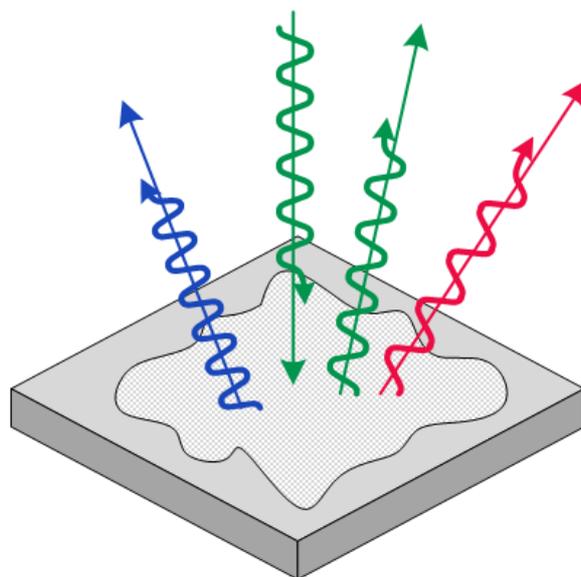


**В.А. Новикова, С.В. Варжель**

**РАСSEЯНИЕ СВЕТА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ  
В ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ**



**Санкт-Петербург  
2019**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**В.А. Новикова, С.В. Варжель**  
**РАССЕЯНИЕ СВЕТА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ**  
**В ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика  
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург  
2019

Новикова В.А., Варжель С.В., Рассеяние света и его применение в волоконной оптике – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 39 с.

Рецензент(ы):

Тер-Нерсесянц Егише Вавикович, кандидат технических наук, заместитель начальника НПК «ВОЛОКНО», начальник лаборатории оптических волокон, Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»

В данном учебном пособии продемонстрированы физические принципы, лежащие в основе явления рассеяния электромагнитного излучения в среде. С точки зрения классических и квантовых трактовок описаны различные виды упругого и неупругого рассеяний, их отличительные особенности. Также представлены принципы действия различных устройств, в большей степени волоконно-оптических, работа которых основана на эффекте рассеяния.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019  
© Новикова В.А., Варжель С.В., 2019

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| <b>Предисловие</b>  | 4  |
| <b>Глава 1. Физические основы упругого и неупругого рассеяний</b>                           | 5  |
| 1.1. Виды упругого рассеяния  | 5  |
| 1.1.1. Рассеяние Гиндаля  | 5  |
| 1.1.2. Рэлеевское рассеяние   | 7  |
| 1.1.3. Рассеяние Ми   | 12 |
| 1.2. Виды неупругого рассеяния  | 13 |
| 1.2.1. Спонтанное и вынужденное комбинационное<br>рассеяние                                 | 13 |
| 1.2.2. Спонтанное и вынужденное рассеяние<br>Мандельштама-Бриллюэна                         | 18 |
| Вопросы для самоконтроля (Глава 1)  | 23 |
| Список использованной литературы (Глава 1)  | 24 |
| <b>Глава 2. Виды и общие принципы работы устройств, основанных<br/>на явлении рассеяния</b> | 26 |
| 2.1. Оптическая рефлектометрия  | 26 |
| 2.2. Применение комбинационного рассеяния   | 28 |
| 2.2.1. Рамановская спектроскопия  | 28 |
| 2.2.2. Усилитель на вынужденном комбинационном<br>рассеянии                                 | 30 |
| 2.2.3. Рамановский лазер  | 31 |
| 2.2.4. Волоконно-оптический датчик на комбинационном<br>рассеянии                           | 32 |
| 2.3. Волоконно-оптический датчик на рассеянии<br>Мандельштама-Бриллюэна                     | 34 |
| Вопросы для самоконтроля (Глава 2)  | 36 |
| Список использованной литературы (Глава 2)  | 37 |

## Предисловие

Один из возможных результатов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом заключается в проявлении эффекта рассеяния, приводящего к изменению пространственного распределения, частоты и поляризации излучения. В свою очередь, если частоты падающего и рассеянного излучений одинаковы, такое взаимодействие называется упругим, в ином случае возникает смещение частоты относительно первичного излучения и, соответственно, имеет место неупругое рассеяние. Первые попытки исследования закономерностей данного явления начали вестись в XIX веке, и уже в 1871 году, благодаря трудам британского физика лорда Рэля, установившего зависимость интенсивности рассеянного света от длины волны, были заложены основы теории молекулярного рассеяния света.

На сегодняшний день эффекты упругого и неупругого рассеяний стали основой в таких областях, как рефлектометрия и спектроскопия, а также активно применяются при создании лазеров и оптических усилителей. В свою очередь, развитие волоконной оптики позволило создавать распределенные системы мониторинга температуры, механических напряжений, акустических колебаний, принцип работы которых основан на эффекте рассеяния.

В первой главе настоящего учебного пособия представлен краткий исторический обзор основных этапов становления теории рассеяния света, а также описаны физические принципы, лежащие в основе явления рассеяния электромагнитного излучения. Вторая глава посвящена описанию общих принципов работы различных устройств, функционирующих на явлении рассеяния, при этом значительное внимание уделено волоконно-оптическим приборам. В общем виде учебное пособие позволяет сформировать у читателя целостную картину об эффекте рассеяния, понять возможные классификации и природу данного явления, а также изучить его практическую значимость и спектр применений.

Настоящее учебное пособие рекомендовано к использованию в Университете ИТМО по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика для реализации дисциплины «Рамановское и Мандельштам-Бриллюэновское рассеяния в оптических волокнах и их применение», входящей в международную образовательную программу магистратуры «Световодная фотоника и программируемая электроника». Учебное пособие будет полезно студентам для освоения теоретической части курса в ходе выполнения самостоятельной работы (подготовка к практическим занятиям и к сдаче зачета).

## Глава 1. Физические основы упругого и неупругого рассеяний

Электромагнитные волны – это поперечные колебания электромагнитного поля, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью. Оптическое излучение, рентгеновское излучение, гамма-излучение, а также радиоволны являются электромагнитными волнами с различными длинами волн  $\lambda$ , при этом имеют одну общую природу и описаны теорией Максвелла<sup>1</sup> [1]. Для всех электромагнитных волн скорость распространения в вакууме  $c$  одинакова и связывает между собой длину волны  $\lambda$  и частоту колебаний  $\nu$  по формуле 1.1:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

На рисунке 1 представлена единая шкала, на которой продемонстрирован весь спектр электромагнитных волн.

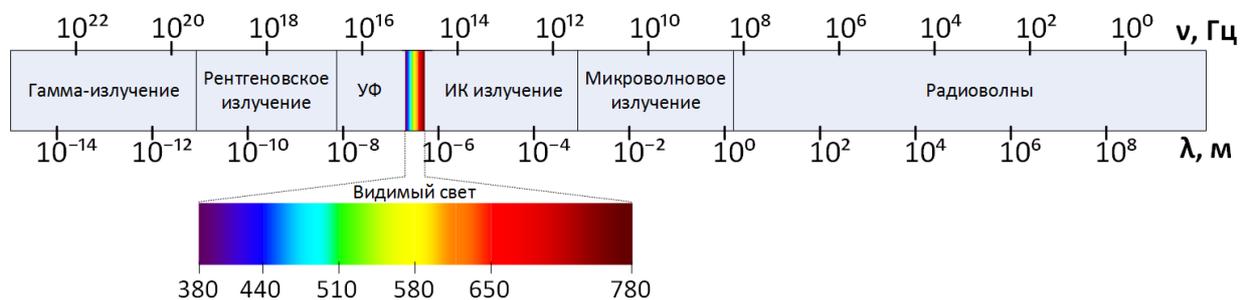


Рис. 1. Шкала электромагнитного излучения

При распространении электромагнитных волн в средах с неоднородностями наблюдаются такие эффекты, как дифракция, эффект Комптона, рассеяние и т. д. Данное пособие посвящено изучению явления рассеяния света в оптическом диапазоне длин волн на частицах различного диаметра, а также на акустических волнах.

Рассеяние света, в общем случае, представляет собой отклонение от первоначального направления движения фотона вследствие его столкновения с частицами среды. В случае упругого рассеяния результатом такого взаимодействия является только изменение направления распространения, при этом не осуществляется перераспределения энергий между фотоном и частицей.

### 1.1. Виды упругого рассеяния

#### 1.1.1. Рассеяние Тиндаля

В 1857 году Майкл Фарадей<sup>2</sup> после многочисленных исследований получил устойчивые коллоидные растворы золота, представляющие собой наночастицы

<sup>1</sup> Джеймс Клерк Максвелл (13 июня 1831 г. – 5 ноября 1879 г.) – британский физик, математик и химик, член Лондонского королевского общества, заложил основы современной классической электродинамики.

<sup>2</sup> Майкл Фарадей (22 сентября 1791 г. – 25 августа 1867 г.) – английский физик-экспериментатор, химик, член Лондонского королевского общества, создатель учения об электромагнитном поле.

золота, взвешенные в деминерализованной воде. Представляя результаты своих исследований о химических методах получения коллоидов золота, М. Фарадей связал красный цвет полученных коллоидных растворов (хотя сам металл был желтого цвета) с размерами частиц золота, но не исследовал их оптические свойства. Лишь спустя полвека было дано математическое объяснение рассеяния света наноразмерными частицами шарообразных форм, диаметр которых определяет цвет коллоидного раствора.

Напарником М. Фарадея по исследованию коллоидных растворов золота был Джон Тиндаль<sup>3</sup>. Его изучение результатов взаимодействия световых лучей с различными средами привело к открытию эффекта Тиндаля (англ. Tyndall effect), что стало первым обширным исследованием рассеяния света [2,3]. В ходе проведения экспериментов было выявлено, что при прохождении света через коллоидную среду (например, аэрозоли, коллоидные растворы, пену и т. д.) эффект рассеяния уменьшается при изменении длины волны излучения от коротковолновой к длинноволновой части спектра (т.е. при переходе от синего к красному цвету). При пропускании белого света (он содержит в себе весь цветовой спектр, например, солнечный свет) через коллоидную систему в большей степени рассеивается коротковолновая часть спектра, при этом рассеяние практически отсутствует для длинноволнового диапазона (от зелёного к красному).

На рисунке 2 представлен эффект Тиндаля для монохроматического излучения, где *а* – прохождение света через чистую прозрачную среду, *б* – прохождение света через коллоидную среду, во втором случае на экране более размытое пятно, что связано с появлением конуса Тиндаля при прохождении световых лучей.

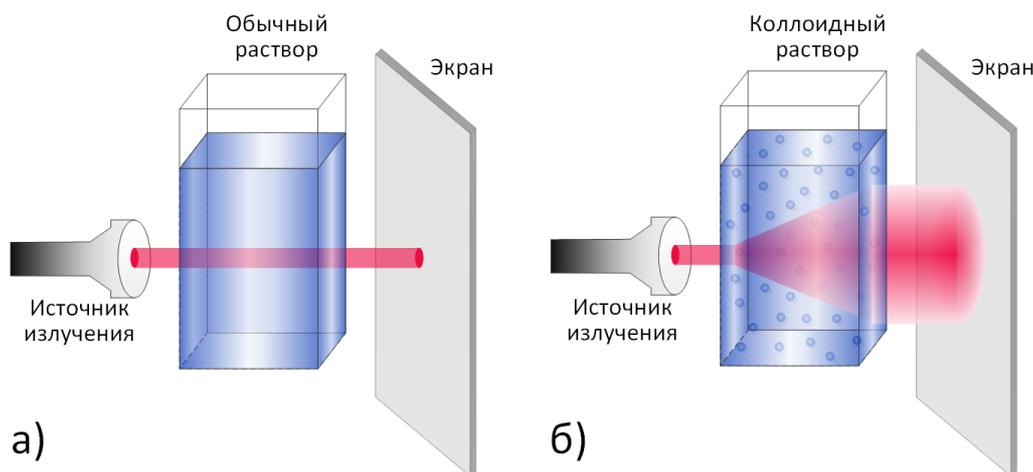


Рис. 2. Демонстрация а) отсутствия эффекта Тиндаля в обычном растворе и б) наблюдения эффекта Тиндаля в коллоидном растворе

<sup>3</sup> Джон Тиндаль (2 августа 1820 г. – 4 декабря 1893 г.) – английский физик, химик, член Лондонского королевского общества, работал под научным руководством Майкла Фарадея.

Эффект Тиндаля объясняется дифракцией света на взвешенных частицах, размеры которых малы по сравнению с размерами длин волн излучения [4]. Источниками свечения в веществе являются «дифракционные пятна», достаточно различимые под микроскопом. Для заданного направления интенсивность рассеянного света определяется количеством и размером взвешенных частиц. Данный эффект используется для описания коллоидных систем посредством оптического обнаружения рассеивающих частиц, определения их размеров и концентрации (ультрамикроскопия).

