

07;12

Уменьшение глубины модуляции шумового стоксового поля при ВРМБ в одномодовом оптическом волокне с высокими рэлеевскими потерями

© А.А. Фотиади, Р.В. Киян

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 15 сентября 2000 г.

Экспериментально исследованы шумовые флуктуации интенсивности стоксового поля при вынужденном рассеянии Манделъштама–Бриллюэна (ВРМБ) импульсов накачки микросекундного диапазона длительностей в отрезке волокна ~ 300 м с потерями 17 dB/km. При увеличении длительности импульса накачки от 20 до 600 μ s наблюдалось уменьшение в несколько раз глубины шумовой модуляции интенсивности ВРМБ и сужение линии ВРМБ. Эффект объясняется образованием в волокне распределенной обратной связи за счет двойного рэлеевского рассеяния назад стоксовой компоненты ВРМБ.

1. Введение. Для многих практических приложений вынужденного рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (ВРМБ) крайне нежелательна глубокая временная модуляция стоксового излучения, которая обычно наблюдается при ВРМБ как в неволноводных средах [1], так и в оптическом волокне [2]. Основной причиной, приводящей к флуктуациям стоксового поля с характерным временем в наносекундном диапазоне, является шумовая природа затравочной стоксовой волны. Рожденная от рассеяния накачки на тепловых гиперзвуковых волнах стоксова волна при однопроходном усилении сохраняет стохастические свойства спонтанного рассеяния, которые проявляются в случайной амплитудной и фазовой модуляции излучения. В процессе усиления стоксового поля происходит обужение спектра спонтанного рассеяния в $\sim \sqrt{M}$ раз ($M \approx 16-20$ — инкремент усиления ВРМБ). На выходе из волокна поле стоксового излучения является гауссовским случайным процессом с нулевым средним, а статистическое распределение интенсивности стоксовой волны описывается рэлеевским распределением. Интенсивность ВРМБ случайно модулирована со 100%-ной глубиной модуляции

и характерным временем корреляции $\sim \sqrt{M} T_2$, где $T_2 \approx 10$ ns — время релаксации гиперзвуковой волны (оценки сделаны для $\lambda \sim 1 \mu\text{m}$) [3]. Заметное уменьшение глубины модуляций ВРМБ возможно только при значительных интенсивностях накачки (> 1 W), когда время пробега света по эффективной длине ВРМБ усиления порядка времени релаксации гиперзвука [4,5].

Полностью шумовые флуктуации интенсивности стокового поля могут быть подавлены в волоконных системах с обратной связью по стоковому полю — ВРМБ лазерах. Однако такие системы, как правило, обладают модуляционной неустойчивостью по отношению к флуктуациям, связанным с конечной длиной резонатора, что также приводит к образованию глубоких модуляций интенсивности выходного излучения [6,7].

В настоящей статье описан эксперимент по изучению шумовых флуктуаций интенсивности стокового поля при ВРМБ в длинном оптическом волокне с высокими рэлеевскими потерями. В эксперименте наблюдалось уменьшение глубины шумовых модуляций интенсивности ВРМБ до 3 раз и одновременное сужение линии ВРМБ в 100 раз. Эффект объясняется образованием в волокне распределенной обратной связи за счет двойного рэлеевского рассеяния назад стоковой компоненты ВРМБ.

2. Экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника накачки ВРМБ нами использовался непрерывный Nd:YAG лазер, работающий в одной поперечной и одной продольной моде на длине волны $1.06 \mu\text{m}$. Выходная мощность лазера составляла 1–2 W. Лазер был собран на основе промышленного лазера ЛТН-503, в котором переднее зеркало заменено оптической стопой. Стопа, состоящая из пяти плоскопараллельных стеклянных пластин, разделенных кольцами (толщина пластин и колец ~ 4 mm), имела максимальный коэффициент отражения 80% на рабочей длине волны и обеспечивала уверенную селекцию одной продольной моды. Селекция одной поперечной моды обеспечивалась диафрагмой, установленной в резонатор лазера между активным элементом и стопой. Ширина линии генерации лазера, использованного в эксперименте, не превышала ~ 50 kHz. Импульсы накачки формировались из непрерывного излучения лазера с помощью внешних модуляторов — электрооптического (ЭОМ) или механического (вертушки).

