

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
 ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 60, ВЫПУСК 12
 25 ДЕКАБРЯ, 1994

Письма в ЖЭТФ, том 60, вып.12, стр.823 - 828

© 1994г. 25 декабря

ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ
МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА В СЕРОУГЛЕРОДЕ,
ЗАПОЛНЯЮЩЕМ КАПИЛЛЯР, ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЛАЗЕРНОЙ
НАКАЧКЕ

А.И.Ерохин, В.С.Старунов, А.К.Шмелев

*Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
 117924 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 16 ноября 1994 г.

Экспериментально исследована временная зависимость интенсивности вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), выходящего из торцов полого стеклянного капилляра, заполненного сероуглеродом, при поперечной лазерной накачке. Обнаружены крупномасштабные временные осцилляции интенсивности ВРМБ с временными интервалами порядка и больше времени двойного прохода светом длины капилляра и мелкомасштабная временная модуляция с периодами, равными периоду волны гиперзвука при ВРМБ и его субгармоникам.

Исследованию ВРМБ посвящено большое число работ, однако лишь в нескольких из них [1,2] экспериментально изучалась временная динамика спектра с временным разрешением порядка или меньше периода гиперзвуковой волны. Этими работами и рядом экспериментов в стеклянных световодах (см., например [3,4]) продемонстрирована перспективность изучения различных динамических эффектов, бифуркаций и закономерностей перехода к динамическому хаосу по спектрально-временным характеристикам вынужденного рассеяния света (ВР) и ВРМБ в частности. В предшествующих работах излучение ВРМБ распространялось коллинеарно с излучением накачки.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование последовательности возникновения и временной динамики различных компонент спектров вынужденного рассеяния света (ВР), возникающего в полом тонком стеклянном капилляре, заполненном жидким сероуглеродом, при поперечной лазерной накачке.

1. ВР возбуждалось излучением второй гармоники одномодового неодимового лазера (530 нм) длительностью (по полувысоте) $t_p \approx 15$ нс и с максимальной

энергией 200 мДж. Это излучение расширялось до размеров ~ 6 см и затем фокусировалось цилиндрической линзой в капилляр с CS_2 длиной $L = 18$ см (время двойного прохода света $2T_0 = 2Ln/c = 2$ нс и между выходными окнами $2T_1 \approx 2,3$ нс) и внутренним диаметром 170 мкм. Окошки капилляра были скошены относительно его оси. Излучение ВР из торца капилляра после спектрального разложения интерферометром Фабри-Перо (область дисперсии $1-2,5$ см^{-1}) направлялось на щель электроннооптической камеры "Агат", и спектр разворачивался во времени. Возникновение вынужденного комбинационного рассеяния контролировалось. Выполнены также опыты с регистрацией ВР одновременно из обоих торцов капилляра с помощью фотоприемников ФК-26 и осциллографа С7-19 с полосой пропускания 1 ГГц.

2. При достаточно малых пороговых интенсивностях возбуждалось ВРМБ, соответствующее по спектральному смещению относительно линии накачки ($\Delta\nu \sim 0,18$ см^{-1}) стоксовому рассеянию под углом $\vartheta=90^\circ$ (в дальнейшем будем называть ВРМБ-90). При повышении энергии накачки возникла линия ВРМБ, соответствующая по спектральному смещению ($0,26$ см^{-1} от линии ВРМБ-90) рассеянию под углом $\vartheta=180^\circ$ от излучения ВРМБ-90 (в дальнейшем называем ВРМБ-180). При еще больших мощностях накачки появлялись последующие стоксовы, а также антистоксовы линии ВРМБ-180 и возникло также явление вынужденного комбинационного рассеяния, существенно влияющее на временную динамику ВРМБ. Здесь приводятся результаты изучения временных характеристик ВРМБ-90 и возникающего от него ВРМБ-180 в условиях, когда вынужденное комбинационное рассеяние не возбуждалось.

3. Осциллограммы ВРМБ-90 чуть выше порога регистрации имеют гладкую колоколообразную форму. Импульс накачки не имеет видимой временной или пространственной асимметрии, но излучение ВРМБ-90 из торцов капилляра часто неодинаково, так что могло наблюдаться ВРМБ-90 с одного конца и не наблюдаться с другого конца, что свидетельствует о существенной разнице в их интенсивности. При этом появляющиеся при увеличении мощности накачки в области максимума интенсивности временные осцилляции излучения ВРМБ-90 из одного конца капилляра отсутствуют в излучении из второго. Расстояние между максимумами этих осцилляций лежит в пределах $\sim 1,5 - 4$ нс и, как правило, увеличивается по мере развития процесса ВРМБ.