Наиболее распространенный пример эффекта Тиндаля, с которым мы встречаемся постоянно, – это голубой цвет глаз. Радужная оболочка состоит из двух слоёв – внутреннего эктодермального (всегда тёмного слоя ввиду содержания в нём большого количества пигмента) и внешнего мезодермального (подразделяющегося на передний пограничный и строму, в которой присутствуют коллагеновые волокна и сосуды). Для голубого цвета глаз характерно присутствие небольшого количества меланина; в результате этого, проходя через радужную оболочку, красная часть спектра без рассеяния доходит до внутреннего эктодермального и поглощается меланином, а синяя часть спектра рассеивается на редких молекулах меланина и коллагеновых волокнах, что позволяет наблюдать голубой цвет глаз. У альбиносов во внутреннем эктодермальном слое меланин либо отсутствует полностью – тогда цвет глаз красный ввиду наличия в строме сосудов, либо присутствует в очень маленьком количестве – тогда цвет глаз фиолетовый вследствие наложения эффекта Тиндаля на красный цвет сосудов [5].

Рассеяние Тиндаля – упругое, то есть, попадая на частицу, фотон поглощается и переизлучается в любом направлении. При этом размеры взвешенных частиц в разы превышают размеры атомов. На первый взгляд кажется, что голубой цвет неба, как и цвет глаз, связан с рассеянием Тиндаля, но в этом случае имеет место уже другой эффект.

### **1.1.2. Рэлеевское рассеяние**

В 1871 году Джон Уильям Рэлей<sup>4</sup> заложил основы теории молекулярного рассеяния света и продемонстрировал зависимость интенсивности рассеянного света от длины волны. Рэлеевское рассеяние (как и Тиндаля) представляет собой упругое рассеяние на частицах, размеры которых значительно меньше длины волны излучения (англ. Rayleigh scattering).

Для начала рассмотрим классическую картину рассеяния, которая наиболее простым языком объясняет рассеяние Рэля. Электрическое поле электромагнитной волны, периодически изменяющееся во времени

---

<sup>4</sup> Джон Уильям Стретт, третий барон Рэлей (12 ноября 1842 г. – 30 июня 1919 г.) – британский физик и механик, лауреат Нобелевской премии по физике, член Лондонского королевского общества (в 1905-1908 гг. – его президент).

(осциллирующее), приводит к колебаниям электронного облака атома [6]. При этом электроны, на которые воздействует излучение, являются источниками вторичных волн (рисунок 3).

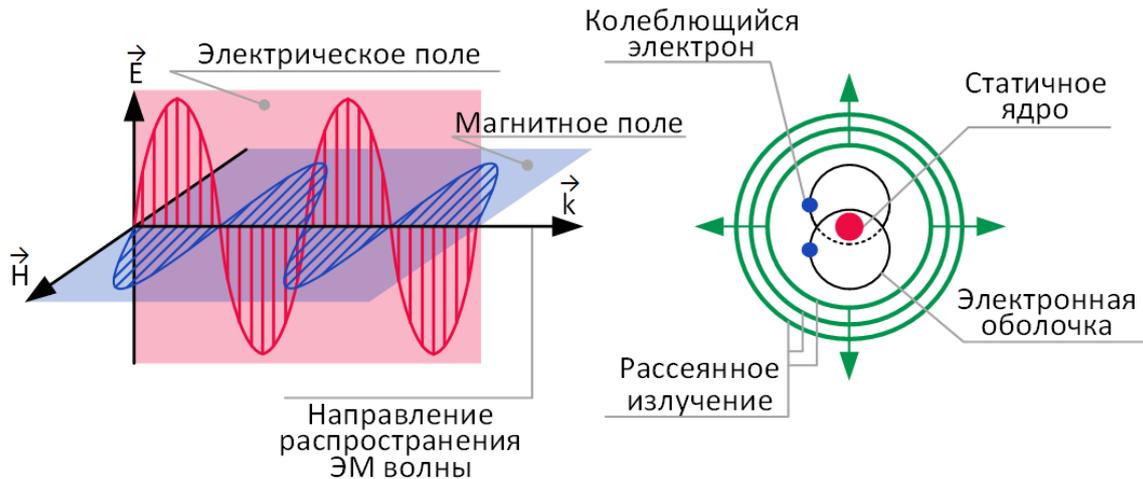


Рис. 3. Классическая картина рэлеевского рассеяния

Электромагнитная волна вынуждает колебаться электрон, и с ростом ускорения частицы увеличивается амплитуда волны, которую испускает электрон. В какой-то момент времени электромагнитное поле, «огибающее» электрон, не успевает колебаться с той же частотой, с которой колеблется электрон, и «отрывается» от него. Таким образом, собственное поле электрона переходит в рассеянный свет с той же частотой, что и падающая электромагнитная волна. Данное объяснение отражает физику процесса с точки зрения таких понятий, как волна, частицы (электроны), поля, но всё это относится к классической картине рассеяния. Для полного представления процесса рассеяния необходимо рассмотреть не только классическую, но и квантовую теорию, поясняющую «внутреннюю» физику процесса.

С квантовой точки зрения рэлеевское рассеяние протекает в два этапа и описывается следующим образом. Электрон атома, поглощая падающий на него квант света (энергия которого  $h\nu_\phi$ , где  $h$  – постоянная Планка), переходит на виртуальный уровень (рисунок 4). Энергия падающего кванта недостаточна для того, чтобы электрон перешёл на следующий уровень, поэтому он переходит на так называемый виртуальный уровень (рисунок 4(a)), на котором электрон существует очень короткий промежуток времени, после чего электрон возвращается на начальный энергетический уровень, а квант переизлучается с той же энергией, но в любом направлении.

Необходимо понимать разницу между флуоресценцией (рисунок 4(б)) и рассеянием. Во-первых, флуоресценция приводит к испусканию фотона с частотой  $\nu_\phi - \Delta\nu^*$ , отличной от частоты возбуждающего излучения

(следовательно, меняется и длина волны). Во-вторых, если при рассеянии электронам сообщается энергия, недостаточная для их перехода на следующий энергетический уровень, то в случае с флуоресценцией электрон сначала переходит на более высокий энергетический уровень, попадая на любой подуровень  $\nu$  и релаксируя на нижний подуровень  $\nu = 0$ . Кратковременное свечение при флуоресценции поясняется тем, что первоначальная энергия, за счёт которой осуществляется перевод электрона в другое энергетическое состояние, отличается от той энергии, которую испускает фотон при переходе с возбужденного энергетического состояния  $E_1$  на первоначальный уровень  $E_0$ . Таким образом, после релаксации, во время которой энергия излучается в виде теплового излучения, испускается меньшая (по сравнению с энергией падающего фотона) энергия, следовательно, при флуоресценции в большинстве случаев испускается свет большей длины волны, чем первоначальное излучение [7].

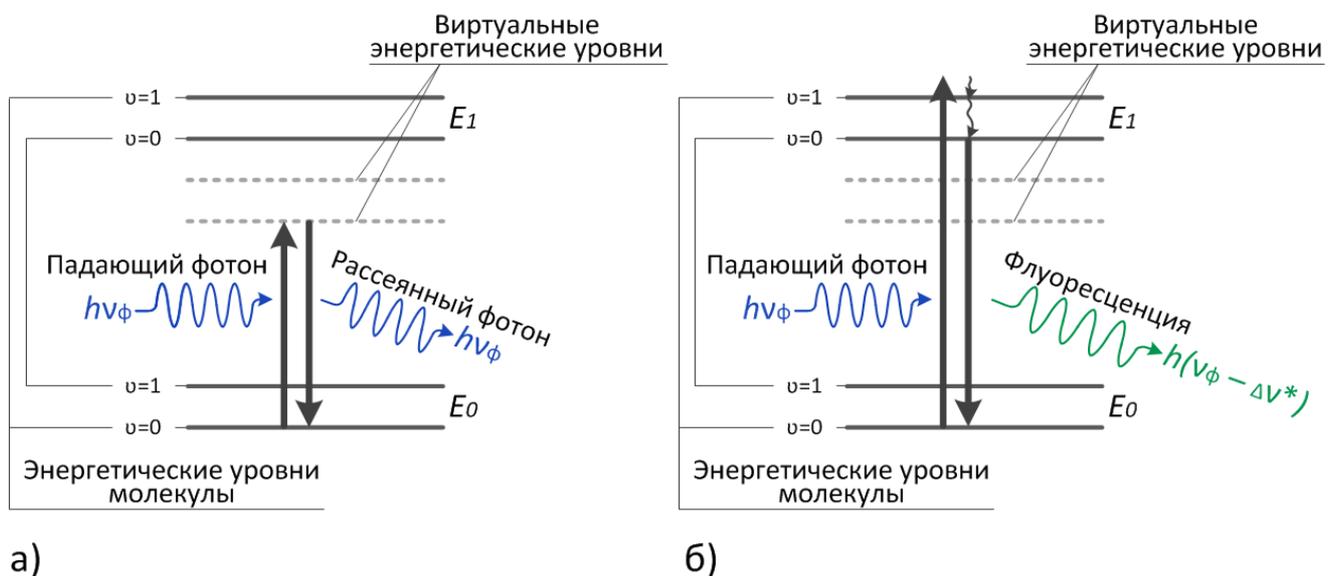


Рис. 4. Квантовая трактовка а) рэлеевского рассеяния и б) флуоресценции

После переизлучения фотон может рассеяться в любую сторону, но существуют наиболее и наименее вероятные направления, зависящие от состояния поляризации падающего излучения и представленные на рисунке 5 в виде утолщённых и тонких линий соответственно. Для естественного (неполяризованного) света с большей вероятностью фотон рассеется вперёд (0 градусов) и назад (180 градусов), с меньшей вероятностью – под углом 90 градусов относительно первоначального направления распространения волны (рисунок 5(a)). Если падающее излучение линейно поляризовано, то рассматриваются два случая распределения интенсивности рассеянного света:

- 1) распределение равномерно по всем направлениям (рисунок 5(б)), когда вектор напряженности электрического поля перпендикулярен плоскости рассеяния (плоскость рассеяния – это плоскость, образованная двумя

- пересекающимися прямыми, одна из которых совпадает с направлением распространения излучения, а вторая – с направлением наблюдения);
- 2) распределение имеет форму, представленную на рисунке 5(в), когда вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости рассеяния.

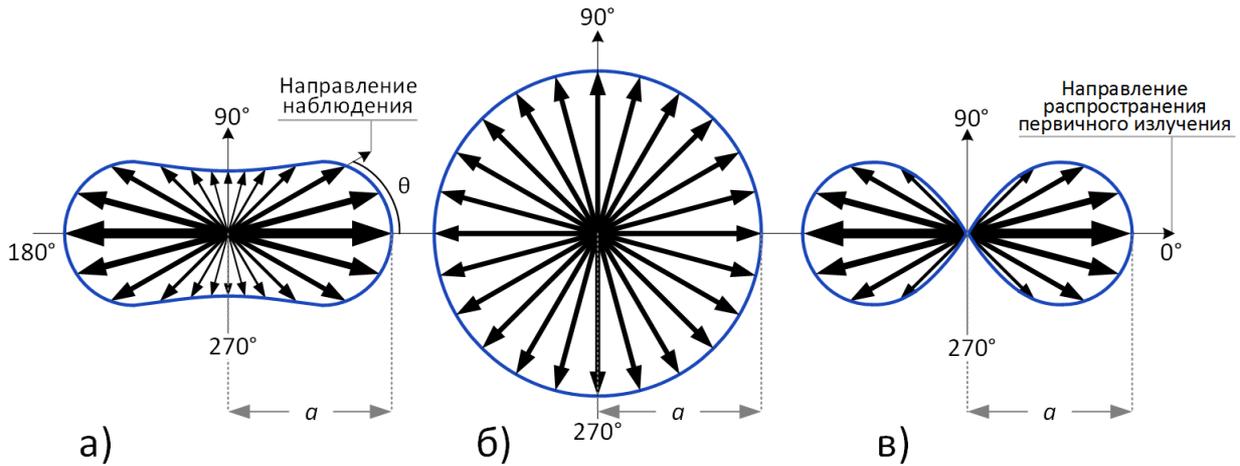


Рис. 5. Индикатриса рэлеевского рассеяния

Синяя кривая, изображенная на рисунке 5, называется индикатрисой и отражает распределение интенсивности рассеянного света  $I$  в зависимости от угла  $\theta$  между наблюдателем и первичным пучком. Стоит отметить, что для всех случаев, представленных на рисунке 5, расстояния от центров фигур до индикатрис в направлениях 0 и 180 градусов равны (отрезок  $a$ ). Для случая неполяризованного света интенсивность  $I$  описывается выражением 1.2: [8]

$$I \sim 1 + \cos^2 \theta \quad (1.2)$$

а для поляризованного (в случае, когда вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости рассеяния) выражением 1.3:

$$I \sim \cos^2 \theta \quad (1.3)$$

Как уже было указано ранее, после рассеяния интенсивность света в различных направлениях зависит от поляризации падающего излучения. Ещё одной особенностью рэлеевского рассеяния является зависимость интенсивности рассеянного света от падающей длины волны ( $\lambda$ ). В действительности, коротковолновые лучи рассеиваются сильнее, чем длинноволновые, по следующему закону:

$$I \sim 1/\lambda^4 \quad (1.4)$$

Такая зависимость носит название закон Рэля и даёт полное представление о природе цвета неба. В полном виде формула Рэля выглядит следующим образом:

$$I = \frac{9\pi^2(1 + \cos^2 \theta)}{2r^2\lambda^4} \left( \frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2 V^2 I_0 \quad (1.5)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего света,  $r$  – расстояние от наблюдателя до частицы,  $n_1$  и  $n_0$  – показатели преломления дисперсной фазы и дисперсной среды,  $V$  – объём рассеивающей частицы. Дисперсная система в целом представляет собой дисперсную фазу (вещество которое распределено) и дисперсную среду (вещество, в котором распределено), при этом агрегатные состояния фазы и среды могут быть как одинаковы (например, воздух), так и различны, при этом не смешиваясь (аэрозоли). Из формулы 1.5 видно, что интенсивность рассеянного излучения зависит от размеров частиц, но необходимо учитывать, что они не превышают длину волны излучения.

