

05;07;12

## Генерация продольных мод в активном волоконном интерферометре Фабри–Перо при накачке мало мощным одночастотным полупроводниковым лазером

© С.А. Булгакова, А.Л. Дмитриев

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,  
197101 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: Sophia.bulgakova@gmail.com

(Поступило в Редакцию 12 декабря 2008 г.)

Представлены результаты экспериментов по измерению спектров биений на выходе стационарного (без модулятора) волоконного интерферометра Маха–Цендера, возбуждаемого одночастотным полупроводниковым лазером мощностью от 0.65 до 2 мВт с шириной линии менее 20 кГц. Предложено объяснение наблюдаемого линейчатого спектра биений, основанное на факте, что протяженное (несколько километров) плечо интерферометра выполняет функции активного волоконного интерферометра Фабри–Перо; при этом определяющую роль играют эффекты усиления вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптоволокне и френелевское отражение света на торцах такого световода. Примечательно, что рассматриваемые эффекты наблюдались при малых, менее 0.3 мВт, значениях мощности вводимого в волокно излучения. Рассмотрены особенности регистрируемых сигналов биений, указано на возможность практического применения наблюдаемого эффекта в высокочувствительных оптических датчиках физических полей и перемещений.

PACS: 42.25.Dd, 42.25.Fx, 42.25.Hz

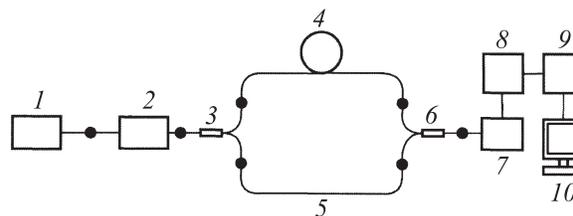
Волоконные интерферометры Фабри–Перо и Маха–Цендера широко используются в различных оптических датчиках и измерителях физических полей и перемещений: термометрах, сейсмометрах, измерителях напряженности электрического и магнитного полей, оптических гироскопах и др. [1,2], и в связи с этим представляют большой практический интерес. Компонентной базой таких устройств являются одномодовые оптоволоконные разветвители, фазовые модуляторы, полупроводниковые приемопередающие модули и волоконно-оптические линии задержки. При использовании в волоконных интерферометрах одночастотных полупроводниковых лазеров с узкой, порядка десятков килогерц, шириной линии излучения, начинают заметно проявлять себя эффекты усиления вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) в световодах [3,4]. Пороговая мощность излучения накачки при ВРМБ зависит от ширины ее спектра и, в случае применения одночастотных лазеров, обычно порядка 1 мВт в одномодовом кварцевом оптоволокне. В описанном эксперименте эффекты ВРМБ-усиления в кварцевом волокне и характерные спектры биений регистрировались при мощности накачки от 216  $\mu$ W.

На рис. 1 показана схема эксперимента. Первоначально данная схема рассматривалась как обычный волоконный интерферометр Маха–Цендера, предназначенный для исследования спектра излучения одночастотного лазера *I*, при этом в короткое плечо 5 интерферометра включался фазовый модулятор. С использованием линии задержки 4 большой, до 13 км, оптической длиной пути установлено, что ширина спектра излучателя *I* в

непрерывном режиме работы не превышает 20 кГц [5]. При отключенном фазовом модуляторе или при замене его отрезком оптоволокна 5 длиной 20 м, как показано на рис. 1, на выходе фотоприемника 7 уверенно регистрировались низкочастотные сигналы биений, типичные спектры которых представлены на рис. 2. Экспериментальный разнос  $\Delta f$  эквидистантно расположенных спектральных несущих на рис. 2 обратно пропорционален оптической длине  $nL$  линии задержки 4 (см. таблицу).

При разомкнутом плече 5 интерферометра сигнал биений отсутствовал. Наиболее мощный и устойчивый сигнал биений содержал четные гармоники спектра (см. рис. 2).

Зависимость частоты сигналов биений от длины  $L$  линии задержки указывает на то, что их причиной



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — одночастотный полупроводниковый лазер ( $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ ); 2 — оптический изолятор; 3, 6 — SM-разветвители типа  $1 \times 2$  и  $2 \times 1$ ; 4 — линия задержки (катушка одномодового волокна); 5 — оптоволокно; 7 — фотоприемник; 8 — широкополосный усилитель; 9 — спектроанализатор; 10 — компьютер; черным кружком обозначены разъемные SM-соединители.

Расчетные ( $\Delta\bar{f}$ ) и экспериментальные ( $\Delta f$ ) значения разности частот четных гармоник спектра биений

$nL, \text{ m}$	5335	7468	12 801
$\Delta f, \text{ kHz}$	53.5	38.9	22.7
$\Delta\bar{f}, \text{ kHz}$	56.2	40.2	23.4

является генерация продольных мод в активном волоконном интерферометре Фабри–Перо, образованном линией задержки 4 и зеркалами на ее концах, обусловленными френелевским отражением света на торцах такого световода. Разность частот  $\Delta\bar{f}$  соседних четных (по числу полувольт) продольных мод волоконного интерферометра Фабри–Перо равна

$$\Delta\bar{f} = \frac{c}{nL}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме,  $n$  — волноводный показатель преломления световода; расчетные значения  $\Delta\bar{f}$  при известной величине оптической задержки  $nL/c$ , определенной посредством рефлектометра, приведены в нижней строке таблицы. Очевидно, значения разности  $\Delta\bar{f}$  частот продольных мод систематически примерно на 4–7% превышают экспериментальные.