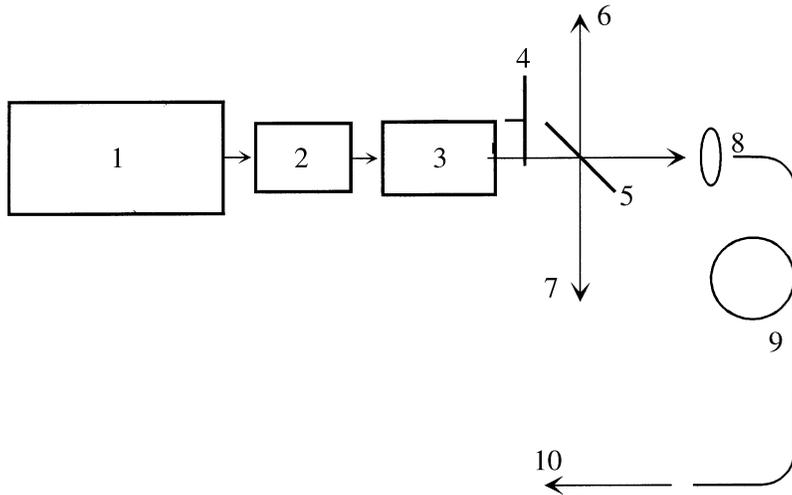


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — 1064 nm Nd:YAG одно-частотный лазер, 2 — ЭОМ, 3 — оптический изолятор, 4 — механический модулятор, 5 — стеклянная пластинка, 6 — регистрация стоксового сигнала, 7 — регистрация сигнала накачки, 8 — объектив, 9 — 300-м одномодовое волокно, 10 — регистрация прошедшей накачки.

Лазер накачки был изолирован от паразитных отражений с помощью магнитооптической ячейкой Фарадея импульсного типа. Момент включения ячейки был согласован с открытием модулятора, используемого для формирования импульсов накачки.

ВРМБ инициировалось в одномодовом кварцевом волокне с диаметром сердцевины $\sim 5 \mu\text{m}$ и числовой апертурой 0.09. Измеренное затухание света в волокне составило $\sim 17 \text{ dB/km}$. Потери света в волокне были обусловлены рэлеевским рассеянием, поглощение света давало незначительный вклад в потери. Длина волокна составляла $\sim 300 \text{ m}$. Во избежание паразитных отражений от торцов волокна они были сколоты под углом к оси. Для защиты от внешних вибраций волокно было уложено в пенопластовую коробку.

В эксперименте одновременно регистрировались временные сигналы: входной мощности накачки, мощности накачки, прошедшей через

волокно, и мощности рассеянной стоксовой волны. Для их регистрации соответствующее излучение ответвлялось светоделительными пластинами и подавалось на светодиоды типа ЛФД-2 с характерным временем нарастания ~ 0.5 ns, а сигналы с них подавались на запоминающие осциллографы. Далее осциллограммы сигналов отцифровывались и вводились в компьютер для последующего анализа.

3. Результаты эксперимента. Измерения были проведены при двух различных видах импульса накачки, поступающего в волокно.

В первом случае излучение лазера проходило через электрооптический модулятор, к которому было приложено напряжение, изменяющееся по синусоидальному закону с периодом 10–40 μ s.

Экспериментальные осциллограммы, полученные при ВРМБ с синусоидальной модуляцией интенсивности накачки, представлены на рис. 2. Хорошо видно, что при максимальной мощности накачки ~ 200 mW ВРМБ приводит к значительному истощению накачки, прошедшей через волокно. При этом осциллограммы выходных сигналов изрезаны глубокими флуктуациями, обусловленными шумовым характером затравочного излучения. Детальное изучение флуктуаций показало, что флуктуации хаотичны, их характерный временной масштаб 50–200 ns, а глубина модуляции интенсивности достигает 100%. Величина нормального стандартного отклонения интенсивности стоксовой волны $\Delta P_S = \sqrt{\langle P_S^2(t) \rangle / \langle P_S(t) \rangle^2 - 1}$ на всех осциллограммах с точностью до 0.05 равна единице. Корреляционная функция интенсивности стоксового поля $C(\tau) = \langle P_S(t + \tau)P_S(t) \rangle / \langle P_S(t) \rangle^2 - 1$, рассчитанная по осциллограммам, хорошо описывается гауссовской кривой с временем корреляции ~ 50 ns. Статистический анализ осциллограмм рассеянного излучения показал, что статистическое распределение мгновенных реализаций интенсивности стоксового поля соответствует рэлеевскому закону распределения. Это доказывает, что поле стоксовой волны в данном случае является гауссовским случайным процессом с нулевым средним. Энергетический спектр стоксового поля, восстановленный из корреляционной функции, имеет ширину по уровню e^{-1} от максимума ~ 10 MHz (для гауссовских случайных процессов время корреляции τ_k и ширина энергетического спектра (FWe⁻¹M) $\Delta \nu_S = \sqrt{2}/\pi\tau_k$ связаны соотношением $\Delta \nu_S = \sqrt{2}/\pi\tau_k$ [8]).