4. Временная динамика указанных крупномасштабных осцилляций изучалась посредством временной развертки спектра на электронно-оптической камере. Для примера на рис.1 (кривая 1) приведена микрофотограмма временной развертки ВРМБ-90 в условиях, когда во второй половине импульса регистрировалась также слабая компонента ВРМБ-180. Возникновение первой компоненты ВРМБ-180 не влияет заметным образом на временную динамику ВРМБ-90. Временные интервалы между максимумами осцилляций в большинстве случаев возрастают по мере развития процесса ВРМБ от ~ 2 до ~ 6 нс. В случае рис.1 расстояние между максимумами осцилляций растет в последовательности 3,1-3,4; 4,1-4,7; 5,8-6,2 нс, причем между первой и второй намечается еще один максимум. В другом типичном случае последовательность импульсов 1,8-2; 2,9-3,1; 6 нс. Менее типичная ситуация, когда интервалы между импульсами проходят через максимум: 3,5-4; 4,5-5,2; 3,5-3,8; 3,5-4 нс. Иногда перед первой осцилляцией и после последней наблюдаются группы существенно более слабых импульсов с интервалами 0,45-0,7 нс.

Во временной развертке часто регистрировались два порядка интерферограммы разной интенсивности, в которых взаимное положение и временные интервалы максимумов осцилляций не всегда совпадают.

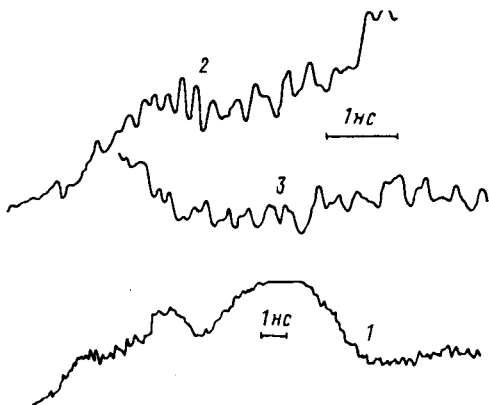


Рис.1

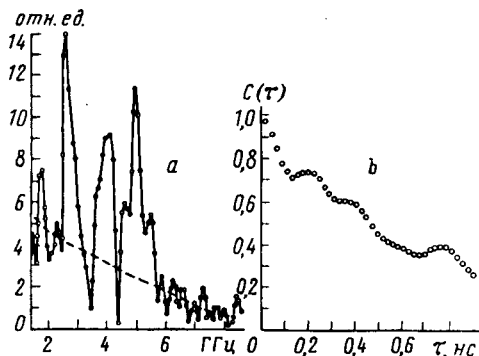


Рис.2

Рис.1. Микрофотограмма временной развертки ВРМБ-90 (1) и увеличенные в 5 раз фрагменты ее начала (2) и конца (3)

Рис.2. а - Фурье-спектр и б - корреляционная функция $C(\tau)$ начального этапа развития ВРМБ-90

5. Первая компонента ВРМБ-180, возникающая от ВРМБ-90, регистрируется несколько раньше или позже интенсивной осцилляции ВРМБ-90. Временная структура ВРМБ-180 качественно в общих чертах похожа на структуру ВРМБ-90, хотя общая длительность и число осцилляций меньше и максимумы и минимумы их во времени часто не совпадают с ВРМБ-90.

6. На фоне описанных выше крупномасштабных осцилляций наблюдаются мелкомасштабные во времени флуктуации и осцилляции (периодическая модуляция) интенсивности, особенно отчетливо в начальной и конечной стадиях развития процесса и в начале и конце крупномасштабных осцилляций глубиной до 50%. На рис. 1 для примера показаны увеличенные в пять раз фрагменты начала (2) и конца (3) временной развертки ВРМБ-90. Визуально в начале импульса на фотографии временной развертки отчетливо видна периодическая структура с периодом, полученным из измерений на компараторе, $T_1 = 0,2 - 0,22$ нс ($f_1 = 1/T_1 \approx 5,0 - 4,6$ ГГц), что близко к периоду гиперзвуковой волны при ВРМБ-90 ($T_1 \sim 0,19$ нс, $f \sim 5,4$ ГГц). По мере развития процесса более отчетливо проявляется структура с приблизительно удвоенным периодом $0,35 - 0,41$ нс ($2,9 - 2,4$ ГГц). Эта субгармоническая структура еще более отчетливо проявляется в конце импульса. На некоторых временных развертках удалось зафиксировать также структуры с периодами $T_2 \sim 0,1 - 0,15$ нс и $0,3$ нс, что близко к периоду гиперзвуковой волны при ВРМБ-180 ($f_2 \sim 7,7$ ГГц, $T_2 \sim 0,13$ нс) и его второй субгармонике.

