

УДК 535.681.787

## ОПТИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ В ВОЛОКОННОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ФАБРИ-ПЕРО ПРИ НАКАЧКЕ МАЛОМОЩНЫМ ОДНОЧАСТОТНЫМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРОМ

С.А. Булгакова, А.Л. Дмитриев

Описано устройство нелинейного волоконного интерферометра Маха–Цендера на основе одномодового оптоволокна с разностью хода от 2 м до 10,3 км. Приведены результаты интерферометрических исследований промышленных одночастотных полупроводниковых лазерных модулей с волоконными решетками Брэгга диапазона 1,32 мкм и 1,55 мкм с шириной линии спектра менее 20 кГц. Показано, что протяженное (несколько километров) плечо интерферометра выполняет функции активного волоконного интерферометра Фабри–Перо, в котором существенны эффекты нелинейного усиления, связанного с вынужденным рассеянием Манделштама–Бриллюэна (ВРМБ) в оптоволокне, и френелевское отражение света на торцах такого световода. Рассматриваемые нелинейные эффекты впервые наблюдались при очень малых, менее 300 мВт, мощностях излучения в световоде.

**Ключевые слова:** интерферометр Маха–Цендера, одночастотные полупроводниковые лазеры, ВРМБ, нелинейная интерферометрия, волоконная интерферометрия.

### Введение

Явление вынужденного рассеяния Манделштама–Бриллюэна (ВРМБ) используется во многих областях оплотехники и приборостроения, таких как волоконные лазерные излучатели, волоконно-оптические усилители, высокочувствительные оптические датчики физических полей и вращений, генерация «медленного света» и многих других. В настоящей статье рассматриваются устройство и особенности работы нелинейного волоконного интерферометра Маха–Цендера с разностью хода от 2 м до 10,3 км. Приведены результаты интерферометрических исследований спектральных характеристик одночастотных полупроводниковых лазеров с волоконными решетками Брэгга (ВРБ) диапазона 1,32 и 1,55 мкм с шириной спектра менее 20 кГц. При использовании в волоконных интерферометрах одночастотных полупроводниковых лазеров с узкой, порядка десятков килогерц, шириной линии излучения, начинают заметно проявлять себя эффекты ВРМБ-усиления в световодах. Пороговая мощность накачки при ВРМБ обратно пропорциональна ширине спектра сигнала накачки и в случае применения одночастотных лазеров с шириной линии порядка 1 МГц обычно составляет величину около 1–1,5 мВт в одномодовом кварцевом оптоволокне. Френелевское отражение на торцах (в разъёмных соединителях) протяженного плеча волоконного интерферометра Маха–Цендера позволяет рассмотреть данную часть оптической схемы как активный волоконный интерферометр Фабри–Перо, в котором происходит генерация линейчатого многочастотного спектра. Рассмотренные нелинейные явления в волоконных интерферометрах при низких уровнях мощности сигнала накачки наблюдаются впервые и имеют большое значение для разработки и совершенствования волоконно-оптических измерителей, датчиков и компонентов оптических систем обработки информации.

### Элементарная теория

Электрический сигнал биений  $S(t)$  на выходе фотоприемного устройства двулучевого сканирующего интерферометра представляется выражением

$$S(t) = A\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}| \tau \left| \cos \left[ \int_0^t \omega(x) dx + \delta \right] \right|, \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент чувствительности фотоприемника,  $I_1$  и  $I_2$  – мощности выходного излучения в рабочих каналах интерферометра,  $|\gamma_{12}(\tau)|$  – степень взаимной когерентности

