

УДК 535.34

ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ЖИДКОСТЯХ С РАЗЛИЧНЫМИ ВРЕМЕНАМИ ЖИЗНИ ФОНОНОВ

А. И. Ерохин, В. С. Старунов

Экспериментально исследована временная динамика интенсивности и спектр вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) в жидкостях при различных временах жизни акустических фононов, длинах области нелинейного взаимодействия и при изменении других параметров. Впервые наблюдались одновременно амплитудные флуктуации интенсивности ВРМБ, флуктуации вследствие скачков фазы на большие углы и ее медленной диффузии, а также регулярные осцилляции интенсивности. Изучена их температурная кинетика, выявившая неизвестные ранее особенности. Наблюдалось спектральное расщепление линии ВРМБ в пределах ее полосы усиления на несколько компонент.

Исследования явлений вынужденного рассеяния света (ВР) имеют важное значение, поскольку эти исследования дают много сведений о характере взаимодействия интенсивного света с веществом и о структурных и динамических свойствах среды. Вследствие шумовой природы явлений ВР флуктуации различных параметров среды могут существенно влиять на временную динамику. Вследствие низкого порога возникновения эти явления также существенно определяют характер протекания других нелинейных оптических явлений, и поэтому широко изучаются. В первую очередь, это относится к вынужденному рассеянию Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ). После того, как в 1980 г. одновременно в трех работах [1 – 3] было экспериментально показано, что на явление

ВРМБ существенное влияние оказывают фазовые флуктуации, вырос интерес к изучению временных характеристик ВРМБ. Влияние амплитудных и фазовых флуктуаций на ВРМБ изучалось в стеклянных световодах [4 – 5] и сжатых газах [6]. В жидкостях и световодах наблюдались регулярные осцилляции с периодом, равным времени двойного прохода светом области нелинейного взаимодействия [4, 7 – 9]. Однако исследование других динамических свойств ВРМБ флуктуационного происхождения в жидкостях, кроме упомянутых работ [1 – 3], не проводилось. Между тем именно в жидкостях целесообразно проводить такие исследования, поскольку в них легко менять такие параметры, как время жизни акустических фононов T_r , определяющее как коэффициент усиления, так и динамические свойства ВРМБ. Эта задача решалась в нашей работе и здесь кратко представлены ее результаты.

Вынужденное рассеяние возбуждалось одномодовым излучением второй гармоники неодимового лазера ($\lambda = 0.53 \text{ мкм}$) с длительностью импульса по полувысоте $t_p \sim 20 - 40 \text{ нс}$ и максимальной энергией $\approx 200 \text{ мДж}$. Это излучение фокусировалось в сосуд с жидкостью длиной $L = 15$ или 25 см линзами с фокусным расстоянием 23, 100 или 330 см. Сосуд располагался наклонно относительно направления распространения излучения, чтобы устранить эффекты обратной связи. Рассеянное назад излучение с помощью делительного зеркала направлялось на интерферометр Фабри–Перо или на фотоприемник ФК-26 и регистрировалось с помощью осциллографа С7-19. Временное разрешение системы $\sim 200 \text{ псек}$, спектральное $\sim 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Излучение накачки фокусировалось в область между серединой сосуда и выходным окном кюветы. Изучались жидкие n -гексан при комнатной температуре и бензиловый спирт при температурах 7, 20 и 60°C . Время жизни фононов T_r для n -гексана 0.28 нсек , а для бензилового спирта $T_r = 5 \cdot 10^{-2}$, $8 \cdot 10^{-2}$ и $\sim 0.2 \text{ нсек}$ при температурах 7, 20 и 60°C , соответственно. Время $T_0 = Ln/c$ прохода светом нелинейной среды для n -гексана ($n = 1.38$; $L = 15 \text{ см}$) равно 0.7 нсек , а для бензилового спирта ($n = 1.56$) $T_0 = 0.8$ и 1.3 нсек для $L = 15$ и 25 см , соответственно.

