

Письма в ЖЭТФ, том 19, вып. 6, стр. 350 – 355

20 марта 1974 г.

**ВЫНУЖДЕННОЕ РАССЕЯНИЕ МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА
ПРИ ШИРОКОМ СПЕКТРЕ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В.И.Поповичев, В.В.Рагульский, Ф.С.Файзуллов

Экспериментально установлено, что эффективность вынужденного рассеяния не зависит от ширины спектра возбуждающего излучения, если длина взаимодействия меньше длины когерентности этого излучения. Исследованы спектральные и угловые характеристики рассеянного света при широкополосной накачке.

В теоретической работе Дьякова [1] было показано, что вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ) и вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) при широкополосной накачке¹⁾ могут идти столь же эффективно как и при узкополосной. При использовании излучения с широким спектром наблюдалось эффективное ВКР вперед [2 – 4], однако для ВКР назад усиление было практически равно нулю [4]. Сообщалось также, что использование широкополосного излучения приводит к резкому уменьшению интенсивности ВРМБ [5, 6]. Таким образом, на основании всех опубликованных экспериментальных результатов складывалось мнение, что эффективное рассеяние назад при широкополосной накачке невозможно, хотя из теории [1] следует обратное.

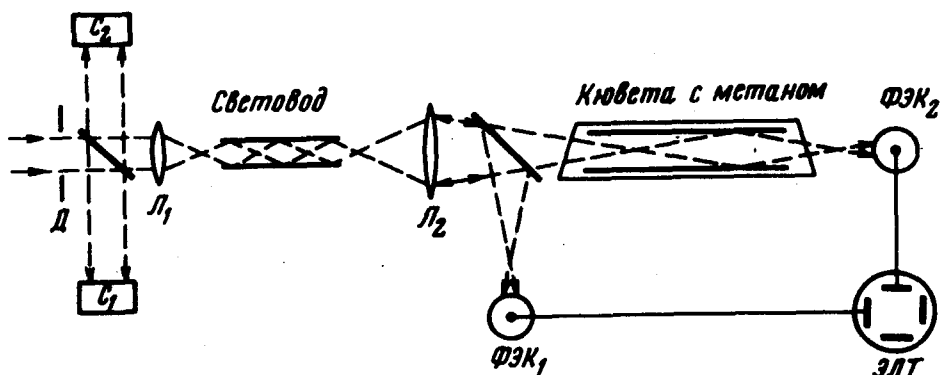


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: D – диафрагма 4×4 мм; L_1 – линза с $f = 14$ см; световод (длина 23 см, сечение 2×2 мм) образован пластинами из оргстекла; L_2 – линза с $f = 30$ см или 50 см при длине кюветы соответственно 24 см или 99 см; окна кювет скошены на угол 11° ; в короткую кювету помещен поперечный световод длиной 23 см и сечением 2×2 мм, в длинную – сечением 4×4 мм и длиной 97 см, потери в световодах $\sim 14\%$; $\Phi Э К_1$ и $\Phi Э К_2$ – фотозлементы ФЭК-0,9; ЭЛТ – электроннолучевая трубка осциллографа И2-7; постоянная времени регистрирующей аппаратуры ≈ 10 мсек; C_1 и C_2 – системы изменения параметров возбуждающего и рассеянного света

С целью проверки этой теории мы сравнили пороговые мощности ВРМБ при различных ширинах спектра возбуждающего света и разных длинах рассеивающей среды. Схема установки приведена на рис. 1. Излучение рубинового лазера попадает в кювету, заполненную газообразным метаном под давлением 150 атм²⁾. Световод, помещенный в кювету, обеспечивает равномерную засветку по всей ее длине. Равномерная засветка по сечению рассеивающей области достигается с помощью внешнего световода. На входе этого световода линза L_1 строит изображение диафрагмы, освещаемой лазерным пучком. Лучи, идущие на

¹⁾ Здесь излучение считается широкополосным, если ширина его спектра превышает ширину линии спонтанного рассеяния, $\delta \nu_0$.

²⁾ $\delta \nu_0 \approx 7 \cdot 10^{-4}$ см⁻¹; коэффициент усиления $g_0 \approx 0,094$ см/Мет [7].