интерферирующих световых волн,  $\tau = (l_1 - l_2)/c$  – средняя временная задержка ( $l_1, l_2$  – оптические длины путей,  $c$  – скорость света в вакууме),  $\omega(t)$  – мгновенная частота модуляции сигнала биений,  $\delta$  – постоянная составляющая фазы сигнала биений [6]. Длинное плечо 7 интерферометра Маха–Цендера (рис. 1) ограничено волоконно-оптическими разъемными соединителями, в которых френелевское отражение на торцах волоконных световодов достигает единиц процентов. Этого достаточно, чтобы представить такое плечо как сверхдлинный волоконный интерферометр (резонатор) Фабри–Перо. Мощность излучения  $I_2$  на выходе такого резонатора с оптической длиной  $nL$  представляется известной формулой

$$I_2 = I_{20} \left[ 1 + \frac{4R}{1-R} \sin^2 \varphi \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $R$  – френелевский коэффициент отражения торцов оптоволокна (для кварцевого волокна  $R = 0,04$ ),  $I_{20}$  – мощность света, входящего в оптоволокно,  $\varphi = 2\pi nL/\lambda$ . Разность частот  $\Delta\bar{f}$  соседних четных продольных мод волоконного интерферометра Фабри–Перо равна

$$\Delta\bar{f} = \frac{c}{nL}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $n$  – показатель преломления материала оптоволокна.

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

$$g = \frac{2\pi n^7 p^2}{c\lambda_p^2 \rho v_A \Delta\nu}, \quad (4)$$

где  $p$  – продольный акустооптический коэффициент,  $\lambda_p$  – длина волны накачки,  $\rho$  – плотность среды,  $v_A$  – скорость акустической волны,  $\Delta\nu$  – ширина спектра накачки на уровне 0,5.

### Описание экспериментальной установки

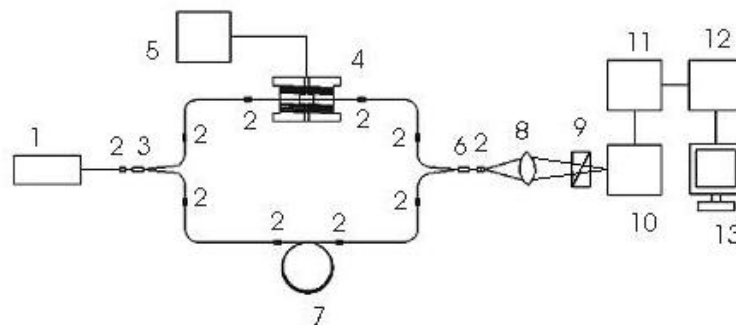


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного стенда: 1 – РБЗ-лазер; 2 – разъемные соединители (FC-125-SM коннекторы); 3, 6 – волоконно-оптические разветвители; 4 – фазовый оптический модулятор; 5 – генератор сигналов; 7 – оптическая линия задержки (катушка оптоволокна); 8 – собирающая линза; 9 – линейный поляризатор (призма Глана); 10 – фотоприемник PD-1180; 11 – широкополосный усилитель У2-8; 12 – цифровой осциллограф PC SCOPE 1Gs/s-50 MHz Velleman Instruments; 13 – ПК

Соединительные устройства и линия задержки интерферометра выполнены на основе одномодового (для длины волны 1,33 мкм либо 1,55 мкм) оптического волокна с потерями 0,35–0,40 дБ/км и показателем преломления, равным 1,467. Выходная мощность одночастотного полупроводникового лазера с волоконной решеткой Брэгга устанавливалась в пределах 0,65–2 мВт. Мощность излучения, вводимого в линию задержки 7, изменялась в пределах 0,2–0,6 мВт.

Одномодовые волоконные компоненты интерферометра, в том числе оптические разветвители и линии задержки, соединялись стандартными FC-125-SM коннекторами. Фазовый акустооптический модулятор (АОМ) выполнен в виде 170 витков одномодового волокна, намотанного на полый цилиндр из дюралюминия диаметром 63 мм и высотой 34 мм. В разрезе стенки цилиндра установлен пьезокерамический ультразвуковой преобразователь, подключенный к генератору синусоидального сигнала на частоте  $f$  в диапазоне 1–100 кГц.

### Экспериментальные результаты

Типичный спектр сигнала биений, регистрируемого фотоприемником 10 в диапазоне частот 0–120 кГц, при частоте модуляции фазового модулятора  $f = 6$  кГц, показан на рис. 2. Вследствие влияния сравнительно медленных (единицы–доли секунд) температурных флуктуаций в оптоволокне на оптическую длину пути  $nL$  линии задержки 7 спектр сигнала биений содержал и четные, и нечетные гармоники.