Для наблюдения проявлений шумовой природы в интенсивности ВРМБ должно выполняться условие $F = \pi r^2 / \lambda L \leq 1$, где F – число Френеля, r – радиус пучка излучения на входе в среду, λ – длина волны. В наших опытах это условие всегда выполнялось.

Мы представим здесь временную динамику ВРМБ при различных температурах (t от 7 до 60°C), фокусирующей линзе $f = 100 \text{ см}$ и при длинах сосуда $L = 15$ и 25 см , а также динамику в n -гексане при комнатной температуре и $L = 15 \text{ см}$.

Даже в одной и той же жидкости и в одинаковых условиях опыта временная дина-

мика может меняться как в пределах одного лазерного импульса, так и от импульса к импульсу весьма существенным образом. Однако из этого многообразия можно выделить определенные закономерности.

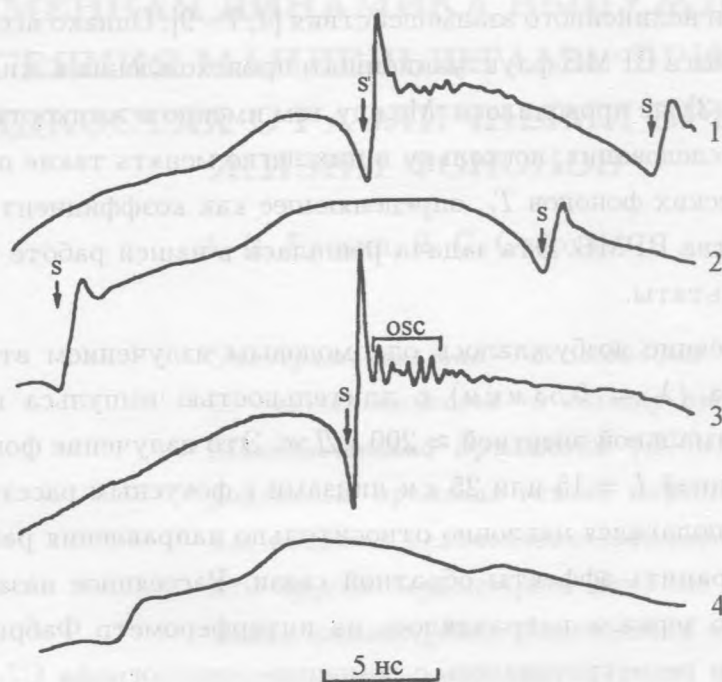


Рис. 1. Различные реализации временной динамики ВРМБ в *n*-гексане при комнатной температуре, $L = 15$ см и $f = 100$ см. S - проявление флуктуации фазы $\sim \pi$, OSC - регулярные затухающие осцилляции $PO-2$, 3 - проявление медленных флуктуаций фазы.

Изменение интенсивности во времени можно разделить на три вида. К первому мы относим случайно распределенные во времени амплитудные флуктуации (АФ), с глубиной модуляции близкой к 100% при малых временах жизни фононов. Ко второму виду мы относим случайно распределенные изменения интенсивности, обусловленные флуктуациями фазы (ФФ) в ВРМБ. Эти изменения в случае резких скачков фазы на углы $\sim \pi$ имеют вид двунаправленных резких изменений интенсивности ВРМБ с крутизной фронта меньшей времени жизни фононов T_r . Скачкообразные изменения фазы на величину меньше $\pi/2$ проявляются в спектре, но слабо выражены в изменениях интенсивности. Медленный дрейф или диффузия фазы проявляются как "плавающие" слабые изменения интенсивности. На рис. 1 для ФФ в *n*-гексане проявление фазовых скачков на большие углы обозначено как S на осциллограммах 1 и 2. Результат медленных блу-