Один из наиболее распространённых примеров рэлеевского рассеяния – это цвет неба. Атмосфера Земли представляет собой смесь различных газов приблизительно следующего состава (по объёму): 78% – азот, 21% – кислород и 1% – другие газы (аргон, неон, углекислый газ и т.д.). Солнечный свет, дошедший до поверхности земли, – это набор различных длин волн, при этом интенсивности излучения для каждой длины волны различны (рисунок 6) [9]. Проходя через атмосферу Земли, согласно закону Рэля, коротковолновая часть спектра рассеивается сильнее, в результате чего небо должно окрашиваться в фиолетово-синий цвет. Несмотря на это мы наблюдаем голубой цвет неба, что поясняется двумя причинами: во-первых, согласно рисунку 6, максимальная интенсивность солнечного излучения приходится на сине-зелёную часть спектра, во-вторых, человеческий глаз более чувствителен к синему (по сравнению с фиолетовым) цвету [10].

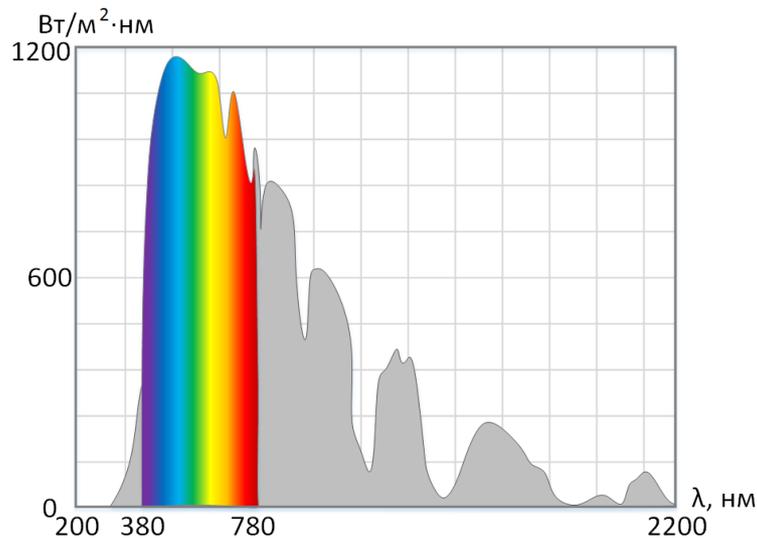


Рис. 6. Спектр электромагнитного излучения Солнца, дошедшего до поверхности земли

В свою очередь, красно-оранжевый цвет восходов и закатов объясняется тем, что солнечный свет идёт по касательной к Земле и преодолевает значительно

большее расстояние в атмосфере. В таком случае, коротковолновая часть спектра рассеивается и её интенсивность уменьшается при увеличении расстояния до точки наблюдения (формула 1.5), что, в совокупности, приводит к тому, что мы видим длинноволновую часть спектра.

### 1.1.3. Рассеяние Ми

Ещё одним видом упругого рассеяния является рассеяние на сферических частицах, размеры которых сравнимы с длиной волны (англ. Mie scattering). В случае, когда размеры частиц достигают значений, превышающих  $0,1\lambda$ , формула 1.5 перестаёт описывать интенсивность рассеянного света. Данный вид рассеяния был открыт Густавом Ми<sup>5</sup> в 1908 году и имеет ряд отличительных параметров в сравнении с рэлеевским рассеянием.

Первое отличие заключается в том, что при рэлеевском рассеянии в объёме одной частицы все элементарные рассеиватели (молекулы) излучают когерентно. С увеличением размера частиц (переход от теории Рэля к теории Ми) количество элементарных рассеивателей в пределах одной частицы увеличивается, что приводит к следующему: излучение, после рассеяния на одном элементарном рассеивателе, доходит до другого, на которое действует уже как первичное излучение, так и рассеянное. Таким образом, можно сказать, что элементарные рассеиватели внутри одной частицы находятся не в одинаковых электромагнитных полях.

Второе отличие проявляется в сильной зависимости интенсивности излучения от направления рассеяния (другой вид индикатрисы рассеяния). При рассеянии Ми учитывается как разность фаз самих элементарных рассеивателей, так и разность фаз, вызванная расстояниями между этими рассеивателями. В свою очередь, в теории Рэля не имеет значение направление распространения; для интерференции рассеянных внутри одной частицы излучений необходимо только одинаковое значение разности фаз.

В теории Ми укрупнение частиц приводит к изменению индикатрисы рассеяния:

1. при размерах частиц  $0,1\lambda-1,0\lambda$  преобладает рассеяние вперёд по направлению распространения первичного излучения;
2. при размерах частиц, превышающих  $1,0\lambda$ , под различными углами распространения появляются дополнительные «лепестки» максимумов интенсивности (рисунок 7) [11-12].

---

<sup>5</sup> Густав Адольф Фёдор Вильгельм Людвиг Ми (29 сентября 1868 г. – 13 февраля 1957 г.) – немецкий физик, внёс большой вклад в развитие электродинамики и теории относительности, предложил одну из первых электромагнитных теорий строения материи.

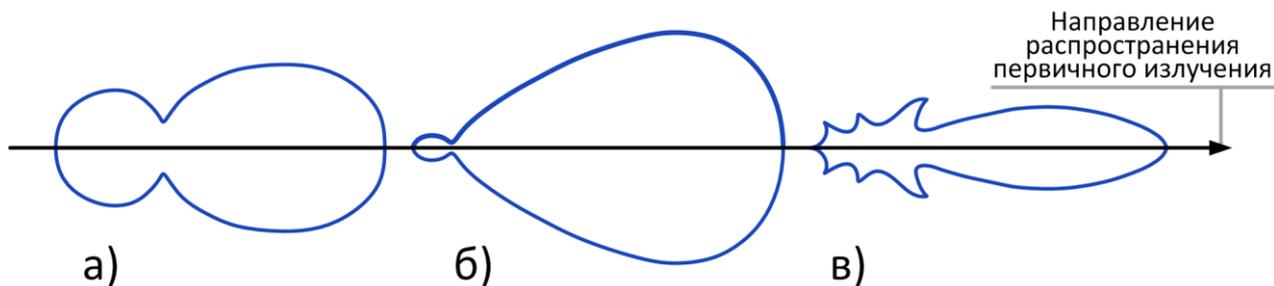


Рис. 7. Индикатрисы рассеяния для частиц, размеры которых равны: а)  $1/3\lambda$ ; б)  $1,0\lambda$ ; в) более  $1,0\lambda$

Наиболее распространенным примером рассеяния Ми является белый цвет облаков. В отличие от рассеяния Рэля, при котором интенсивность рассеянного света зависит от длины волны в четвертой степени, для крупных частиц такая зависимость не характерна, в результате чего рассеяние на крупных частицах подразумевает равномерное по длинам волн рассеяние. Капли воды, содержащиеся в облаках, являются такими частицами, на которых излучение рассеивается одинаково во всём диапазоне длин волн, результат такого явления – наблюдение белого цвета облаков.

## 1.2. Виды неупругого рассеяния

Ранее мы рассмотрели упругое рассеяние, которое не сопровождается внутренними изменениями состояний рассеивающей частицы и воздействующего на неё излучения. В данном разделе будет описано неупругое рассеяние, которое приводит к изменению спектра рассеянного излучения относительно первичного света.

### 1.2.1. Спонтанное и вынужденное комбинационное рассеяние

Комбинационное рассеяние (англ. Raman scattering) – один из видов неупругого рассеяния, предсказанный в 1923 году Адольфом Смекалом<sup>6</sup>. Позже, в 1928 году, свои исследования продемонстрировали независимые друг от друга группы учёных, изучающие данное явление в твёрдых и жидких веществах. В 1926-1927 годах Г.С. Ландсберг<sup>7</sup> представил две работы, в которых было отмечено, что большая часть рассеянного света (75%) линейно зависит от температуры – что указывало на его молекулярное происхождение. В дальнейшем Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам<sup>8</sup> провели исследование

<sup>6</sup> Адольф Смекал (12 декабря (сентября) 1895 г. – 7 марта 1959 г.) – австрийский физик-теоретик, работал в областях квантовой теории, статистической механики, квантовой статистики, физике кристаллов, атомной и технической физике.

<sup>7</sup> Григорий Самуилович Ландсберг (10 (22) января 1890 г. – 2 февраля 1957 г.) – советский физик, член Академии наук СССР, работал в областях оптики и спектроскопии.

<sup>8</sup> Леонид Исаакович Мандельштам (22 апреля (4 мая) 1879 г. – 27 ноября 1944 г.) – советский физик, один из основателей отечественной научной школы по радиофизике, член Академии наук СССР, работал в областях оптики, радиофизики, теории нелинейных колебаний, квантовой теории и методологии физики.

спектров образцов кварца, в которых наблюдались дополнительные линии (спутники), отсутствовавшие в спектре первичного света [13]. Различные опыты по исследованию природы света этих линий (подразумевалось, что они могли быть вызваны бликами из-за отражений) позволяли сделать вывод об открытии нового эффекта. Параллельно с группой советских учёных схожее явление наблюдали индийские физики во главе с Ч.В. Раманом<sup>9</sup>, но уже в жидких средах. Первоначально дополнительные линии в спектре объяснялись флуоресценцией (кратковременным свечением вещества при облучении его светом), но эта идея была опровергнута в связи с присутствием эффекта даже после химического очищения. Продолжительные поиски природы наблюдаемого явления привели Ч.В. Рамана к идее о том, что необходимо рассмотреть данный эффект как аналог эффекта Комптона. В результате проведённых исследований в 1928 году обеими группами учёных был сделан вывод об открытии нового эффекта, приводящего к изменению частоты рассеянного света относительно первичного излучения; позже, в 1930 году Ч.В. Раман получил Нобелевскую премию по физике «за работы по рассеянию света и за открытие эффекта, названного в его честь».

Комбинационное рассеяние (иначе называемое рамановским рассеянием) происходит не на атомах (как в случае с упругим рассеянием), а на молекулах вещества, точнее на молекулярных колебаниях среды. Как известно, в молекулах существует три вида движений [14]:

- 1) электронные – движение электронов вокруг ядер;
- 2) колебательные – колебание ядер относительно своего положения равновесия;
- 3) вращательные – колебание ядер относительно движения молекулы (т.е. вращение молекул как целого).

Новые линии (называемые «спутниками» или «сателлитами») в спектре рассеяния являются комбинацией частот падающего света и частот колебательных и вращательных переходов – этим и объясняется название «комбинационное рассеяние» [15].

Рассмотрим классическое объяснение данного вида рассеяния. Наиболее простой вариант, на котором можно представить классическую картину рассеяния, – это двухатомная молекула, в которой атомные ядра колеблются с частотой  $\nu$  (рисунок 8). Такие колебания приводят к модуляции (изменению) поляризуемости молекулы [16]. В свою очередь, прохождение электромагнитной волны с частотой  $\nu_{\phi}$  индуцирует дипольный момент молекулы, что в результате приводит к появлению рассеянного света с частотой, отличной от падающего на  $\Delta\nu$ .

---

<sup>9</sup> Чандрасекхара Венката Раман (7 ноября 1888 г. – 21 ноября 1970 г.) – индийский физик, член Индийской Академии наук (её основатель и президент), лауреат Нобелевской премии по физике.