При отключенном фазовом модуляторе или при замене его отрезком оптоволокна длиной 20 м на выходе фотоприемника 10 при мощности оптического излучения, направленного в линию задержки, составляющей 216 мкВт, уверенно регистрировались низкочастотные сигналы биений, типичный спектр которых показан на рис. 3. Причиной наблюдаемых сигналов биений при отключенном модуляторе является интерференция многочастотного оптического сигнала на выходе активного волоконного интерферометра Фабри–Перо (плечо 7 на рис. 1) и опорного одночастотного сигнала, направляемого к фотоприемнику.

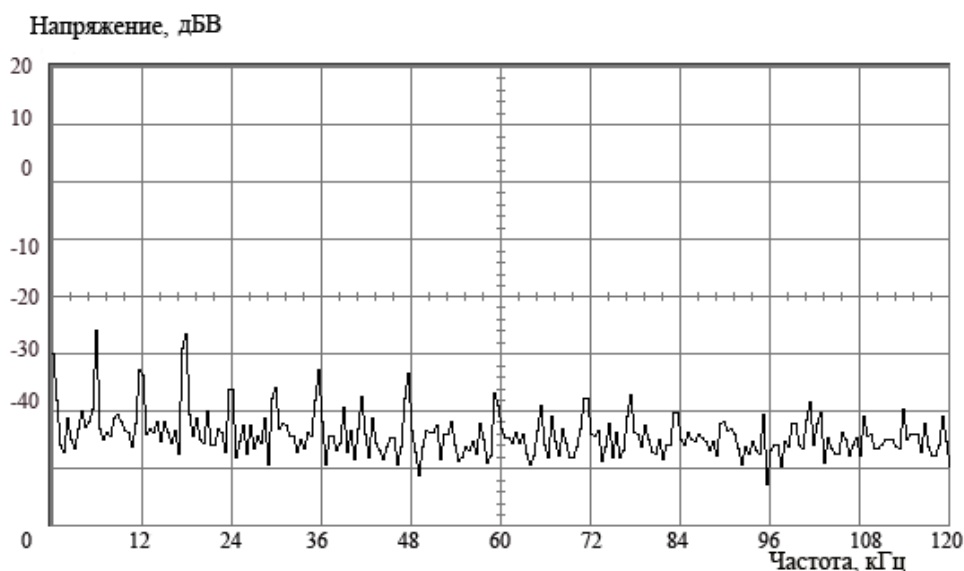


Рис. 2. Спектр биений выходного сигнала интерферометра Маха–Цендера при оптической разности хода 7468 м, частота модуляции  $f = 6$  кГц,  $\lambda = 1,55$  мкм

Экспериментальный разнос  $\Delta f$  эквидистантно расположенных спектральных несущих на рис. 3 обратно пропорционален оптической длине  $nL$  линии задержки 7. Теоретические (расчетные) значения величины разности частот продольных мод систематически, на 4–7%, превышали экспериментальные значения. Такое несоответствие, по-видимому, обусловлено небольшим изменением среднего показателя преломления волоконного световода в режиме ВРМБ-усиления.