Во втором случае прямоугольные импульсы накачки длительностью 600 μ s вырезались из непрерывного лазерного излучения механи-

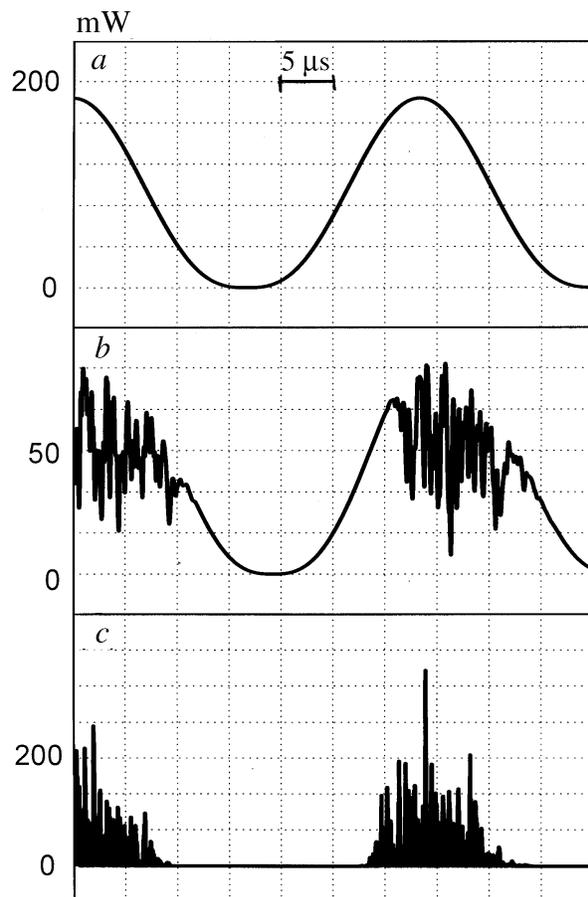


Рис. 2. Характерные осциллограммы импульса накачки (*a*); накачки, прошедшей через волокно (*b*); рассеянного стоксового сигнала (*c*). Интенсивность накачки промодулирована с периодом $\sim 33 \mu\text{s}$.

ческим модулятором (вертушкой). Длительность переднего и заднего фронтов составляла $\sim 20 \mu\text{s}$, а нестабильность интенсивности на длительности импульса не превышала $\sim 1\%$.

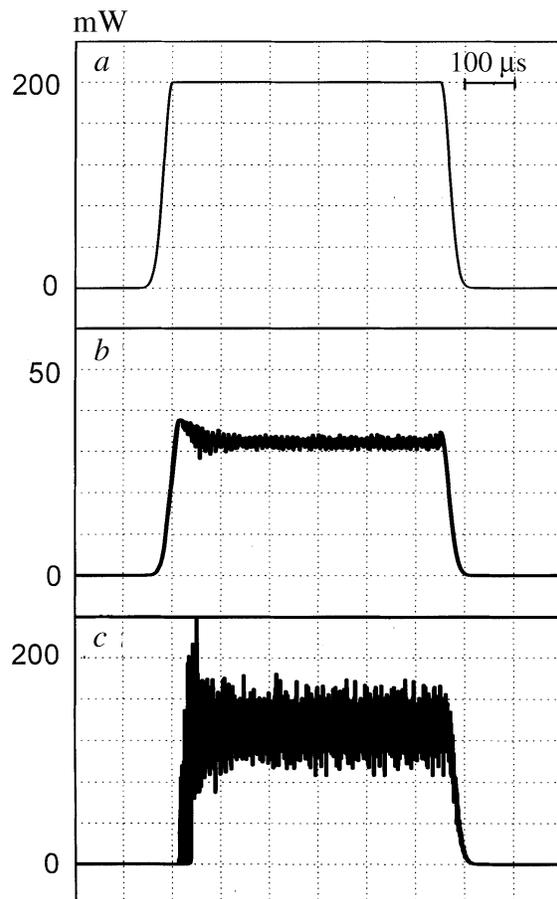


Рис. 3. Характерные осциллограммы импульса накачки (*a*); накачки, прошедшей через волокно (*b*); рассеянного стоксового сигнала (*c*). Накачка — прямоугольные импульсы длительностью $\sim 600 \mu\text{s}$.