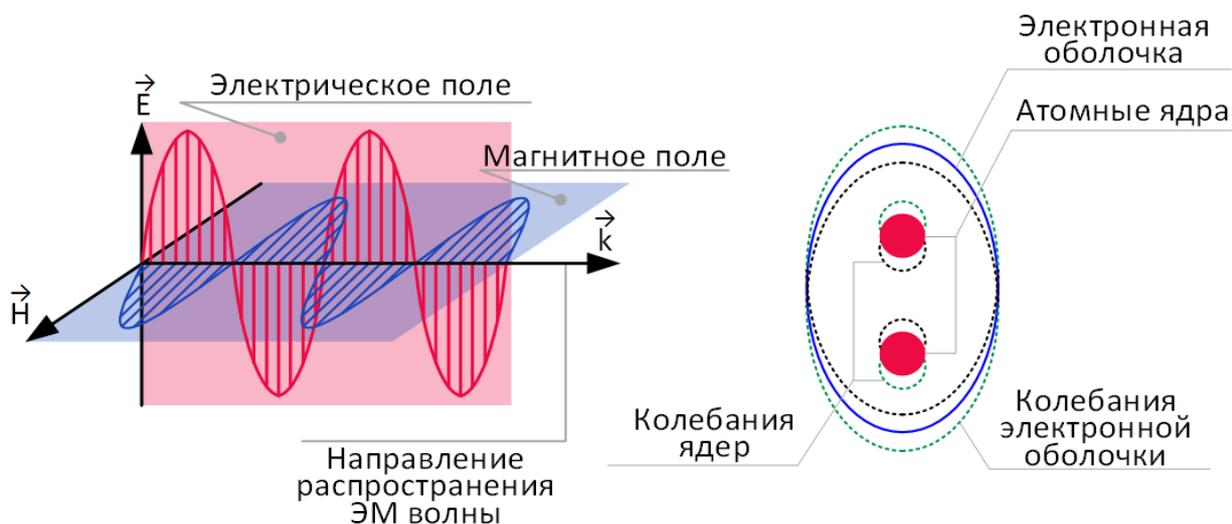


Рис. 8 Классическая картина комбинационного рассеяния

Строение и молекулярный состав вещества, через которое проходит электромагнитная волна, в результате определяет конечный спектр рассеянного излучения.

С точки зрения квантовой теории при столкновении фотона с частицей происходит изменение их энергий, в результате чего рассеянный фотон принимает или отдаёт часть энергии, а молекула переходит на другой энергетический уровень – объясним это на примере перехода молекулы между нулевым и первым колебательными уровнями, разность энергий между которыми  $\Delta E$  (рисунок 9).

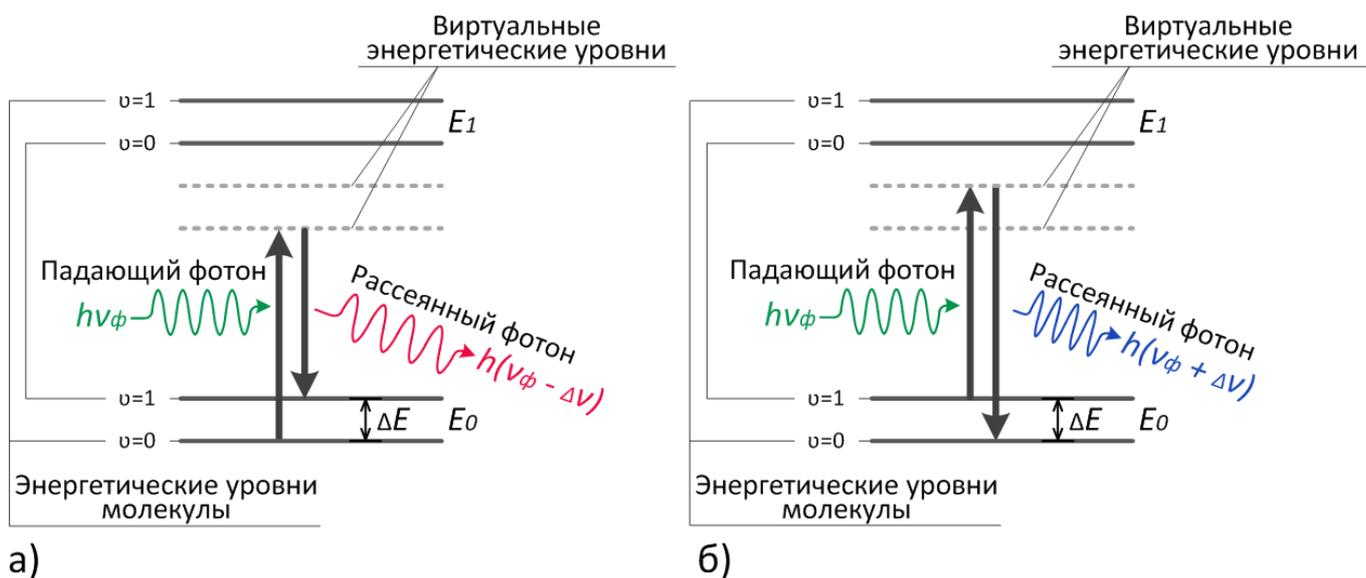


Рис. 9. Квантовая трактовка комбинационного рассеяния для а) стоксовой и б) антистоксовой компонент

Молекула, находясь на энергетическом уровне  $E_{00} = h\nu_{00}$  (первая цифра индекса обозначает номер электронного уровня  $E$ , вторая цифра – номер колебательного уровня  $\nu$ ;  $h$  – постоянная Планка), после взаимодействия с фотоном, обладающим энергией  $E_{\phi} = h\nu_{\phi}$ , переместилась сначала на виртуальный уровень, а затем на другой энергетический уровень  $E_{01} = h\nu_{01}$ , испустив при этом фотон с энергией  $h(\nu_{\phi} - \Delta\nu)$ , где  $\Delta\nu = \nu_{01} - \nu_{00}$  (рисунок 9(a)).

В зависимости от того, на каком уровне находится молекула до взаимодействия с фотоном, определяется знак в выражении частоты дополнительной линии  $\nu_{\phi} \pm \Delta\nu$ . В случае, если молекула находится на уровне  $E_{00}$  (рисунок 9(a)), рассеянный фотон имеет частоту  $(\nu_{\phi} - \Delta\nu)$ , что проявляется в спектре рассеяния в виде дополнительной линии, имеющей частоту  $(\nu_{\phi} - \Delta\nu)$  – стоксова компонента; если молекула находится на уровне  $E_{01}$  (рисунок 9(б)), то в спектре рассеяния появляется дополнительная линия, смещённая на частоту  $(\nu_{\phi} + \Delta\nu)$  – антистоксова компонента (рисунок 10).

Значение  $\nu_{\phi} \pm \Delta\nu$  определяется комбинацией частот электромагнитного излучения и собственных колебаний молекул. Анализируя спектр рамановского рассеяния, можно сделать вывод о молекулярном составе исследуемого вещества, что лежит в основе такой области исследований, как рамановская спектроскопия. Один из вариантов исполнения рамановского спектрометра в общем виде будет представлен в Главе 2.

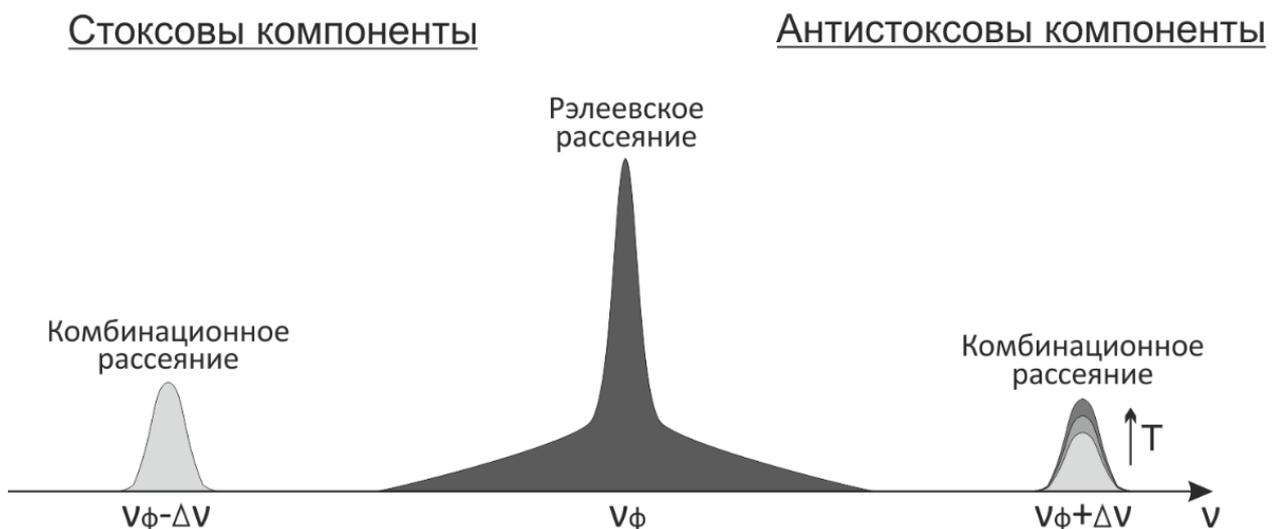


Рис. 10. Компоненты комбинационного и рэлеевского рассеяний с учётом влияния температуры

Как видно из рисунка 10, интенсивность антистоксовой компоненты зависит от температуры, при этом стоксова компонента не чувствительна к

температурным флуктуациям. Интенсивность обеих компонент определяется вероятностью рассеяния на молекулах, которая прямо пропорциональна количеству рассеивающих молекул. При комнатной температуре заселённость основного колебательного уровня больше заселённости высших уровней, что обуславливает более вероятный процесс появления именно стоксовой компоненты и, соответственно, интенсивность такой компоненты выше, чем у антистоксовой. В свою очередь, с увеличением температуры всё большее число частиц переходит на возбуждённые колебательные уровни, и, как следствие, вероятность рассеяния с этих уровней увеличивается.

Представленный ранее механизм комбинационного рассеяния относится к спонтанному (англ. *spontaneous Raman scattering*), при котором каждая молекула излучает в любом направлении и суммарная интенсивность рассеянной волны составляет порядка  $10^{-5} - 10^{-6}$  от интенсивности падающей волны [17]. В 1962 году, после появления лазеров, были проведены эксперименты, в которых происходило воздействие высокоинтенсивного излучения на рассеивающую среду, что приводило к экспоненциальному росту интенсивности рассеянной волны от увеличения интенсивности волны накачки. При протекании данного эффекта, названного вынужденным комбинационным рассеянием, интенсивности падающей и рассеянной волн соизмеримы (англ. *stimulated Raman scattering*) [18-19].

Ввиду того, что с увеличением интенсивности излучения растёт вероятность рассеяния на одной молекуле, свет рассеется на большем количестве молекул, в результате чего интенсивность рассеянного излучения возрастет. Первичное излучение с частотой  $\nu_{\phi}$  отличается от рассеянного излучения с частотой  $\nu_{\phi} \pm \Delta\nu$  на компоненту с разностной частотой  $\Delta\nu$ , которая, в конечном итоге, будет воздействовать на частицы среды и приводить к усилению интенсивности рассеяния. В целом, можно говорить о том, что именно одновременное воздействие падающего и рассеянного излучений приводит к резкому росту интенсивности стоксовой компоненты. Таким образом, сам рассеянный свет побуждает к ещё большему рассеянию (к поддержанию эффекта), то есть «вынуждает» рассеиваться с большей интенсивностью, что и объясняет название «вынужденное комбинационное рассеяние».

При преодолении определённого порога интенсивности (мощности) накачки начинается экспоненциальный рост зависимости интенсивности стоксовой компоненты от интенсивности лазера – рост продолжается до достижения состояния насыщения.

Как и в случае со спонтанным комбинационным рассеянием, более вероятен процесс появления стоксовой компоненты, ввиду чего именно интенсивность компоненты с частотой  $\nu_{\phi} - \Delta\nu$  сравнима с интенсивностью накачки. Экспоненциальный рост зависимости происходит до достижения одинаковой заселённости нулевого и первого колебательных уровней молекул –

состояния насыщения. Вследствие того, что увеличивается заселённость первого колебательного уровня, растёт и вероятность появления антистоксовой компоненты; при этом, обе компоненты служат дополнительным источником накачки для излучения с частотой  $\nu_{\phi} \pm 2\Delta\nu$ , которое также рассеивается и обуславливает появление дополнительных гармоник в спектре рассеянного излучения с частотами  $\nu_{\phi} \pm n\Delta\nu$  (рисунок 11), где  $n$  – номер гармоники. На рисунке 11 представлено возникновение второй гармоники при вынужденном комбинационном рассеянии – для стоксовой и антистоксовой компонент.