7. Для наглядности наблюдаемой картины был выполнен на компьютере Фурье-анализ начального этапа временной развертки ВРМБ-90. Для набора частот от $f_1 = 1,42$ ГГц до $f = 8,5$ ГГц с шагом $f = 7,1 \cdot 10^{-2}$ ГГц вычислялся интеграл $I(f_i) = \int I(t) \exp(2i\pi f_i t) dt$. Шаг интегрирования составлял $2,2 \cdot 10^{-2}$ нс, интервал интегрирования $8,2$ нс. Таким образом был построен спектр $I(f_i)$

(рис.2а) для временного интервала, охватывающего на рис.1 две первых и половину третьей крупномасштабной осцилляции. Аналогичные расчеты были выполнены также для более мелких интервалов интегрирования посредством разбиения всего предыдущего интервала на восемь частично перекрывающихся областей. С первого по пятый из этих спектров приведены на рис.3 (нижний ряд). Для тех же интервалов вычислены корреляционные функции $C(\tau) = \int I(t)I(t + \tau)dt$. Функции $C(\tau)$ для всей анализируемой области (8,2 нс) приведены на рис.2b, а для более мелких временных интервалов на рис.3 (сверху). В этом анализе (рис.2, 3) предварительно исходная временная зависимость интенсивности (почернение) сглаживалась для исключения крупномасштабных осцилляций с помощью численного моделирования дифференцирующей RC-цепочки. Расчет Фурье-спектров и $C(\tau)$ той же временной развертки (рис.1) с другими временными интервалами разбиения, с шагом частот и шагом интегрирования в четыре раза меньшим и при исключении крупномасштабных осцилляций посредством отсчета сигнала от огибающей, проведенной по минимумам мелкомасштабных флуктуаций, качественно даст тот же результат и не меняет положение максимумов в Фурье-спектре.

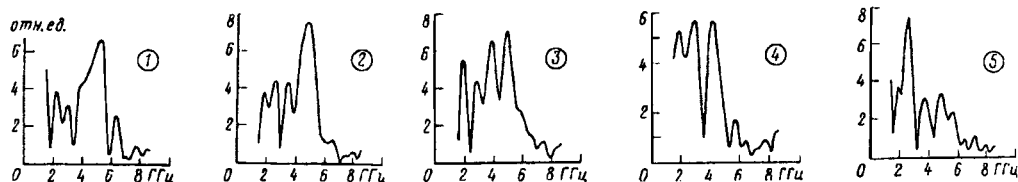
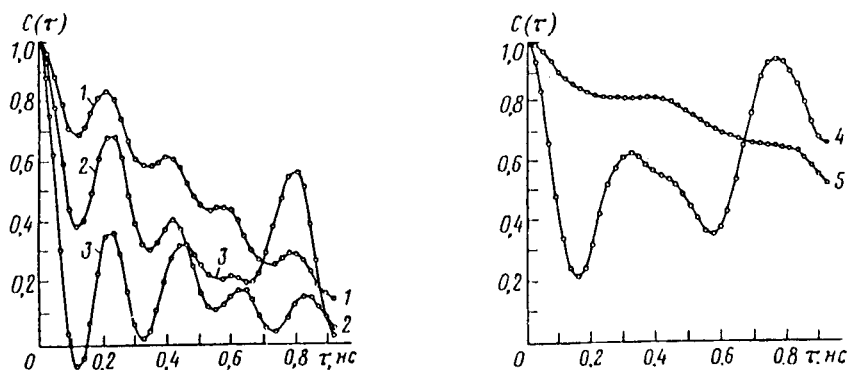


Рис.3. Фурье-спектры (нижний ряд) и $C(\tau)$ (сверху) для более мелких по сравнению с рис.2 интервалов (см. текст)

В спектрах (рис.2, 3) можно выделить несколько групп частот. Группам частот в области 4,6–5,9 и 2,3–3 ГГц в $C(\tau)$ рис.2b можно сопоставить максимумы в областях 0,17–0,22 и 0,32–0,38 нс, что находится в соответствии с прямыми измерениями на пленке (см. п.6). Эти особенности можно отнести к модуляции рассеянного излучения гиперзвуковой волной при ВРМБ-90 ($f_1 \approx 5,4$ ГГц) и ее субгармоникой $f = 1/2 f_1$, и они в указанных пределах (4,6–5,9

ГГц) наблюдаются также в спектрах и $C(\tau)$ для более мелких интервалов интегрирования (рис.3).