Экспериментальные осциллограммы, полученные при ВРМБ с прямоугольной модуляцией накачки, представлены на рис. 3. В этом случае при том же уровне интенсивности накачки 200 mW мы наблюдаем

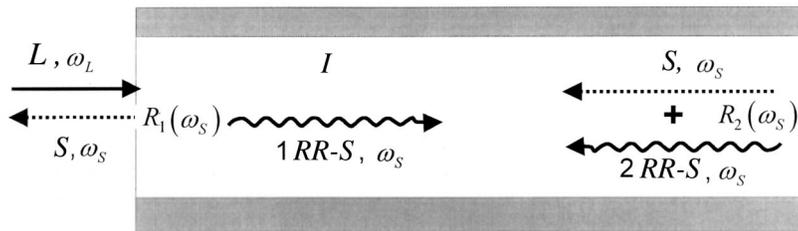


Рис. 4. Схема совместного процесса ВРМБ и рэлеевского рассеяния (RR) в одномодовом волокне. I — ВРМБ усиление $\sim \exp(20)$.

меньшее истощение накачки и соответственно меньший коэффициент преобразования накачки в стоксову волну, чем в предыдущем случае. Шумовые флуктуации интенсивности стоксового и прошедшего излучения имеют заметно меньшую глубину модуляции. Хорошо видно, что глубина модуляции интенсивности не превышает 30% и интенсивность не обращается в ноль. Характерный масштаб флуктуаций остался прежним, т.е. 100–200 ns. Компьютерный анализ осциллограмм позволил получить более точные статистические характеристики. Величина нормального стандартного отклонения интенсивности стоксовой волны $\Delta P_S = \sqrt{\langle P_S^2(t) \rangle / \langle P_S(t) \rangle^2 - 1}$ на всех осциллограммах с точностью до 0.02 равна ~ 0.13 . Корреляционная функция интенсивности по-прежнему аппроксимируется гауссовой кривой с временем корреляции ~ 50 ns. Статистическое распределение мгновенных реализаций интенсивности стоксового поля аппроксимируется гауссовой кривой с центром при $P_S = \langle P_S \rangle \approx 100$ W, т.е. поле стоксовой волны уже более не является гауссовым случайным процессом с нулевым средним.

Энергетический спектр стоксового излучения был измерен непосредственно самогетеродинамным волоконным интерферометром с 2 km линией задержки. Акустооптический модулятор, установленный в короткое плечо интерферометра, обеспечивал смещение частоты ~ 70 MHz для незадержанного излучения. Измерения показали, что ширина спектра ВРМБ не превышает в данном случае 100 kHz. Данная оценка определяется разрешением интерферометра.

3. Обсуждение результатов. Причина качественного отличия осциллограмм, полученных при различных параметрах импульсов накачки,

не может быть связана с нестационарностью процесса ВРМБ, так как период модуляции интенсивности накачки в обоих случаях значительно превышает время релаксации гиперзвуковой волны ($T_2 \approx 10$ ns [3]) и, следовательно, процесс ВРМБ в обоих случаях стационарный. Эффект может быть объяснен образованием в волокне распределенной обратной связи за счет двойного рэлеевского рассеяния назад стоковой компоненты ВРМБ.