разном расстоянии от оптической оси системы, попадают на стенки световода в различных местах и под разными углами. Поэтому выходной торец световода оказывается равномерно засвеченным независимо от распределения излучения на его входе. Линза L_2 передает изображение выходного торца на вход кюветы.

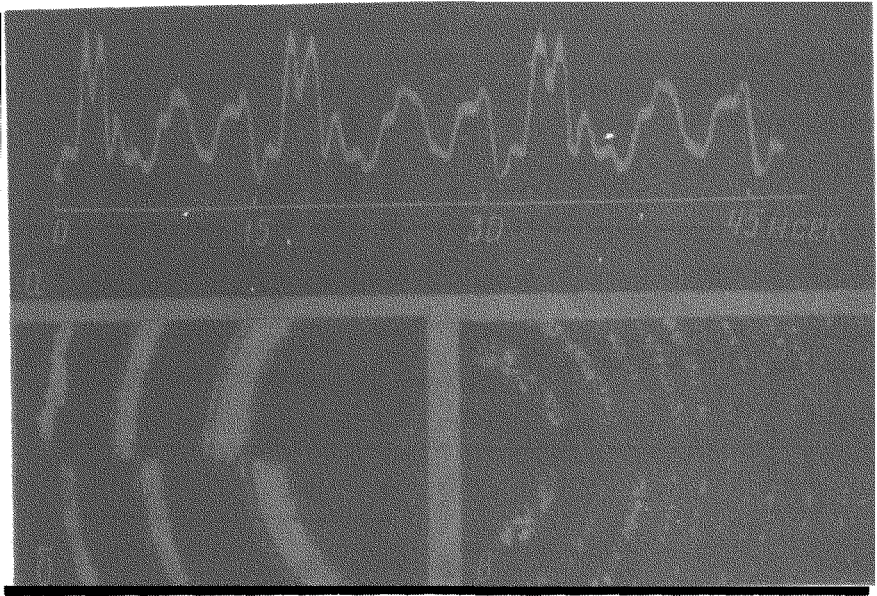


Рис. 2. Характеристики возбуждающего и рассеянного света при широкополосной накачке: *a* – осциллограмма части импульса лазерного излучения; *b* – спектрограммы возбуждающего (вверху) и рассеянного в короткой кювете света (внизу), одновременно полученные с помощью эталона Фабри – Перо с областью дисперсии $1,667 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-1}$; *в* – аналогичные спектрограммы, полученные с помощью эталона с областью дисперсии $1,085 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, интервал между линиями равен расстоянию между осевыми модами лазера ($2,17 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$)

Лазер работает в одномодовом или многомодовом режиме. В первом случае ширина его спектра по полувысоте $\delta \nu < 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, т. е. меньше $\delta \nu_0$; во втором – $\delta \nu = (0,9 + 2,7) \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, что в $13 + 40$ раз превышает $\delta \nu_0$. При многомодовой генерации осциллограмма излучения (рис. 2, *a*) имеет вид периодически повторяющихся флуктуаций, средняя длительность которых согласуется с шириной спектра. Средняя (по периоду) интенсивность света изменяется по закону близкому к гауссову. Также изменяется интенсивность при одномодовой генерации. Длительность импульса по полувысоте $\sim 180 \text{ нсек}$. Благодаря использованию фарадеевской ячейки (для развязки между лазером и кюветой) в спектре рассеянного света наблюдается одна компонента ВРМБ. Ее структура в деталях воспроизводит спектральное распределение возбуждающего излучения (рис. 2, *б, в*), а частотный сдвиг ($\approx 4,9 \cdot 10^2 \text{ см}^{-1}$) не зависит от ширины спектра накачки.