Оптическое усиление в световоде, скорее всего, вызвано эффектами ВРМБ, роль которых значительна при накачке активной среды узкополосным источником. Величина  $g$  ВРМБ-усиления в кварцевом волокне описывается известным выражением

$$g = \frac{2\pi n^7 p^2}{c\lambda_p^2 \rho v_A \Delta\nu}, \quad (2)$$

где  $n$  — показатель преломления кварцевого стекла,  $p$  — продольный акустооптический коэффициент,  $\lambda_p$  — длина волны накачки,  $\rho$  — плотность,  $v_A$  — скорость акустической волны,  $\Delta\nu$  — ширина спектра накачки на уровне 0.5. Примечательно, что указанные эффекты имеют место в обычном одномодовом кварцевом волокне при минимальной мощности излучения, вводимого в катушку оптоволокна, величиной  $216 \mu\text{W}$ . Расчетная величина усиления для кварцевого волокна  $g = 6.9 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$ . Отмеченное различие расчетных и

измеренных значений частоты межмодовых биений, по-видимому, вызвано изменением эффективного показателя преломления стекла в режиме усиления.

В экспериментах использовалось обычное кварцевое одномодовое оптическое волокно с потерями  $0.35\text{--}0.40 \text{ dB/km}$  и волноводным групповым показателем преломления, равным 1.467. Выходная мощность одночастотного полупроводникового лазера с волоконной решеткой Брэгга устанавливалась в пределах  $0.65\text{--}2 \text{ mW}$ . Мощность излучения, вводимого в линию задержки 4, изменялась в пределах  $0.2\text{--}0.6 \text{ mW}$ .

Итак, причиной наблюдаемых сигналов биений является интерференция многочастотного оптического сигнала на выходе активного волоконного интерферометра Фабри–Перо (плечо 4 на рис. 1) и опорного одночастотного сигнала, направляемого к фотоприемнику посредством оптоволокна 5. Расчетное значение пороговой мощности усиления в условиях описываемого эксперимента превышало  $1 \text{ mW}$ . Тот факт, что явления ВРМБ-усиления были зарегистрированы при уровне мощности, примерно в 4 раза меньшем расчетного, можно объяснить тем, что, по-видимому, реальный порог ВРМБ-усиления не столь критичен, как это следует из теории [4]. С другой стороны, гомодинный режим регистрации сигналов на выходе оптической линии задержки значительно увеличивает чувствительность фотоприемного устройства.

Наиболее существенно обстоятельство, что в данном эксперименте явление ВРМБ-усиления и генерации интенсивных продольных мод имели место в обычном кварцевом оптоволокне при очень низких значениях мощности накачки; при этом ширина спектра излучения накачки не превышала  $20 \text{ kHz}$ . Активный волоконный интерферометр генерировал сигнал, частотный спектр которого определялся оптической длиной интерферометра. Изменения величины  $nL$ , связанные с температурными, акустическими, магнитными, увлечения Физо и другими оптическими эффектами, очевидно, обуславливают соответствующий сдвиг наблюдаемых частот биений. Это явление может быть положено в основу разработок перспективных высокочувствительных оптических датчиков и измерителей физических полей и перемещений.

Авторы благодарят А.Н. Ветрова и И.Е. Скалецкую за содействие экспериментам. Грант 2008 г. правительства Санкт-Петербурга, комитета по науке и высшей школе.

## Список литературы

- [1] Smith R.G. // Appl. Opt. 1972. Vol. 11. P. 2489–2494.
- [2] Floch S.L., Cambon P. // J. Opt. Soc. Am. 2003. Vol. 20. P. 1132–1137.
- [3] Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. London: Academic, 1995.
- [4] Yariv A., Yeh P. Optical Waves in Crystals. NY: Wiley, 1984.
- [5] Булгакова С.А., Дмитриев А.Л. // Оптика журн. 2008. Т. 75. № 9.

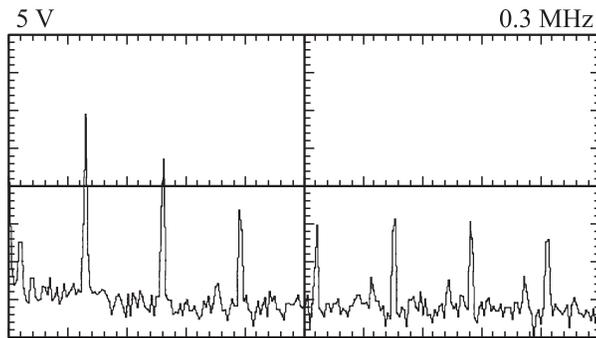


Рис. 2. Четные гармоники спектра биений ( $nL = 7468 \text{ m}$ ).