В спектрах рис.2, 3 проявляются менее интенсивные группы частот в области $f_2 \sim 7 - 8,2$ ГГц, а также в интервале 3,7-4,2 ГГц (кривые 3-5 на рис.3), которые можно бы отнести к субгармоникам частот f_2 и интерпретировать их как результат модуляции рассеянного света гиперзвуковой волной ($f_2 = 7,7$ ГГц) и ее субгармоникой частоты $1/2 f_2$ при ВРМБ-180.

В описываемых спектрах наблюдаются, как правило, не одиночные частоты, соответствующие ВРМБ-90 (f_1) и ВРМБ-180 (f_2) или их субгармоникам, а группы частот (2-5) в их окрестности, разделенные на 0,1-0,5 ГГц, изменяющие в этих пределах случайным образом свое положение и количество (рис.3) и наиболее интенсивные из них меньше f_1 и f_2 также на 0,1-0,5 ГГц. Это можно объяснить тем, что ВРМБ-90 происходит не только вдоль оси капилляра, но и под углами рассеяния, близкими к $\vartheta=90^\circ$, преимущественно при $\vartheta < 90^\circ$. При этом излучение ВРМБ испытывает до выхода из капилляра несколько отражений от его стенок. Для меньших ϑ коэффициент поглощения гиперзвука уменьшается и интенсивность ВРМБ-90 растет.

В спектрах рис.2 и 3 проявляется частота $f_3 \sim 1,8-2$ ГГц и в $C(\tau)$ максимумы (рис.3) или перегиб (рис.2) в соответствующем временном интервале 0,55-0,65 нс. Интерпретация этой частоты как субгармоник $1/3 f_1$ или $1/4 f_2$ весьма сомнительна, если учесть, что в самом начале развития ВРМБ-90 наблюдаются иногда малоинтенсивные осцилляции с периодом 0,45-0,7 нс (см.п.5), которые на фоне крупномасштабных осцилляций визуально могли быть не замеченными.

В $C(\tau)$ (рис.2б,3) проявляется максимум в области 0,73-0,77 нс ($f_4 \sim 1,3 - 1,4$ ГГц). В спектрах рис.2, 3 этой частоты нет, однако частоты в интервале $f_4 \sim 1,4-1,6$ ГГц проявились при расширенном анализе низких частот спектров. Интерпретация частот f_3 и f_4 остается пока неясной.

8. Обнаруженные крупномасштабные осцилляции интенсивности ВРМБ ($\approx 2 - 6$ нс) похожи на релаксационные колебания при ВРМБ-180 вследствие истощения интенсивности накачки встречным ВР [5], период которых $2T_0$ затягивается вследствие большого значения времени жизни фононов [3]. При поперечной накачке такого механизма истощения нет. Однако при возникновении ВРМБ-90 в одном направлении, чтобы усилиться снова и выйти в том же направлении, это излучение должно пройти через среду хотя бы дважды или, в зависимости от соотношения коэффициентов усиления и потерь, $2m$ раз (m - целое число), усиливаясь при этом в m раз, поэтому, по-видимому, и возникают временные интервалы между максимумами $2mT_0$.

Если ВРМБ-90 развивается сразу в двух противоположных направлениях, временная структура усложняется. При этом во встречных пучках ВРМБ-90 может развиваться временная неустойчивость (см. [6] и ссылки там), приводящая к модуляции интенсивности на частоте ВРМБ [1] и ее субгармониках, что и наблюдалось в наших опытах. Сильная стрикционная и ориентационная [4] нелинейности, способствуя появлению субгармоник и гармоник и их перемешиванию, в конечном счете могут приводить к появлению динамических хаотических структур.

Авторы выражают благодарность И.Л.Фабелинскому за внимание к работе и обсуждение результатов и В.В.Олейникову за помощь.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 930214279).

1. A.L.Gaeta, M.D.Skeldon, R.W.Boyd, and P.Narum, *JOSA B* **6**, 1709 (1989).
2. O.Kulagin, G.A.Pasmanik, A.L.Gaeta et.al., *JOSA B* **8**, 2155, 1991.
3. E.M.Dianov, Y.A.Karasik, A.V.Lutchnikov, and A.N.Pilipetskii, *Opt. and Quant. Electron* **21**, 381 (1989).
4. W.Lu.A.Johnstone and R.G.Harrison, *Phys. Rev.* **A46**, 4114 (1992).
5. R.V.Johnson and J.H.Marburger, *Phys. Rev.* **A4**, 1175 (1971).
6. Б.Я.Зельдович, Н.Ф.Пилипецкий, В.В.Шкунов. *Обращение волнового фронта*, М.: Наука, 1985.