порог ВРМБ.
- 2.3б. Уравнения для пороговой мощности ВРМБ
- 2.4. Волоконные усилители Бриллюэна.
- 3. Волокна с повышенным порогом ВРМБ
  - 3.1. Сегментированные волокна
  - 3.2. Другие подходы к подавлению ВРМБ.
- 4. ВРМБ в волоконно-оптических приложениях
  - 4.1. Радиоволоконная технология
  - 4.2. ВРМБ в волокнах с рмановской накачкой.
  - 4.3. Медленные световые и оптические линии задержки
  - 4.4. Волоконно-оптические датчики на основе ВРМБ
  - 4.5. Мощные волоконные лазеры
  - 4.6. ВРМБ в многомодовых волокнах
  - 4.7. ВРМБ в микроструктурных волокнах
- 5. Выводы
- Ссылки и примечания

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В выпускной квалификационной работе рассмотрена физика стимулированного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна(SBS) в оптических волокнах. Показана зависимость коэффициента усиления Бриллюэна волокна зависит от профиля показателя преломления волокна. Проанализированы аналитические результаты для порога SBS, инициированного шумом, полученные из различных приближений. Рассмотрены подходы к контролю усиления Бриллюэна в волокне. Привлекательным методом является формирование профиля показателя преломления в целях как для подавления, так и для усиления Бриллюэна. Рассмотрены VFAs и распределенные датчики. радиоволоконная технология, линии медленного света и оптической задержки, мощные лазеры.

## СПИСОК АНГЛОЯЗЫЧНЫХ АББРЕВИАТУР

<b>Аббревиатура</b>	<b>Физическое понятие</b>
BFA	Brillouin fiber amplifier
BGS	Brillouin gain spectrum
DCF	dispersion-compensating fiber
DPSK	differential phase-shift keying (modulation format)
EDFA	erbium-doped fiber amplifier
EVM	error vector magnitude
FWHM	full width at half-maximum
MMF	multimode fiber
MZM	Mach–Zehnder modulator
NRZ	nonreturn to zero (modulation format)
ODE	ordinary differential equation
PCF	photonic crystal fiber
PON	passive optical network
RF	radio frequency
SNR	signal-to-noise ratio
SBS	stimulated Brillouin scattering
SBSTSBS	threshold power
UPA	undepleted pump approximation
WLAN	wireless local area network