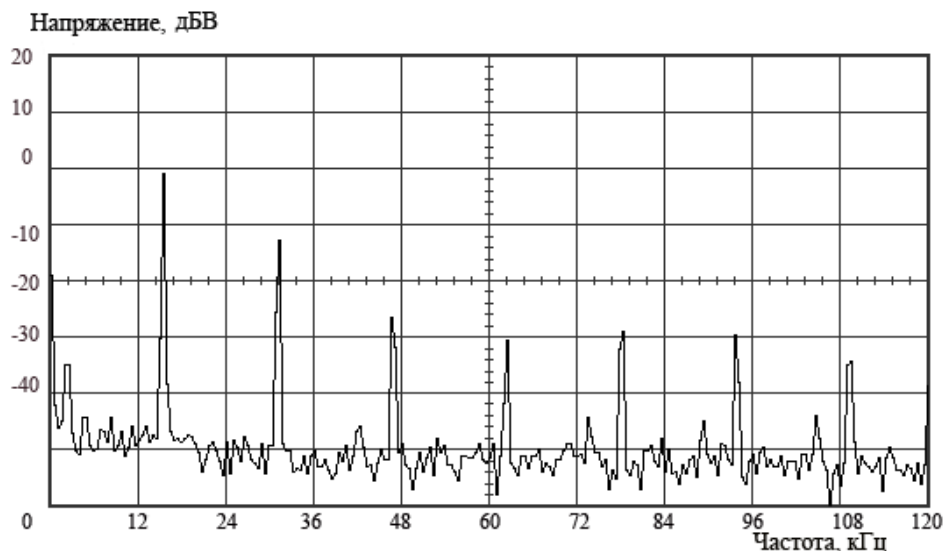


Рис. 3. Спектр биений выходного сигнала интерферометра при оптической разности хода 7468 м, модулятор отключен,  $\lambda=1,55$  мкм

При разомкнутом плече интерферометра сигнал биений отсутствовал. Наиболее мощный и устойчивый сигнал биений содержал четные гармоники спектра (рис. 3). Вследствие влияния температурных флуктуаций на оптическую длину пути линии задержки (измерения производились при комнатной температуре), амплитуды спектральных компонент сигнала биений были нестабильны во времени и спектр биений содержал как четные, так и нечетные гармоники (рис. 2, 3).

### Выводы

Характер спектра и флуктуации регистрируемых сигналов биений при использовании в схеме интерферометра Маха-Цендера фазового акустооптического модулятора показывают, что кратковременная, длительностью несколько единиц–десятков секунд, ширина спектра полупроводниковых одночастотных лазеров с внешней волоконной решеткой Брэгга составляет менее 20 кГц. Такие излучатели, по-видимому, не являются строго одночастотными и генерируют на нескольких – двух или более – близко расположенных спектральных линиях [6].

При отключенном фазовом модуляторе на выходе интерферометра наблюдается линейчатый спектр сигнала биений. При этом протяженное плечо интерферометра выполняет функции активного волоконного интерферометра Фабри–Перо, в котором происходит генерация продольных мод и существенны эффекты ВРМБ-усиления в оптоволокне. Характерно, что в описанном эксперименте явление ВРМБ-усиления и генерация интенсивных продольных мод имели место в обычном одномодовом кварцевом оптоволокне при очень низких, около 200 мкВт, мощностях накачки. Данный эффект, по-видимому, экспериментально наблюдался впервые.

Изменения величины  $nL$  оптической разности хода, связанные с температурными, акустическими, магнитными, явлением Физо и другими оптическими эффектами, обуславливают соответствующие сдвиги наблюдаемых частот биений. Такие частотные сдвиги могут быть точно определены и положены в основу практических разработок перспективных высокочувствительных оптических датчиков и измерителей различных физических полей и перемещений.

### Литература

1. Smith R.G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering // *Appl. Opt.* – 1972. – № 11. – P. 2489–2494.
2. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П. и др. Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530–1560 нм // *Квантовая электроника.* – 2001. – Т. 31. – С. 529–531.
3. Floch S.L, Cambon P. Theoretical evaluation of the Brillouin threshold and the steady-state Brillouin equations in standard single-mode optical fibers // *J. Opt. Soc. Am.* – 2003. – Vol. 20. – № 6. – P. 1132–1137.
4. Kazushiko Ogusu. Interplay between cascaded stimulated Brillouin scattering and four-wave mixing in a Fabry–Perot resonator // *J.Opt.Soc.Am.B.* – 2003. – Vol. 20. – № 4. – P. 685–694.
5. Abedin Kazi S. Single-frequency Brillouin lasing using single-mode  $As_2Se_3$  chalcogenide fiber // *Optics express.* – 2006. – Vol. 14. – № 9. – P. 4037–4042.
6. Булгакова С.А., Дмитриев А.Л. Волоконный интерферометр Маха–Цендера в измерениях спектральных характеристик одночастотных полупроводниковых лазеров диапазона 1,32 мкм и 1,55 мкм // *Оптический журнал.* – 2008. – № 9. – С. 71–75.

*Булгакова Софья Александровна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [lija84@mail.ru](mailto:lija84@mail.ru)

*Дмитриев Александр Леонидович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, [alex38@list.ru](mailto:alex38@list.ru)