жданий показан на осциллограмме 3. Сразу отметим, что все приводимые результаты получены в режиме насыщения, когда стационарный коэффициент усиления $G \sim 20-30$ или даже более. Характер проявления амплитудных флуктуаций существенным образом определяется величиной $m \approx GT_r/2T_0$ (более точно (см. [4]) $GI_s T_r/I_0 2T_0$, где I_0, I_s – интенсивности накачки и ВРМБ). В *n*-гексане параметр $m \gg 1$ ($T_2/2T_0 \sim 0.4$) и амплитудные флуктуации в режиме насыщения ВРМБ подавляются. Такая же ситуация наблюдается для бензилового спирта при $t = 60^\circ\text{C}$, как это видно на рис. 2. В осциллограммах 1 и 2 на рис. 2 проявляются главным образом различные флуктуации фазы. При охлаждении бензилового спирта до 7°C величина T_r уменьшается так, что m становится меньше 1 ($T_r/T_0 \sim 4 \cdot 10^{-2}$) и, как видно из временной развертки 3, развиваются глубокие амплитудные флуктуации при проявлении также ФФ-1 и ФФ-2. Похожая картина наблюдалась во временной динамике в бензиловом спирте при комнатной температуре ($T_r/T_0 \approx 0.1$, $m \sim 1$), как это видно на осциллограммах 1 и 2 рис. 3, где, как и выше, длина сосуда $L = 15$ см. Увеличение длины сосуда до $L = 25$ см увеличивает T_0 и уменьшает величину m , что, как видно из осциллограммы 4 рис. 3, приводит к проявлению более развитых и глубоких амплитудных флуктуаций.

Наряду со случайными амплитудными и фазовыми флуктуациями наблюдаются регулярные осцилляции (РО) двух видов. Первый вид РО-1 может носить и незатухающий характер, но иногда прерывается другими видами временных особенностей. Этот вид представлен разверткой 4 на рис. 2, а также развертками 3 и 5 на рис. 3. Средние периоды осцилляций T на этих рисунках составляют 2.9, 3.2 и 3.9 нсек, соответственно. РО-1 можно объяснить периодическим истощением накачки вследствие встречного распространения излучения ВРМБ [9, 10]. Наблюдаемое здесь значительное превышение периода осцилляций T над рассчитанными значениями $2T_0$ (при $T_r = 0$) связано, возможно, с влиянием на период T конечности значения T_r ("затягивание" периода осцилляций). Такое влияние было экспериментально изучено и подтверждено численным расчетом для световодов в [4]. Наблюдаемое в наших опытах увеличение периода T при увеличении T_r и увеличении L качественно подтверждают такое предположение. Отметим, что между максимумами РО-1 иногда проявляются менее интенсивные осцилляции (осциллограмма 5 на рис. 3), расположенные не всегда точно в середине между РО-1 и происхождение которых выясняется.

Наряду с РО-1 иногда наблюдались не очень глубокие сильно затухающие осцилляции (РО-2) с несколько увеличивающимся по мере затухания периодом $T \sim 1-2$ нсек для *n*-гексана (OSC на развертке 3 рис. 1) и $T \sim 1-1.5$ нсек для бензилового спир-