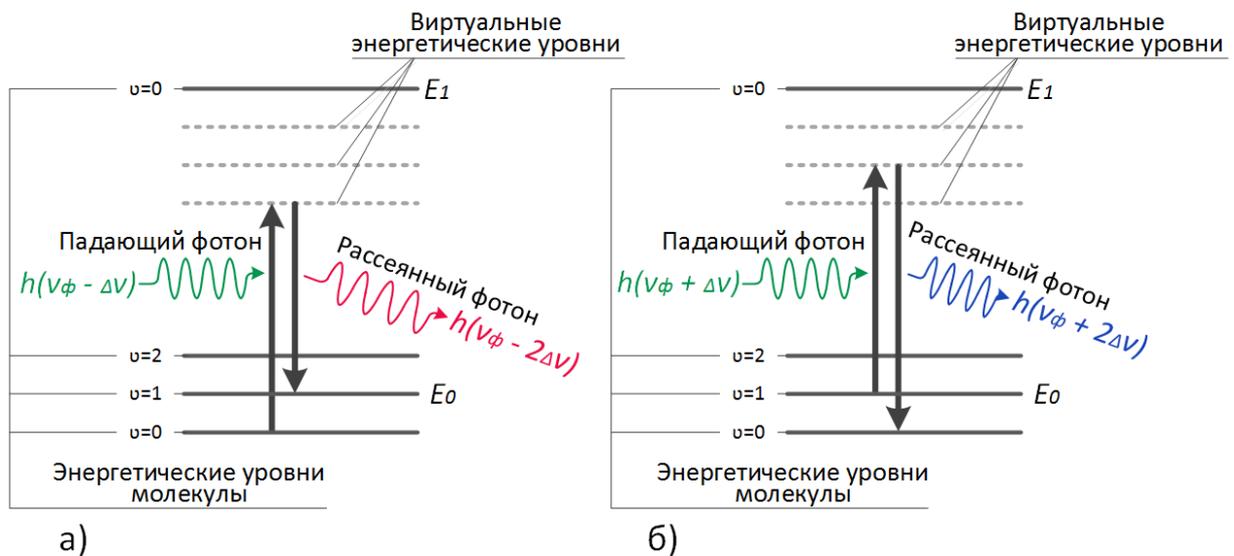


Рис. 11. Квантовая трактовка появления 2-ой гармоники для: а) стоксовой и б) антистоксовой компонент

Ещё одно отличие вынужденного комбинационного рассеяния от спонтанного – получение рассеянного излучения с высокой степенью когерентности, так как фотон вынужденного излучения эквивалентен фотону вынуждающего излучения.

### 1.2.2. Спонтанное и вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна

Нами было описано неупругое рассеяние электромагнитной волны на молекулах, далее рассмотрим рассеяние не на отдельных частицах, а на единой системе связанных молекул. Среды, в которых все молекулы находятся в связи между собой и при этом нельзя рассмотреть движение только одной частицы, а необходимо учитывать изменение всей системы, носят название конденсированных сред.

В 1922 Л.Н. Бриллюэн<sup>10</sup> впервые теоретически продемонстрировал рассеивание оптического излучения на флуктуациях плотности конденсированных сред (англ. Brillouin scattering). Независимо от него, Л.И. Мандельштамом ещё в 1918 году велись работы по изучению влияния сгущений и разрежений плотностей среды на изменение оптического излучения, но публикация статьи с результатами исследований была осуществлена лишь в 1926 году. Позже, начиная с 1930 года, работы по изучению рассеяния света на упругих волнах продолжил Е.Ф. Гросс<sup>11</sup>, экспериментально продемонстрировавший данное явление.

Как и в предыдущих случаях, описание рассеяния начнём с рассмотрения классической теории. При температурах, отличных от абсолютного нуля, связанные между собой молекулы находятся в постоянном тепловом движении. Как было указано ранее, движение частиц конденсированной среды нельзя исследовать в отдельности, необходимо учитывать полное состояние всей системы. Таким образом, в результате колебаний молекул происходит распространение упругих (акустических) волн по всем направлениям; при этом каждая из этих волн имеет свои значения амплитуды, частоты и фазы. Такую акустическую волну можно представить в виде периодической решётки, на которой и происходит дифракция падающей световой волны [20-21]. На рисунке 12 представлена дифракция падающего излучения на таких флуктуациях конденсированной среды, в результате чего у рассеянного света изменяется направление и частота.

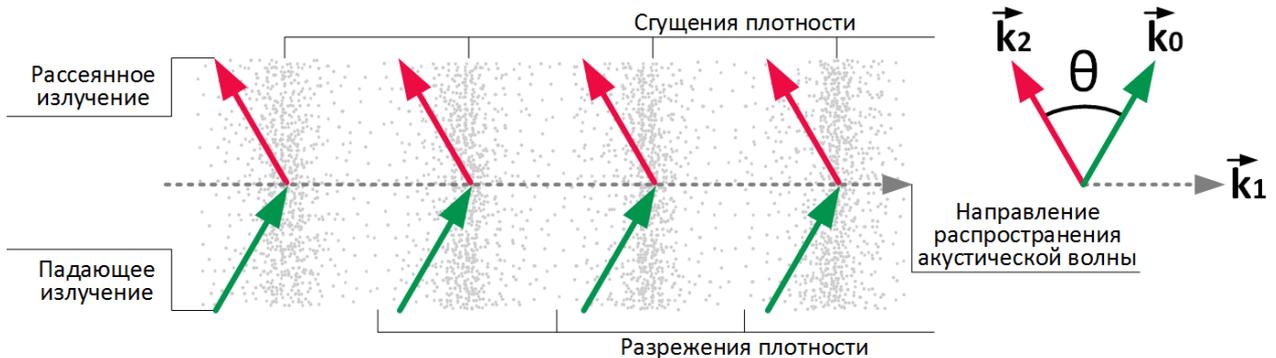


Рис. 12. Классическая картина рассеяния Мандельштама-Бриллюэна

Таким образом, падающий свет с частотой  $\nu_\phi$  модулируется акустической волной, при этом относительное изменение частоты рассеянного света  $\Delta\nu$  зависит от угла рассеяния  $\theta$  [20,22]:

<sup>10</sup> Леон Никола Бриллюэн (18 августа 1889 г. – 4 октября 1969 г.) – французский и американский физик, член Американского физического общества, основатель современной физики твёрдого тела.

<sup>11</sup> Евгений Федорович Гросс (8 (20) октября 1897 – 4 апреля 1972 г.) – советский физик-экспериментатор, член-корреспондент Академии наук СССР.

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \pm 2n \frac{V}{c} \sin \frac{\theta}{2} \quad (1.6)$$

где  $n$  – показатель преломления среды,  $V$  – скорость распространения акустической волны (в направлении распространения волнового вектора  $k_I$ ),  $c$  – скорость света,  $\nu$  – частота света.

Если рассматривать рассеяние Мандельштама-Бриллюэна с точки зрения квантовой теории, то описывается взаимодействие фотона не с отдельной частицей, а с так называемым фононом – квазичастицей, описывающей колебательное движение всей системы в виде отдельного кванта с частотой  $\Omega$ . Таким образом, при воздействии кванта света с частотой  $\nu_\phi$  на акустическую волну падающий фотон расщепляется в результате такого взаимодействия на рассеянный фотон с частотой  $\nu_\phi - \Omega$  и возникающий фонон с частотой  $\Omega$  (для стоксовой компоненты). Процесс появления антистоксовой компоненты сопровождается поглощением фонона с частотой  $\Omega$  и возникновением рассеянного фотона с частотой  $\nu_\phi + \Omega$  (рисунок 13).



Рис. 13. Квантовая трактовка рассеяния Мандельштама-Бриллюэна для а) стоксовой и б) антистоксовой компонент

В случае если угол между волновыми векторами  $k_0$  и  $k_I$  острый, то рассеянное излучение имеет частоту  $\nu_\phi - \Omega$  (стоксова компонента), если угол тупой, частота рассеянного света равна  $\nu_\phi + \Omega$  (антистоксова компонента).

На рисунке 14 представлены линия рэлеевского рассеяния, а также стоксова и антистоксова компоненты комбинационного рассеяния света и рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, при этом в случае последнего частоты обеих компонент зависят от температуры и деформации, что поясняется зависимостью скорости акустической волны от температуры и плотности среды распространения. Как и в случае с комбинационным рассеянием, интенсивность стоксовой компоненты Мандельштама-Бриллюэна выше, чем интенсивность антистоксовой компоненты.

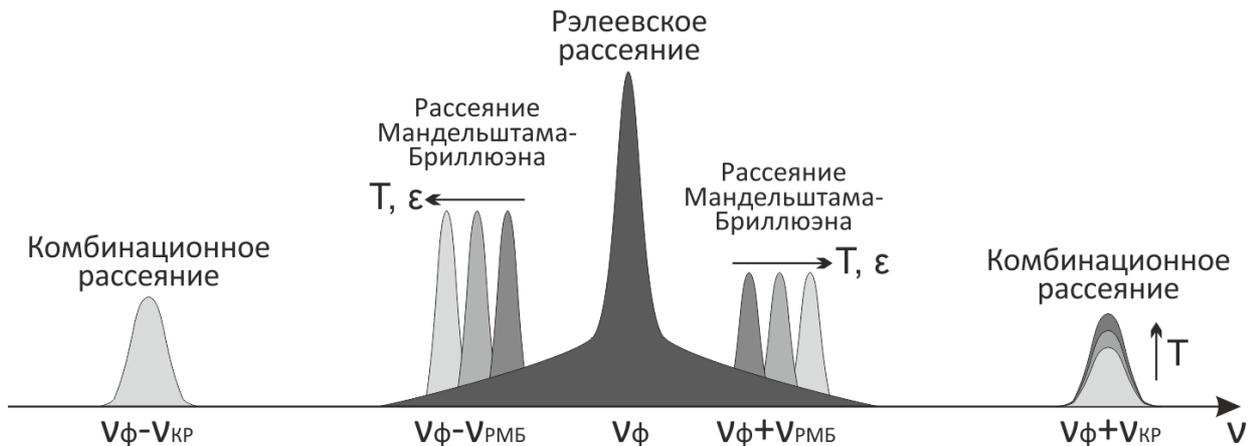


Рис. 14. Компоненты упругого и неупругого рассеяний с учётом влияния температуры и деформации

Как и в случае с комбинационным рассеянием, рассеяние Манделъштама-Бриллюэна может быть спонтанным (англ. spontaneous Brillouin scattering) (описано ранее) и вынужденным (англ. stimulated Brillouin scattering). Данное явление было открыто в 1964 году и заключается в том, что при достижении определённой пороговой интенсивности (мощности) первичного излучения происходит генерация акустической волны, близкой по мощности к возбуждающему излучению. Рассеянная волна имеет меньшую частоту по сравнению с первичной (стоксова компонента) и распространяется в обратном направлении.

Вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна объясняется эффектом электрострикции: при воздействии электрического поля на диэлектрик происходит изменение объёма вещества, что приводит к флуктуациям плотности среды, в результате чего возникают упругие акустические волны.

Различие между спонтанным и вынужденным рассеяниями Манделъштама-Бриллюэна в оптических волокнах можно пояснить с помощью рисунка 15. При введении излучения в волокно (синие линии) спонтанное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна возникает на случайных флуктуациях плотности материала световода (акустических волнах или фононах), индуцированных флуктуациями температуры (рисунок 15(a)). Данные флуктуации имеют статистическое распределение. Мощность стоксовой компоненты спонтанного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна мала (красные линии), но растёт с увеличением мощности волны накачки; при этом в какой-то момент рассеяние назад начинает преобладать над другими направлениями, что обусловлено структурой волновода, поддерживающего именно такое распространение (рисунок 15(б)). Вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна возникает, когда две волны с различием по частоте, эквивалентным частоте акустической

волны (фонона), распространяются навстречу друг другу (рисунок 15(а)), при этом мощность волны спонтанного рассеяния превышает так называемый бриллюэновский порог (рисунок 15(з)). В последнем случае происходит нелинейный рост (усиление) стоксовой компоненты рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

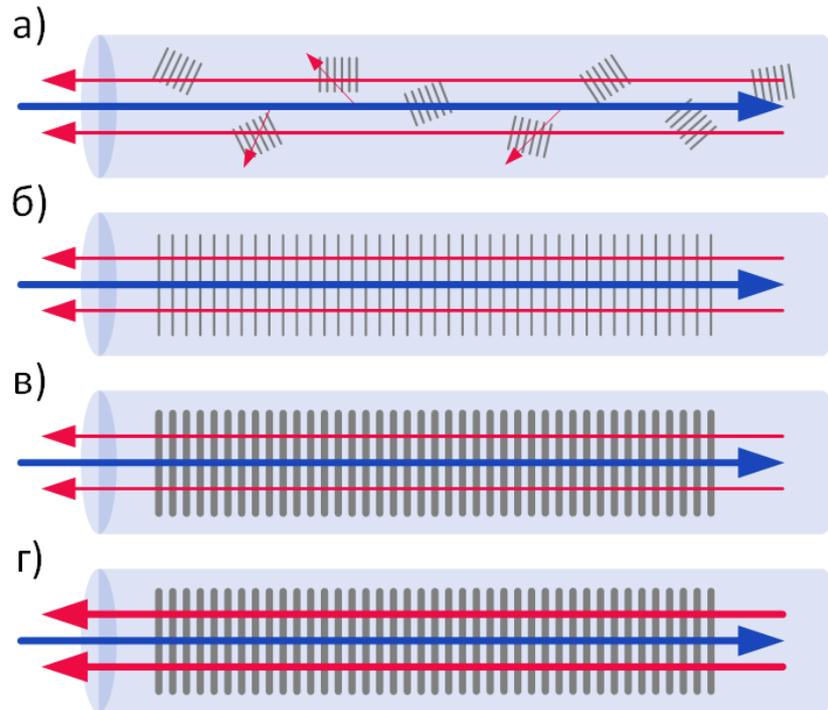


Рис. 15. Демонстрация спонтанного и вынужденного рассеяний Мандельштама-Бриллюэна: а) спонтанное рассеяние б) начало формирования «бегущей решётки» в) формирование стабильной акустической волны г) вынужденное рассеяние

## Вопросы для самоконтроля (Глава 1)

1. Понятие рассеяния. Упругое и неупругое рассеяния, их основные отличия.
2. Перечислите виды упругого рассеяния, их физические принципы и отличия.
3. Перечислите виды неупругого рассеяния, их физические принципы и отличия.
4. Классическая и квантовая трактовка рэлеевского рассеяния.
5. Поясните механизм спонтанного комбинационного рассеяния.
6. Опишите механизм вынужденного комбинационного рассеяния.
7. Поясните механизм спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.
8. Опишите механизм вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.
9. Понятие стоксовой и антистоксовой компонент комбинационного рассеяния; влияние изменения температуры на каждую из компонент.
10. Понятие стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния Мандельштама-Бриллюэна; влияние изменения температуры на каждую из компонент.