При ВРМБ усиление идет по закону e^G , где для случая узкополосного возбуждения $G = I g_0 l$. Здесь I (Мвт/см^2) — интенсивность накачки, l — длина взаимодействия. Если интенсивность накачки превышает $I_{\text{пор}}$, причем $G(I_{\text{пор}}) \approx 25$, то в рассеянный свет преобразуется значительная ее доля¹⁾, и интенсивность света, прошедшего через среду, стабилизируется на указанном пороговом уровне²⁾. Порог определяется с помощью двух фотоэлементов, регистрирующих мощность возбуждающего излучения на входе и выходе из кюветы. Сигнал от них одновременно поступает на горизонтальную и вертикальную отклоняющие системы электронно-лучевой трубки, и осциллограмма фиксирует зависимость мгновенной мощности излучения, прошедшего через рассеивающую среду, от мощности накачки. Измерив пороговую мощность (T_0) при узкополосном возбуждении (рис. 3), мы вычислили пороговую

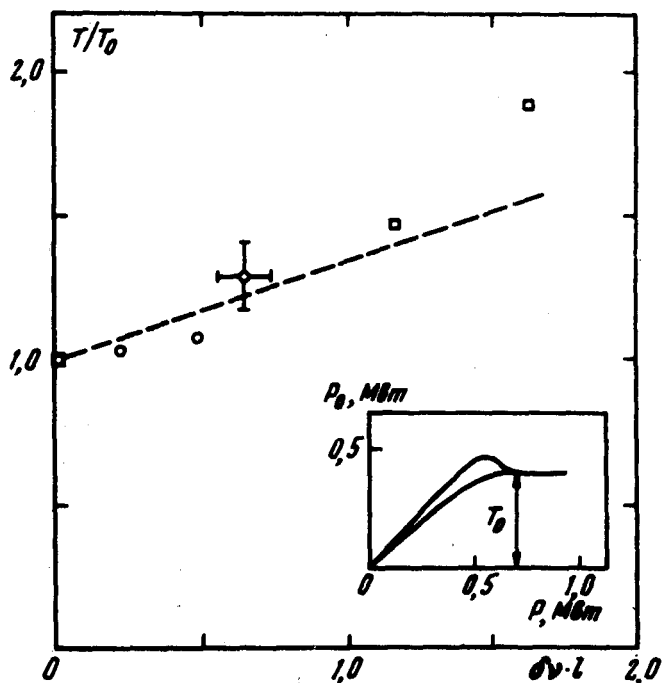


Рис. 3. Зависимость порога ВРМБ от ширины спектра накачки ($\delta\nu$) и длины рассеивающей среды (l). Кружки — экспериментальные результаты при $l = 24$ см; квадраты — при $l = 99$ см. Пунктирная линия — расчет по формуле (2). Справа внизу — экспериментальная осциллограмма. Здесь P — мгновенная мощность накачки; P_0 — мгновенная мощность излучения, прошедшего через рассеивающую среду; T_0 — пороговая мощность

¹⁾ Для наблюдения вынужденного рассеяния обычно необходимо превзойти именно этот порог [8].

²⁾ При широкополосной накачке, как показали опыты на нашей установке, стабилизируется средняя интенсивность света.

интенсивность $I_{\text{пор}}$ и затем нашли, что $G(I_{\text{пор}}) = 24$. Результаты измерений порога ВРМБ при разных ширинах спектра накачки $\delta\nu$ и длинах взаимодействия l представлены на рис. 3 в зависимости от параметра $\delta\nu l$. Этот параметр имеет простой физический смысл: $\delta\nu(\text{см}^{-1}) \cdot l \equiv \equiv l/l_{\text{ког}}$, где $l_{\text{ког}}$ — длина когерентности возбуждающего света [9]. Для сравнения результатов с теорией рассмотрим два случая: $\delta\nu l \ll 1$ и $\delta\nu l \gg 1$.

Из теории, развитой для первого случая [1, (см. также 10)], следует, что порог ВРМБ практически не зависит от ширины спектра. При этом спектр рассеянного света повторяет по форме спектр накачки. Наши результаты полностью подтверждают эти выводы. Насколько нам известно, это первая публикация по экспериментальной проверке указанной теории ВРМБ.