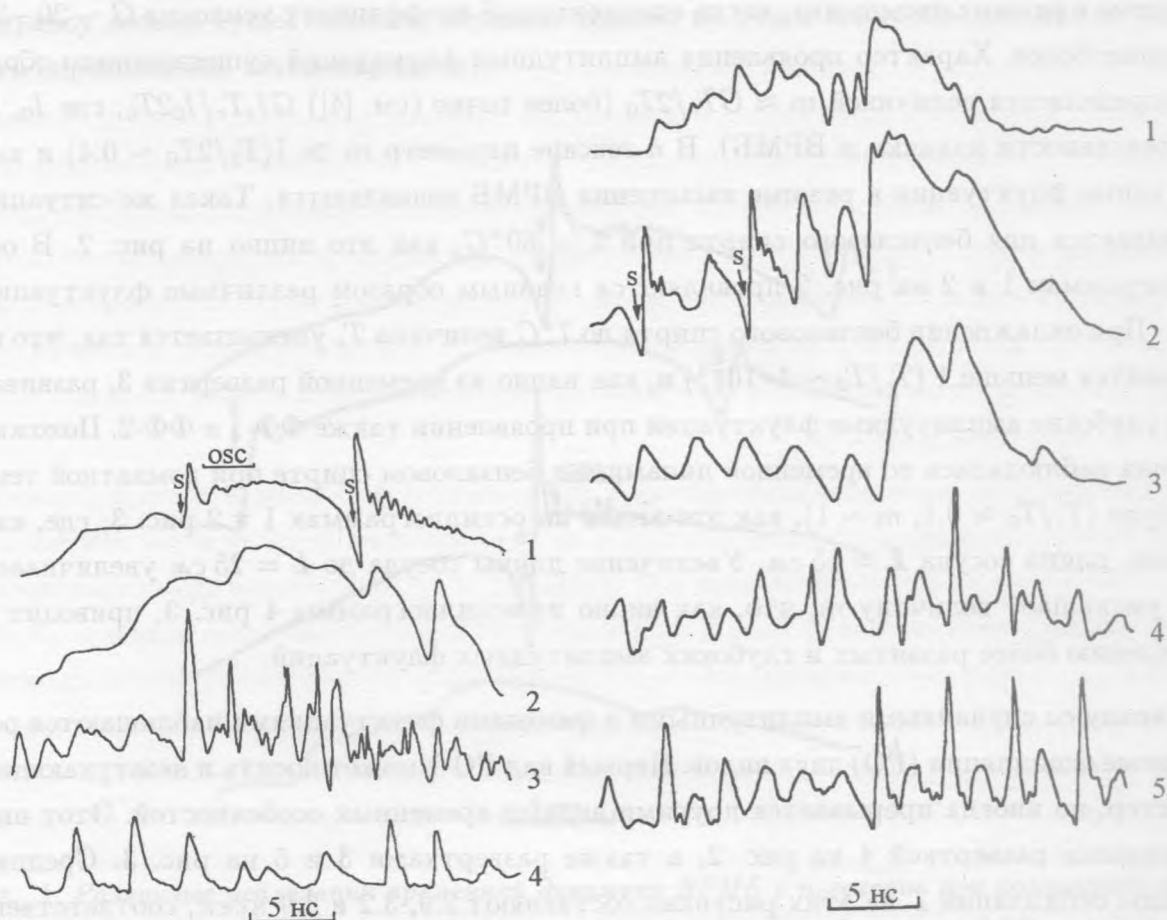


Рис. 2. Временные развертки ВРМБ в бензиловом спирте для $L = 15$ см и $f = 100$ см. (1,2) температура $t = 60^\circ\text{C}$; (3,4) температура $t = 7^\circ\text{C}$.

Рис. 3. Временные развертки ВРМБ в бензиловом спирте при комнатной температуре: (1 – 3) $L = 15$ см, $f = 100$ см; (4,5) $L = 25$ см.

та (развертка 1 на рис. 2). Эти осцилляции обнаруживаются не часто и лишь после резкого скачка интенсивности ВРМБ (после фазового скачка S на большие углы $\sim \pi$). Иногда после резких скачков интенсивности наблюдаются также затухающие осцилляции с периодом $0.4 - 0.6$ нсек, характер и период которых не изменяется ни при каких изменениях условий эксперимента в обеих жидкостях. Их происхождение мы относим к аппаратному эффекту (например, отражение в цепи приемник-осциллограф). Осцилляции РО-2 иногда промодулированы этими паразитными флуктуациями (видны после первого S -всплеска на развертке 1, рис. 1).