## Список использованной литературы (Глава 1)

1. **Максвелл, Дж. К.** Динамическая теория электромагнитного поля в кн. Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля // М.: ГИТТЛ, 1952. — 687 с.
2. **Трефил, Д.** 200 законов мироздания: [пер. с англ.] // М.: Гелеос [и др.], 2007. — 525 с.: ил.; — Доп. тит. л. англ. — Изд. совместно с: Династия: Читатель. — Перевод изд.: Cassel's laws of nature/ James Trefil. Cassel Reference, 2002.
3. **Болдырев, А.И.** Демонстрационные опыты по физической и коллоидной химии. Учеб. пособие для вузов // М.: Высшая школа, 1976. — 255 с.
4. **Прохоров, А.М.** Физическая энциклопедия. В 5 томах. Том 5. Стробоскопические приборы — Яркость / Гл. ред. А. М. Прохоров, редкол. Д. М. Алексеев [и др.] // М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. — 760 с.
5. **Sturm, R.A.** Genetics of human iris colour and patterns / R.A. Sturm, M. Larsson // Pigment Cell Melanoma Res. — 2009. V. 22. — № 5. P. 544-562.
6. **Крылышко, Д.** Научные журналы. Наука и жизнь. Рассеяние света // [Электронный ресурс]: электронная библиотека. — 2003.
7. **Эмануэль, Н. М.** Экспериментальные методы химической кинетики: Учеб. пособие / Под ред. Н. М. Эмануэля и М. Г. Кузьмина // М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. — 384 с.
8. **Шелудко, А.** Коллоидная химия: Пер. с болг. — 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Мир, 1984. — 320 с.
9. **MIT OpenCourseWare.** Solar Radiation. Wavelengths of solar radiation. / MIT Course Instructor: Marilynne Andersen // [Электронный ресурс]: материалы курса Массачусетского технологического института, 4.492 Daylighting, Fall 2004 URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/41881>
10. **Грегори, Р. Л.** Глаз и мозг: психология зрительного восприятия / Р. Л. Грегори; пер. с англ. Е. Д. Хомская, ред. А. Р. Лурия и В. П. Зинченко // М.: Прогресс, 1970. - 272 с.
11. **Зверева, С. В.** В мире солнечного света / С. В. Зверева; рец. К. С. Шифрин // Л.: Гидрометеиздат, 1988. - 160 с.
12. **Матвеев, А. Н.** Оптика: Учеб. пособие для физ. спец. Вузов // М.: Высшая школа, 1985. — 351 с.
13. **Печёнкин, А. А.** Леонид Исаакович Мандельштам: исследование, преподавание и остальная жизнь // М.: Логос, 2011. — 336 с.
14. **НИЯУ МИФИ.** Физика. Атомная физика / Образовательный портал НИЯУ МИФИ.// [Электронный ресурс]: электронные образовательные курсы. Москва. URL: <http://online.mephi.ru/>

15. **Леонов, А. В.** Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи / А. В. Леонов, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков // Прикладная оптика. – 2014. – С. 26-49.
16. **Драбович, К.Н.** Комбинационное рассеяние света // [Электронный ресурс]: Большая российская энциклопедия. Электронные данные. URL: <https://bigenc.ru/>
17. **Андреев, А.И.** Модульная многофункциональная оптоволоконная спектрометрическая система [Электронный ресурс] / А.И. Андреев, С.В. Мухин, В.В. Некрасов, В.А. Никитенко, А.В. Пауткина. // Москва. 2008. URL: <http://www.avantes.ru/articles/up1/index.php>
18. **Бломберген, Н.** Вынужденное комбинационное рассеяние света, пер. с англ. // Успехи физических наук, 1969. – Т. 97. – Вып. 2. – С. 307-352
19. **Агравал, Г.** Нелинейная волоконная оптика: пер. с англ. // М.: Мир, 1996. – 323 с.
20. **Фабелинский, И.Л.** Молекулярное рассеяние света // М.: Наука, 1965. – 512 с.
21. **Драбович, К.Н.** Мандельштама-Бриллюэна рассеяние // [Электронный ресурс]: Большая российская энциклопедия. Электронные данные. URL: <https://bigenc.ru/>
22. **Старунов, В.С.** Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна и вынужденное энтропийное (температурное) рассеяние света / Старунов, В.С., Фабелинский, И.Л. // Успехи физических наук, 1969. – Т. 98. – Вып. 3. – С. 441-491.

## Глава 2. Виды и общие принципы работы устройств, основанных на явлении рассеяния

### 2.1. Оптическая рефлектометрия

Оптическая рефлектометрия (англ. Optical reflectometry) является надёжным методом исследования параметров волокна, его дефектов, ответвлений, стыков, повреждений и прочих неоднородностей, а также однозначного определения их локализации. Работа такого устройства основывается на регистрации рассеянного и отраженного сигналов. Построение рефлектограммы сводится к анализу двух сигналов: обратного рассеяния (рэлеевского) от неоднородностей, равномерно распределённых по всей длине волокна, обратного отражения от различных изменений геометрии волокна. На рисунке 16 представлена обобщённая схема оптического рефлектометра.

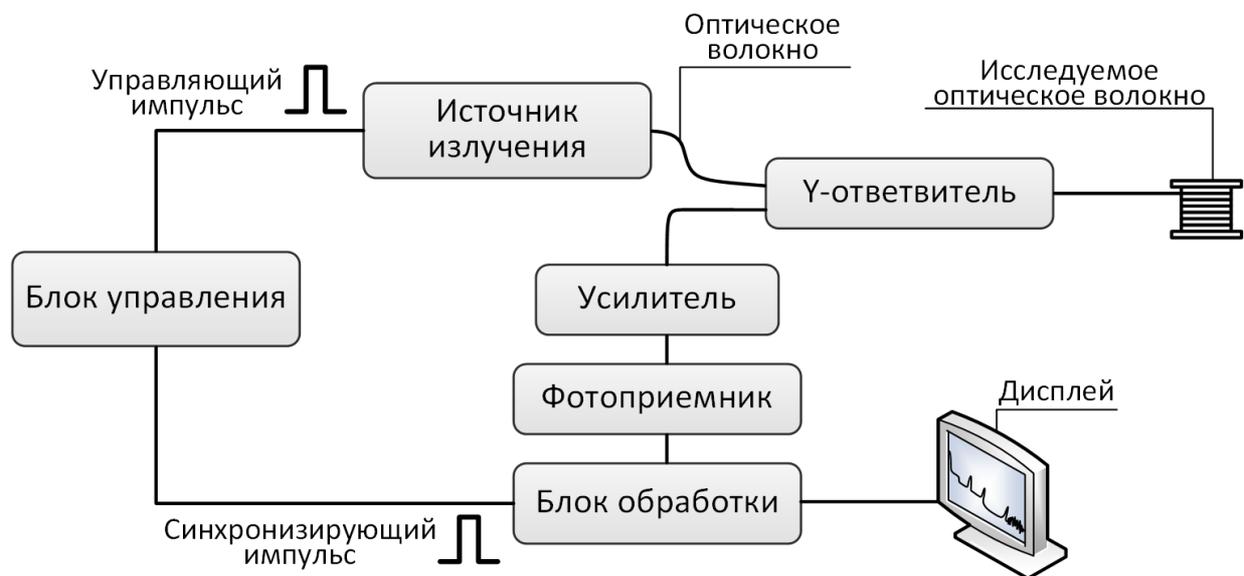


Рис. 16. Обобщённая схема оптического рефлектометра

Принцип действия такого устройства сводится к следующему алгоритму. Оптический импульс от источника излучения через Y-ответвитель направляется в исследуемое волокно и распространяется, испытывая затухание. Коэффициент затухания зависит как от самого волокна, так и от длины волны оптического излучения. Обратное отражённое и рассеянное излучения через ответвитель (или циркулятор) поступают в усилитель, а далее на фотоприёмник, в котором осуществляется преобразование оптического сигнала в электрический. Затем преобразованный сигнал направляется в блок обработки данных, и происходит построение рефлектограммы на дисплее, которую необходимо правильным образом интерпретировать.

Рефлектограмма представляет собой графическое изображение обратного сигнала в виде убывающей кривой с различными отклонениями (пиками и спадами) вследствие изменений параметров волокна. Для корректного анализа её результатов необходимо классифицировать дефекты и их представление на дисплее. На рисунке 17 продемонстрирован пример рефлектограммы оптического волокна с возможными неоднородностями и их расшифровкой.

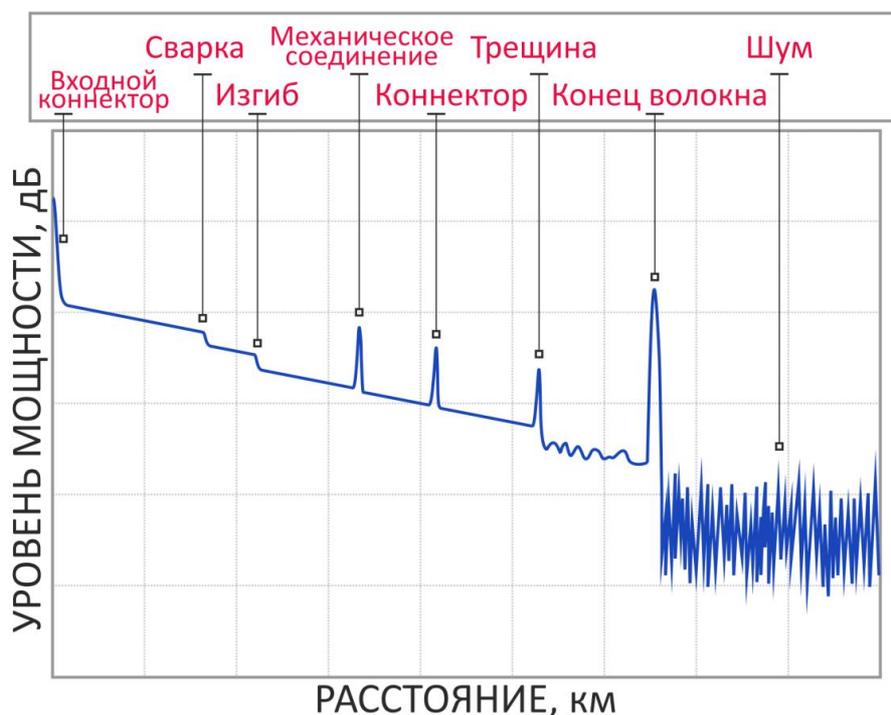


Рис. 17. Схематичное изображение рефлектограммы, детектирующей различные неоднородности

По вертикальной шкале откладывается мощность приходящего на фотоприёмник излучения в дБ ( $10 \cdot \lg \frac{P_{\text{ввх}}}{P_{\text{вх}}}$ ), по горизонтальной – расстояние от выходного коннектора Y-ответвителя до исследуемого участка волокна. Наклон кривой связан с затуханием сигнала в оптическом волокне и определяется коэффициентом затухания, измеряемым в дБ/км. Пики на рисунке 17 вызваны отражением внутри световода, а их величина характеризует качество соединения с коннекторами и механическими соединениями; провалы (спады) на графике связаны с потерями в волокне, после которых уменьшается мощность обратно рассеянного сигнала – сварка и изгиб волокна [1]. Таким образом, оптическая рефлектометрия позволяет судить о затухании в волокне, состоянии волоконно-оптической линии связи, качестве сварочных работ, количестве подключенных через коннекторы устройств, определять перекручивание/передавливание оптического кабеля, а также локализацию разрывов линии и пр.

## 2.2. Применение комбинационного рассеяния

### 2.2.1. Рамановская спектроскопия

Одним из способов изучения химического состава вещества является спектроскопия, заключающаяся в бесконтактном воздействии электромагнитной волной на исследуемый материал. В общем виде спектроскопию можно пояснить на примере атома следующим образом: электрон принимает только дискретные значения энергий (то есть может находиться на определённых энергетических уровнях атома). При переходе между такими уровнями (стационарными состояниями) происходит поглощение или испускание кванта с энергией  $h\Delta\nu$ . Воздействие электромагнитного излучения на такой атом приводит к наблюдению в спектре линий с частотами  $\nu_{\phi} \pm \Delta\nu$ . В результате каждый химический элемент характеризуется определённым набором частот (проявляющихся в виде линий спектра), присущих только ему.