Точная теория для случая $\delta\nu l \gg 1$ отсутствует. Однако имеется оценка усиления при широкополосной накачке [11]. По этой оценке,

$$G(l) = \frac{1}{2} l \left[g_0 l - 8\delta\nu - 8\delta\nu_0 + \sqrt{(g_0 l - 8\delta\nu - 8\delta\nu_0)^2 + 32\delta\nu_0 g_0 l} \right]. \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что G уменьшается с ростом параметра $\delta\nu l$. Полагая $G(I_{\text{пор}}) = 24$ и учитывая, что в наших экспериментах $l \ll (1/\delta\nu_0)$, из (1) находим:

$$l_{\text{пор}} = \frac{24}{g_0 l} \left(1 + \frac{1}{3} \delta\nu l \right). \quad \text{Отсюда} \quad \frac{l_{\text{пор}}}{l_{\text{пор}0}} \equiv \frac{T}{T_0} = 1 + \frac{1}{3} \delta\nu l. \quad (2)$$

Экспериментальные точки на рис. 3 удовлетворительно согласуются с зависимостью (2). Нам не удалось обнаружить литературных данных, которые можно было бы количественно сравнить с формулами (1), (2). Однако отметим, что различие результатов работы [6], где наблюдалась очень низкая эффективность ВРМБ и [12], где эта эффективность была высока, объясняется, по-видимому, разной величиной параметра $l/l_{\text{ког}}$.

При широкополосном возбуждении ВРМБ в короткой кювете мы сравнили также волновые фронты рассеянного и возбуждающего света по методике, использованной в [13] для случая узкополосной накачки. Расходимость лазерного излучения $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ рад и близка к дифракционной. После прохождения линзы L_1 , световода и линзы L_2 расходимость возрастает в 150 раз. В то же время угловое распределение света, рассеянного в кювете и затем прошедшего через те же элементы, воспроизводит распределение лазерного излучения. Отсюда следует, что электрическое поле рассеянной волны совпадает с комплексно-сопряженным лазерным полем.

Таким образом, экспериментально установлено, что эффективность ВРМБ определяется соотношением между длиной взаимодействия и длиной когерентности возбуждающего света. Если длина взаимодействия меньше длины когерентности, то, в согласии с теорией, порог ВРМБ практически не зависит от ширины спектра накачки, а спектр и волновой фронт рассеянного света воспроизводят соответствующие характе-

ристики накачки. Для больших длин взаимодействия также имеется согласие между экспериментом и теоретическими оценками.

Авторы глубоко благодарны Б.Я.Зельдовичу за полезные обсуждения.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
1 февраля 1974 г.

Литература

- [1] Ю.Е.Дьяков. Письма в ЖЭТФ, 11, 362, 1970.
 - [2] В.В. Бочаров, А.З. Грасюк, И.Г. Зубарев, В.Ф. Муликов. ЖЭТФ, 56, 430, 1969.
 - [3] J. V. Beitz, G.W.Flynn, D.H.Turner, N.Satin. J.Amer. Chem. Soc., 92, 4130, 1970.
 - [4] А.З.Грасюк, И.Г.Зубарев, Н.В.Суязов. Письма в ЖЭТФ, 16, 237, 1972.
 - [5] J.P.Budin, A.Bonzel, J.Ernest, J.Rapfy. Electr. Lett., 3, 31, 1967.
 - [6] R.H.Stolen, E.P.Ippen, A.R.Tynes. Appl. Phys. Lett., 20, 62, 1972.
 - [7] В.И.Ковалев, В.И.Поповичев, В.В.Рагульский, Ф.С.Файзуллов. Сб. Квантовая электроника, вып. 7, 78, 1972.
 - [8] M.Maier. Phys. Rev., 166, 113, 1968.
 - [9] М.Борн, Э.Вольф. Основы оптики. М., 1970. стр. 349.
 - [10] З.А.Баскакова. Кандид. диссертация. МГУ, 1973.
 - [11] Ю.Е.Дьяков. Кр. сообщения по физике, ФИАН, №4, 23, 1973.
 - [12] М.А.Большов. Кандид. диссертация, МГУ, 1971.
 - [13] Б.Я.Зельдович, В.И.Поповичев, В.В.Рагульский, Ф.С.Файзуллов. Письма в ЖЭТФ, 25, 160, 1972.
-