В нескольких сериях опытов по исследованию временной динамики в бензиловом спирте для $L = 15$ см и $f = 100$ см при комнатной температуре были получены также интерферограммы ВРМБ. Во многих случаях наблюдалось спектральное расщепление линии ВРМБ на две или три компоненты с расстоянием между ними $\sim (1-3) \cdot 10^{-2}$ см⁻¹, изменяющихся в пределах полосы усиления случайным образом. Это расщепление видимо связано, как и в [11], с возникновением случайных, не связанных между собой импульсов ВРМБ.

Приведенные результаты исследования ВРМБ дают следующую картину его временной динамики в режиме, близком к насыщению ($G > 16 - 20$). Для больших значений времени жизни фононов T_r (малый коэффициент поглощения гиперзвука) при $m \sim GT_r/2T_0 > 1$, амплитудные флуктуации интенсивности ВРМБ подавлены и проявляются фазовые флуктуации. Флуктуации фазы на большие углы ($\sim \pi$) проявляются в виде крутого (с крутизной $\leq T_r$) фронта интенсивности ВР, следующего за острым минимумом (S -образный ВРМБ солитон). После максимума с крутым фронтом часто наблюдаются регулярные, сильно затухающие осцилляции с изменяющимся периодом и средним значением $T \sim G_0 T_r$, где G_0 коэффициент усиления в области истощения накачки. Они напоминают по форме осцилляции, получавшиеся в машинном счете динамики ВРМБ при использовании в укороченных уравнениях [12 - 13] первых производных по времени. Упрощенное объяснение состоит в том, что при быстром росте интенсивности рассеянного света в нестационарном режиме ее амплитуда может существенно превысить соответствующее стационарное значение, а затем приближаться к нему колебательным образом.

Для малых значений T_r/T_0 ($m \ll 1$) начинают проявляться амплитудные флуктуации интенсивности с тем большей глубиной модуляции (до 100%), чем меньше m . В этих же условиях проявляются регулярные осцилляции с периодом $T \geq 2T_0$, которые могут затухать слабо, но прерываться другими температурными особенностями.

Авторы благодарят И. Л. Фабелинского за внимание к работе и полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 98-02-16796).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Беспалов В. И., Бетин А. А., Пасманик Г. А. и др. Письма в ЖЭТФ, **31**, 668 (1980).

- [2] Васильев В. М., Гюламерян А. Г., Мамаев А. В. и др. Письма в ЖЭТФ, **31**, 673 (1980).
- [3] Басов Н. Г., Зубарев И. Г., Миронов А. Б. и др. Письма в ЖЭТФ, **31**, 685 (1980).
- [4] Dianov E. M., Karasik A. Ya., Lutchnikov A. V., and Pilipetskii A. N. Opt. Quant. Electron., **21**, 381 (1989).
- [5] Карасик А. Я., Лучников А. В. Квантовая электроника, **12**, 1319 (1985).
- [6] Manjir M. S., Ottusch J. J., Jones D. S., et al. Phys. Rev. Lett., **68**, 1702 (1992).
- [7] Irpen E. P. and Stolen R. H. Appl. Phys. Lett., **21**, 539 (1972).
- [8] Андреев Н. Ф., Беспалов В. И., Киселев А. М. и др. Квантовая электроника, **3**, 2248 (1976).
- [9] Беспалов В. Г., Гоголева Н. Г., Горбунов В. А. Оптика и спектроскопия, **77**, 628 (1994).
- [10] Johnson R. V. and Margburger J. H. Phys. Rev., **A4**, 1175 (1971).
- [11] Беспалов В. Г., Ефимов Ю. Н., Стаселько Д. Н. Оптика и спектроскопия, **85**, 958 (1998).
- [12] Chu R., Kanefsky M., and Falk J. J. Appl. Phys., **71**, 4653 (1992).
- [13] Afshaarvahid Sh., Devrelis V., and Munch J. Phys. Rev., **A57**, 3961 (1998).

Поступила в редакцию 12 января 2000 г.