По характеру взаимодействия излучения на исследуемый материал применяют следующие виды спектроскопии:

1. абсорбционная – исследуются спектры поглощения электромагнитного излучения;
2. эмиссионная – исследуются спектры испускания электромагнитного излучения;
3. иные виды спектроскопии, основанные на явлениях отражения, люминесценции и рассеяния.

Также существует классификация спектроскопии по структуре материала:

1. Атомная;
2. Молекулярная;
3. Вещество в конденсированном состоянии;
4. Атомное ядро.

При изучении спектров молекул простых веществ (состоящих только из атомов одного элемента) существует несколько дополнительных линий, соответствующих только этому элементу; в свою очередь, со сложными молекулами проведение анализа структуры вещества становится значительно труднее.

Как было указано в разделе 1.2, в атомах существуют электронные переходы, в свою очередь, в молекулах существуют электронные, колебательные и вращательные переходы, линии от которых способны накладываться друг на друга, в результате чего спектры таких веществ имеют достаточно сложное строение.

В данном разделе будет рассмотрена рамановская спектроскопия (англ. Raman spectroscopy), в основе которой лежит явление комбинационного рассеяния света, происходящее на молекулах вещества.

На рисунке 18 представлена обобщенная схема спектрометра комбинационного рассеяния, включающая основные блоки ввода и вывода излучения.

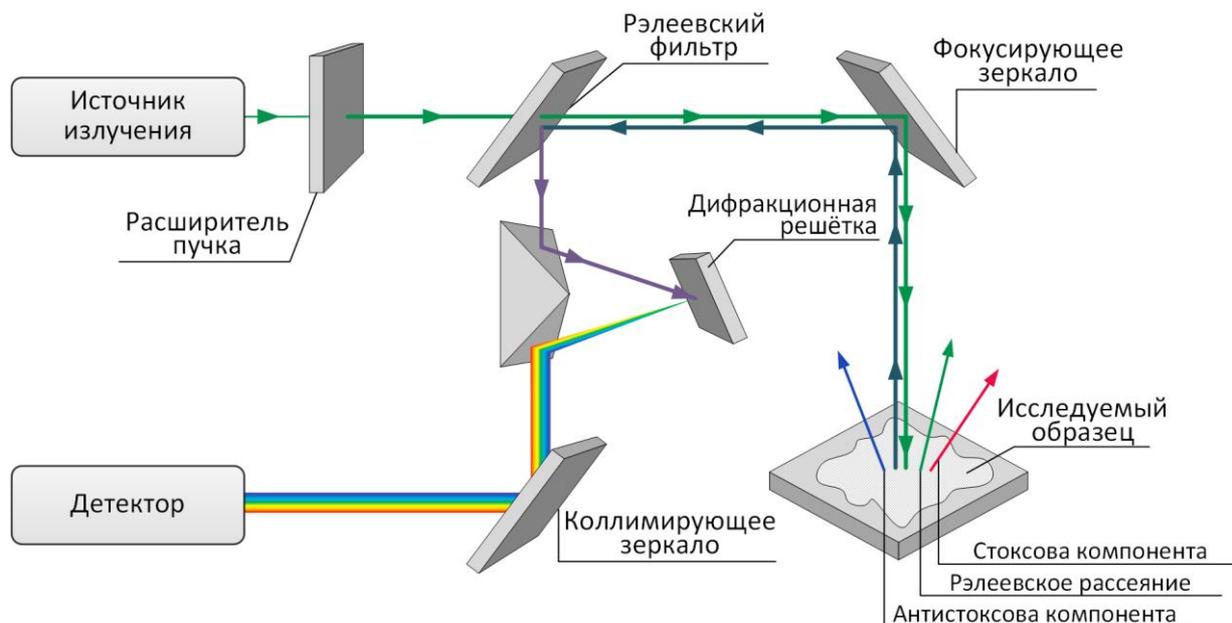


Рис. 18. Обобщенная схема спектрометра комбинационного рассеяния

На рисунке 14 видно, что интенсивность компонент комбинационного рассеяния значительно меньше, чем рэлеевского. Ввиду этого в качестве источников излучения используются интенсивные и высокостабильные по частоте лазеры с монохроматическим излучением следующих видов: аргоновый (488 нм и 514.5 нм), криптоновый – (530.9 нм и 647.1 нм), гелий-неоновый (632.8 нм), иттрий-алюминиевый гранат, легированный неодимом (1064 нм). С учетом того, что интенсивность рассеянного излучения обратно пропорциональна четвертой степени длины волны, рассеянный сигнал от аргонового лазера в разы выше, чем от иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом [2-3].

Излучение через систему зеркал доставляется в исследуемое вещество, в котором рассеивается на молекулярных колебаниях. После воздействия электромагнитного излучения на химический элемент рассеянная часть с помощью фокусирующего зеркала направляется на фильтр, удаляющий рэлеевскую линию. Данный фильтр, как следует из названия, пропускает лишь сигнал комбинационного рассеяния с целью предотвращения рэлеевского воздействия.

После прохождения рэлеевского фильтра (англ. Rayleigh filter) излучение направляется на дифракционную решётку для разложения рассеянного сигнала в спектр. Конечный спектр через коллимирующее зеркало попадает на детектор, представляющий из себя ПЗС-линейку (ПЗС – прибор с зарядовой связью) на

основе кремния, использование которого обуславливается его высокой фоточувствительностью.

Таким образом, принцип работы рамановского спектрометра сводится к облучению исследуемого вещества монохроматичным излучением, рассеивающимся при контакте с образцом. Из суммарного излучения выделяются линии комбинационного рассеяния и направляются через фокусирующее зеркало и рэлеевский фильтр на дифракционную решётку, раскладывающую сигнал в спектр. Вид спектральной характеристики для каждого вещества различен и изменяется даже при малейших вариациях химического состава.

Рамановская спектроскопия применяется в следующих областях:

- фармацевтика – анализ химического состава лекарств, проверка их качества и подлинности [4];
- судебная экспертиза – анализ следов биологической жидкости [5];
- геология и минералогия – анализ происхождения материалов и различных включений в него [6];
- биология – изучение внутриклеточных структур [7];
- пищевая промышленность – анализ качества продуктов и питательных веществ [8];
- мониторинг окружающей среды, археология и искусство, химическая, биологическая, пищевая и полупроводниковая промышленности и т. д.

### 2.2.2. Усилитель на вынужденном комбинационном рассеянии

На сегодняшний день с целью усиления сигнала в волоконно-оптических линиях связи используются эрбиевые усилители. Принцип действия таких устройств основан на переходах электронов эрбия с основного энергетического уровня в возбуждённое состояние до достижения инверсии населённости за счёт оптической накачки, после чего генерируется выходное излучение той же длины волны и с той же фазой, но с большей интенсивностью [9]. Данные устройства имеют свои ограничения, связанные с использованием специальных оптических волокон, легированных эрбием, и возможностями работы лишь в определённых диапазонах длин волн – перечисленные недостатки можно решить использованием других типов усилителей.

Рамановские усилители (рисунок 19), функционирующие на явлении вынужденного комбинационного рассеяния, позволяют использовать в качестве активной среды сами оптические волокна. В стандартных кварцевых телекоммуникационных волокнах в качестве частиц, на которых рассеивается свет, выступают ионы  $\text{Si}^{2+}$  и  $\text{O}^{2-}$ . Взаимодействие излучения накачки с частотой  $\nu_{\text{ф}}$  с тепловыми колебаниями ионов кварца приводит к появлению компонент с частотами  $\nu_{\text{ф}} - \Delta\nu$  (стоксова компонента) и  $\nu_{\text{ф}} + \Delta\nu$  (антистоксова компонента). В кварцевых волокнах сдвиг стоксовой и антистоксовой компонент составляет

примерно  $\pm 13$  ТГц от частоты накачки  $\nu_{\Phi}$ ; для длины волны 1480 нм эти сдвиги равны -90 и +85 нм соответственно [10]. При этом, если интенсивность излучения накачки превышает пороговую интенсивность, то возникает вынужденное комбинационное рассеяние, при котором взаимодействие волны накачки и информационного сигнала возбуждает колебательные моды кварца. В свою очередь, разница частот информационного сигнала и излучения накачки совпадает с частотой колебаний ионов  $\text{Si}^{2+}$  и  $\text{O}^{2-}$ , в результате чего происходит усиление информационного сигнала.

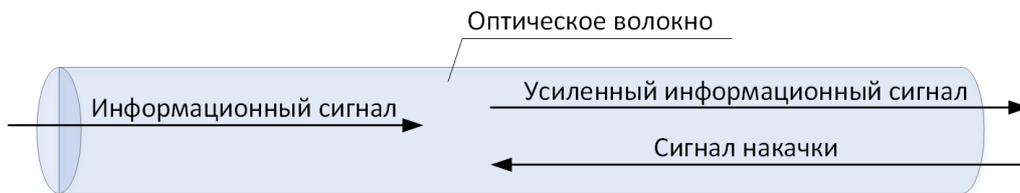


Рис. 19. Усиление сигнала в оптическом волокне

На рисунке 19 приведён пример встречно-направленной накачки, то есть, информационный сигнал и сигнал накачки направлены навстречу друг другу. В отличие от вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, при котором рассеянное излучение всегда распространяется только навстречу падающей волне, вынужденное комбинационное рассеяние может распространяться как в направлении первичного излучения, так и в обратном. В результате этого существуют варианты исполнения усилителей, при которых информационный сигнал и сигнал накачки сонаправлены. Также возможна реализация усилителя, использующего одновременно принцип встречной и сонаправленной накачки.

### 2.2.3. Рамановский лазер

Ещё одной областью, в которой успешно применяется вынужденное комбинационное рассеяние, являются лазерные технологии. Как и в случае с усилителями, преимущество устройств на эффекте рассеяния заключается в возможности выбора рабочей длины волны излучения.

На рисунке 20 представлена обобщённая схема полностью волоконного лазера, принцип действия которого основан на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния.



Рис. 20. Обобщенная схема волоконного лазера на вынужденном комбинационном рассеянии

Стандартная конфигурация волоконного лазера подразумевает использование источника накачки, активной среды – волокна, легированного редкоземельными металлами, и системы зеркал, образующих резонаторную полость. При создании лазеров, основанных на эффекте рассеяния, используется тот же принцип работы, но генерация когерентного излучения происходит в результате вынужденного рассеяния. В качестве источника накачки в большинстве случаев используются иттербиевый и неодимовый лазеры.

Одной из возможных реализаций волоконного резонатора является использование волоконных брэгговских решёток (ВБР) [11]. Такие структуры формируются созданием интерференционной картины в области оптического волокна, в результате чего в сердцевине индуцируется периодическая модуляция показателя преломления по направлению распространения волны. Формирование ВБР в сердцевине оптического волокна позволяет получить узкую область отражения на длине волны Брэгга ( $\lambda_{Br}$ ), которая определяется по формуле 2.1:

$$\lambda_{Br} = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.1)$$

где  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления среды для основной моды сердцевины световода на длине волны брэгговского резонанса,  $\Lambda$  – период ВБР. Появление резонансного пика на длине волны Брэгга связано с многократным отражением излучения от каждой грани решётки. Выполнение условия 2.1 означает, что все отраженные излучения находятся в фазе и интерferируют между собой; при этом суммарное отражение – результат интерференции – распространяется в обратном направлении.

В волоконных лазерах на вынужденном комбинационном рассеянии длины волн записываемых ВБР определяются исходя из параметров активной среды и настраиваются на длину волны стоксовой компоненты. ВБР формируются с учётом следующих факторов: они должны быть полностью прозрачны для излучения накачки, для стоксовой компоненты коэффициент отражения полностью отражающего зеркала близок к 100%, частично отражающего – определяется с учётом величины усиления и оптических потерь в волокне [12-15].

В свою очередь, устройство лазера может подразумевать использование нескольких пар решёток Брэгга (не только одной пары, как представлено на рисунке 20), количество которых подбирается исходя из необходимой длины волны лазерного излучения. В качестве активных волокон, в которых происходит вынужденное комбинационное рассеяние, используются волокна с сердцевинами, легированными германием или фосфором.

#### **2.2.4. Волоконно-оптический датчик на комбинационном рассеянии**

Ранее в общем виде были изложены принципы работы лазеров и усилителей, функционирующих на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния. Существует область, в которой применяется не вынужденное, а

спонтанное комбинационное рассеяние – это волоконно-оптические системы измерения. Одним из таких измерительных устройств является распределённый датчик температуры, регистрирующий (в зависимости от конструкции) прямое и/или обратное рассеяние.

Как было указано в Главе 1, антистоксова компонента чувствительна к температуре, что поясняется увеличением населённости возбуждённых уровней молекулы (с повышением температуры) и ростом вероятности рассеяния с этих уровней с последующей генерацией фотона большей частоты. На рисунке 21 представлена обобщённая схема волоконно-оптического датчика температуры, работающего на регистрации обратного комбинационного рассеяния.