Рассмотрим качественно процесс ВРМБ от непрерывной накачки в одномодовом оптическом волокне с учетом рэлеевских потерь. Волны, участвующие в процессе, схематично изображены на рис. 4. Пусть в оптическое волокно вводится монохроматичное излучение на частоте накачки ω_L , которое вызывает в волокне эффективную генерацию из шума стоковых волн в спектральной полосе с $\Delta\omega_S \sim 2/T_2$ вблизи центральной стоковой частоты $\omega_{S0} = \omega_L - \Omega_0$. По мере распространения по волокну стоковая волна с частотой ω_S испытывает рэлеевское рассеивание назад, образуя встречную волну на той же стоковой частоте ω_S (1-х РР Стокс). Эта волна распространяется попутно с накачкой и не участвует в ВРМБ процессе. Однако она также рассеивается по Рэлю, образуя дважды рассеянную стоковую волну (2-х РР Стокс), которая складывается когерентно с исходной стоковой волной. В различных точках волокна и для различных спектральных компонент стокового поля ω_S это сложение происходит с различной фазой (как в фазе, так и в противофазе) и, таким образом, приводит локально как к положительной, так и к отрицательной обратной связи. Усредненная по длине волокна эффективная величина обратной связи различна для различных спектральных компонент стокового поля ω_S .

По сути, сказанное означает, что в волокне имеется интерферометр, образованный двумя рэлеевскими зеркалами (на рис. 4 условно $R_1(\omega_S)$, $R_2(\omega_S)$). Хотя коэффициент отражения рэлеевских зеркал очень мал (в одномодовых волокнах интенсивность обратного рэлеевского рассеяния составляет $\sim 1/600$ часть от рэлеевских потерь [9]), гигантское усиление ВРМБ в оптическом волокне, достигающее $\sim e^{20}$ раз, достаточно для того, чтобы вызвать преимущественное усиление отдельных узких спектральных компонент стокового поля и даже лазерную генерацию на тех избранных частотах, для которых $R_1(\omega_S)R_2(\omega_S) \exp\{20\} \sim 1$. Последнее объясняет сильное сужение линии ВРМБ, наблюдаемое в эксперименте.

На основе этой модели могут быть качественно объяснены результаты эксперимента. В эксперименте с синусоидальной накачкой частота модуляции была достаточно высока (период $\sim 10\text{--}40\ \mu\text{s}$), чтобы предотвратить развитие эффективной обратной связи, связанной с двойным рэлеевским рассеянием. Иными словами, обратная связь по стоксовому сигналу не успевала установиться за время импульса накачки и фактически была подавлена. В этом случае наблюдалась обычная динамика развития ВРМБ из шума с параметрам, которые хорошо согласуются с прежними экспериментами по ВРМБ в волокне [2].

Во втором случае стабильные прямоугольные импульсы накачки длительностью $\sim 600\ \mu\text{s}$ обеспечивали возможность установления эффективной стационарной рэлеевской обратной связи за время длительности импульса. Это обратная связь приводила к сужению линии генерации и уменьшению глубины модуляции стоксового поля.

4. Заключение. При ВРМБ в одномодовом оптическом волокне с большими рэлеевскими потерями наблюдалось уменьшение глубины модуляции шумового стоксового поля, сопровождающееся сужением спектра ВРМБ и изменением его статистических характеристик. Эффект объясняется образованием в волокне распределенной обратной связи за счет двойного рэлеевского рассеяния назад стоксовой компоненты ВРМБ.

Описанный эффект может быть использован при создании новых лазерных источников света с перестраиваемой длиной волны, а также распределенных волоконных датчиков активного типа. Статистические свойства совместного процесса рэлеевского рассеяния и ВРМБ более подробно будут рассмотрены в последующих публикациях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № N 00-02-16903.

Список литературы

- [1] Беспалов В.И., Бетин А.А., Пасманик Г.А., Шилов А.А. // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 31. В. 11. С. 668–672.
- [2] Gaeta G.L., Boyd R.W. // Phys. Rev. A. V. 44. N 5. P. 3205–3209.
- [3] Дианов Е.М., Карасик А.Я., Лучников А.В., Сенаторов А.К. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 4. С. 778–784.

- [4] *Dianov E.M., Karasik A.Ya., Lutchnikov A.V., Pilipetskii A.N.* // Optical and Quantum Electronics. 1989. V. 21. N 5. P. 381–395.
- [5] *Фотиади А.А., Кузин Е.А.* // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 7. С. 195–199.
- [6] *Bar-Joseph I., Friesem A.A., Lichman E., Waarts R.G.* // JOSA B. 1985. V. 2. N 10. P. 1606–1611.
- [7] *Harrison R.G., Ripley P.M., Lu W.* // Phys. Rev. A. 1994. V. 49. N 1. P. R24–R27.
- [8] *Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С.* Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640 с.
- [9] *Hartog A.Y., Gold M.P.* // Lightwave Tech. 1984. LT2. N 2. P. 76–82.