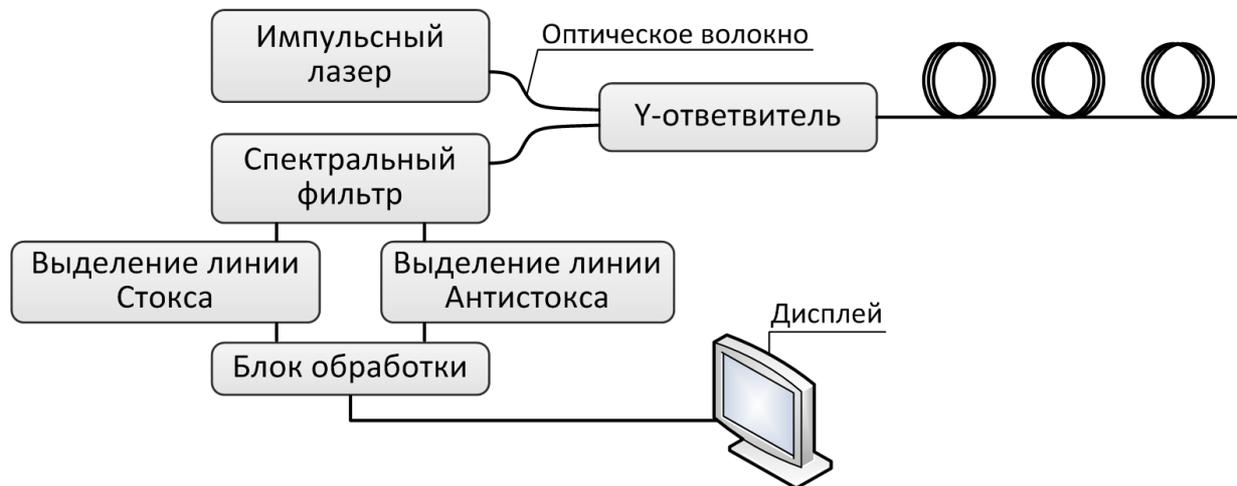


Рис. 21. Обобщённая схема волоконно-оптического датчика температуры

Как известно, по сравнению с интенсивностью линий рэлеевского рассеяния, компоненты рамановского рассеяния меньше на несколько порядков, при этом интенсивность антистоксовой компоненты уменьшается с уменьшением температуры, таким образом, возникает необходимость установки лазера накачки, генерирующего импульсы относительно высокой мощности. Ввиду того, что изменение температуры практически не влияет на стоксову компоненту, расчет температуры сводится к вычислению отношения интенсивностей стоксовой ( $I_{ст}$ ) и антистоксовой ( $I_{аст}$ ) компонент по формуле 2.2 [16]:

$$\frac{I_{ст}}{I_{аст}} = \left[ \frac{\nu_{\phi} - \Delta\nu}{\nu_{\phi} + \Delta\nu} \right]^4 \exp\left(\frac{hc\Delta\nu}{kT}\right) \quad (2.2)$$

где  $\nu_{\phi}$  – частота излучения лазера накачки,  $\nu_{\phi} \pm \Delta\nu$  – частота сдвига комбинационного рассеяния,  $h$  – постоянная Планка ( $6,626 \times 10^{-34}$  Дж·с),  $c$  – скорость света,  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,380 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),  $T$  – абсолютная температура.

После подачи импульса лазером накачки излучение распространяется по волокну и претерпевает рассеяние в каждой точке световода, в результате чего

сигнал обратного рассеяния направляется на спектрометр. По времени прихода обратного сигнала можно определить, в какой точке волокна зафиксирована температура. В спектральном фильтре рассеянное излучение разделяется на стоксову и антистоксову компоненты, которые поступают в блок обработки сигнала. Правильная интерпретация сигнала позволяет вычислить, где и на сколько произошло изменение температуры.

Основной недостаток данных устройств – относительно высокая стоимость ввиду использования высокочувствительных приборов, необходимых для обработки сигнала. Но в условиях агрессивных сред и возможных воздействий электромагнитных помех данный вид распределённых датчиков необходим для качественного температурного анализа.

### **2.3. Волоконно-оптический датчик на рассеянии Мандельштама-Бриллюэна**

Эффект рассеяния Мандельштама-Бриллюэна находит широкое применение при создании волоконно-оптических распределённых систем измерения деформации и/или температуры. Волоконные датчики на основе этого эффекта могут быть построены с использованием как вынужденного [17], так и спонтанного [18] рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Оба режима показывают линейную зависимость как частотного сдвига, так и мощности стоксовых и антистоксовых компонент рассеяния Мандельштама-Бриллюэна от деформации и/или температуры [19].

Оптическая рефлектометрия на основе спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна более привлекательна ввиду того, что, в отличие от встречно направленного подхода в случае использования вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, она позволяет производить опрос измерительной системы, используя только один конец оптоволоконной линии. Кроме этого, в случае спонтанного рассеяния имеется потенциальная возможность параллельного измерения и температуры, и деформации, при условии, что и частотный сдвиг, и мощности стоксовых и антистоксовых компонент рассеянного излучения определяются одновременно [18].

В оптической рефлектометрии сигнал спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна может быть измерен как прямым детектированием, так и с помощью когерентного приема. Последний вариант более предпочтителен, так как он позволяет достичь существенно большей чувствительности и динамического диапазона измерительной системы в сравнении с прямым детектированием [19].

Пример распределённого волоконно-оптического датчика температуры и деформации, в основе которого лежит принцип когерентного приема сигнала спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, представлен в статье [19].

На рисунке 22 представлена принципиальная схема распределенного волоконно-оптического датчика температуры и деформации, в основе которого лежит принцип когерентного приема сигнала спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

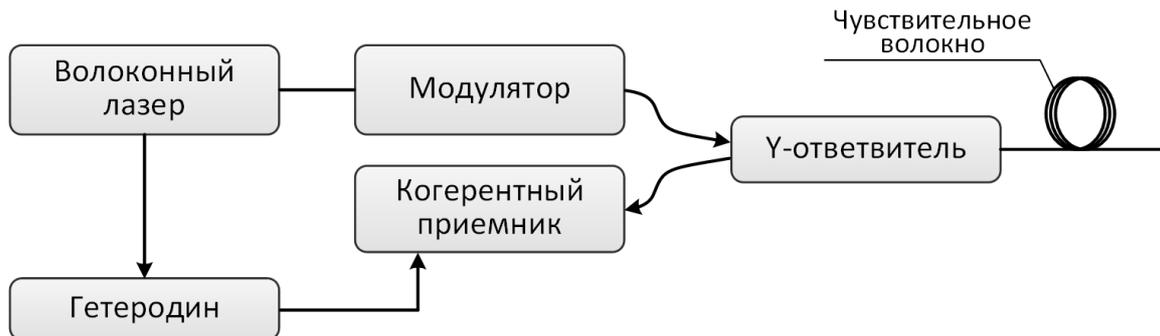


Рис. 22. Схема распределенного волоконно-оптического датчика температуры и деформации

Непрерывный одночастотный волоконный лазер используется в качестве источника излучения в измерительной системе. Часть излучения лазера поступает на модулятор, где модулируется по амплитуде для получения лазерных импульсов перед тем как направиться в измерительную волоконную линию. Другая часть излучения лазера отводится для использования в качестве накачки другого источника лазерного излучения, который используется как гетеродин для когерентного приема. Сигнал спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна от лазерных импульсов, запущенных в измерительную линию, который несет информацию о температуре и деформации вдоль оптического волокна, может быть детектирован посредством когерентного гетеродинного приема.

В случае прямого детектирования на приемном конце может находиться оптический спектроанализатор или интеррогатор, которые будут непосредственно фиксировать как частотный сдвиг, так и изменение мощности стоксовых и антистоксовых компонент рассеяния Мандельштама-Бриллюэна от деформации и/или температуры.

## Вопросы для самоконтроля (Глава 2)

1. Поясните принцип работы оптического рефлектометра.
2. Какой физический принцип лежит в основе рамановской спектроскопии?
3. Из каких критериев выбирается лазерный источник излучения рамановского спектрометра?
4. В каких областях применяется рамановская спектроскопия?
5. Перечислите основные варианты исполнения волоконного усилителя на вынужденном комбинационном рассеянии.
6. Опишите принцип работы волоконного рамановского лазера.
7. Поясните принцип работы распределенного волоконно-оптического датчика температуры на комбинационном рассеянии.
8. Какая компонента комбинационного рассеяния (стоксова или антистоксова) практически не чувствительна к изменению температуры?
9. Опишите принцип действия волоконно-оптических датчиков на рассеянии Мандельштама-Бриллюэна.
10. Поясните возможные способы детектирования сигнала спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

## Список использованной литературы (Глава 2)

1. **Воронин В. Г.** Оптический рефлектометр / В.Г. Воронин, О.Е. Наний, А.А. Кулик, А.Н. Туркин // М.: МГУ им М.В. Ломоносова, 2017. – 18 с.
2. **Кельнер, Р.** Аналитическая химия. Проблемы и подходы. Пер. с англ. / Под ред. Р. Кельнер, Ж.-М. Мерме, М. Отто, Г.М. Видмер // М.: Мир, Издательство АСТ, 2004. – Т. 1. – 608 с.
3. **Butler, H. J.** Using Raman spectroscopy to characterize biological materials / Butler, Holly J.; Ashton, Lorna; Bird, Benjamin; Cinque, Gianfelice; Curtis, Kelly; Dorney, Jennifer; Esmonde-White, Karen; Fullwood, Nigel James; Gardner, Benjamin; Martin-Hirsch, Pierre Leonard; Walsh, Michael J.; McAinsh, Martin Robert; Stone, Nicholas; Martin, Francis Luke // Nature Protocols. – 2016. V. 11. – N. 4. – P. 664-687.
4. **Buckley, K.** Applications of Raman Spectroscopy in Biopharmaceutical Manufacturing: A Short Review / Buckley, K., Ryder, A. G. // Applied Spectroscopy. – 2017. – V. 71. – N. 6. – P. 1085-1116.
5. **Sikirzhytski, V.** Multidimensional Raman Spectroscopic Signatures as a Tool for Forensic Identification of Body Fluid Traces: A Review / Sikirzhytski, V., Sikirzhytskaya, A., Lednev, I. K. // Applied Spectroscopy. – 2011. – V. 65. – N. 11. – P. 1223-1232.
6. **Kiefert, L.** Use of the Raman spectrometer in gemmological laboratories: review / Kiefert, L, Karampelas, S. // Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc. – 2011. – V. 80. – N. 1. – P. 119-124.
7. **Shipp, D. W.** Raman spectroscopy: techniques and applications in the life sciences / Shipp, D. W., Sinjab, F., Notingher, I. // Advances in Optics and Photonics. – 2017. – V. 9. – N. 2. – P. 315-428.
8. **Moustakas, C. A.** Method for Determining Nutritional Facts with Raman Spectroscopy / Moustakas, C, Pitris, C. // Clinical and Biomedical Spectroscopy. – 2009. – V. 7368.
9. **Убайдуллаев, Р. Р.** Волоконно-оптические сети // М.: Эко-Трендз, 2000. – 267 с.
10. **Леонов, А. В.** Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи / А. В. Леонов, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков // Прикладная оптика. – 2014. – С. 26-49.
11. **Варжель С. В.** Волоконные брэгговские решетки // СПб: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.
12. **Кульчин, Ю. Н.** Волоконные лазеры / Ю.Н. Кульчин, С.Б. Змеу, Е.П. Субботин, А.И. Никитин // Вестник ДВО РАН. – 2015. – № 3.

13. **Курков, А.С.** Непрерывные волоконные лазеры средней мощности / А.С.Курков, Е.М.Дианов // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – №10. – С. 881-900.
14. **Дианов, Е. М.** Волоконные лазеры // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174. – № 10. – С. 1139-1142.
15. **Курков, А.С.** Волоконные лазеры на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2008. – № 2. – С. 32-38.
16. **Ковалёв, А.С.** Распределенные волоконно-оптические датчики температуры на основе рамановского обратного рассеяния / А. С. Ковалёв, А. В. Попова Распределенные // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум».
17. **Бао, Х.** 22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber / X. Bao, D. J. Webb, and D. A. Jackson // Opt. Lett. – 1993. – V. 18. – P. 552-554.
18. **Huai, H. K.** All-fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering / Huai H. Kee, Gareth P. Lees, and Trevor P. Newson // Opt. Lett. – 2000. – V. 25. – P. 695-697.
19. **Geng, J.** Distributed fiber temperature and strain sensor using coherent radio-frequency detection of spontaneous Brillouin scattering / Jihong Geng, Sean Staines, Mike Blake, and Shibin Jiang // Appl. Opt. – 2007. – V. 46. – P. 5928-5932.

Новикова Виктория Александровна  
Варжель Сергей Владимирович

## **Рассеяние света и его применение в волоконной оптике**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49