

## ВОЛОКОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР МАХА–ЦЕНДЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОЧАСТОТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ДИАПАЗОНА 1,32 МКМ И 1,55 МКМ

© 2008 г. С. А. Булгакова; А. Л. Дмитриев

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: lija84@mail.ru

Описана конструкция волоконного интерферометра Маха–Цендера на основе одномодового оптоволокна с разностью хода от 2 м до 10,3 км. Фазовый модулятор интерферометра выполнен в виде катушки волокна на металлическом цилиндре, в котором пьезоэлектрическим преобразователем возбуждаются акустические колебания. Приведены результаты интерферометрических исследований промышленных одночастотных полупроводниковых лазеров с волоконными решетками Брэгга (ВРБ) диапазона 1,32 и 1,55 мкм. Показано, что кратковременная (единицы–десятки секунд) ширина линий спектра полупроводниковых лазеров с волоконными брэгговскими отражателями менее 20 кГц, при этом такие лазеры не являются строго одночастотными и генерируют на нескольких (двух или более) близко расположенных спектральных линиях.

Коды OCIS: 060.2390, 060.2430, 060.5060.

Поступила в редакцию 18.03.2008.

### Введение

Одночастотные полупроводниковые лазеры с шириной линии генерации менее 1 МГц и уровнем боковых частот, не превышающим 20 дБ, применяются в волоконно-оптических системах передачи с «плотным» спектральным уплотнением (*dense wavelength division multiplexing*, DWDM), в когерентных оптических системах связи и в различных оптических измерительных устройствах, основанных на принципах интерферометрии: в волоконно- и интегрально-оптических гироскопах с кольцевыми пассивными резонаторами, в высокоточных измерителях упругих деформаций, давления, температуры и др. [1–3]. Одночастотный режим генерации таких лазеров достигается селекцией мод в связанных резонаторах либо использованием удлиненных резонаторов с ВРБ в качестве отражателя [4, 5]. В лабораторных условиях при высокой стабилизации тока накачки, рабочей температуры и значительном подавлении случайных механических помех в полупроводниковых лазерах с внешним резонатором длиной 50–90 мм зарегистрирована ширина линии излучения 10 кГц [6]. Спектральные характеристики промышленных образцов полупроводниковых лазеров с распределенными брэгговскими зеркалами (РБЗ) в оптоволокне изучены недостаточно. Производитель, как правило, ограничивается указанием верхнего эффективного значения ширины спектра таких излучателей (например, 0,5 или 1,0 МГц), достигаемого при номинальных значени-

ях тока накачки и тока холодильника. При этом тонкая структура спектра излучения лазера и характер его изменения во времени часто остаются неизвестными. В настоящей работе приведены результаты исследований когерентных (спектральных) характеристик отечественных одночастотных полупроводниковых лазеров, полученные с применением сканирующего волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера с большой (до 10,3 км) разностью хода.

### Элементарная теория

Электрический сигнал биений  $S(t)$  на выходе фотоприемного устройства двулучевого сканирующего интерферометра (Маха–Цендера, Майкельсона и др.) в скалярном приближении описывается известной формулой [7, 8]

$$S(t) = A\sqrt{P_1 P_2} |\gamma_{12}(\tau)| \cos \left[ \int_0^t \omega(x) dx + \delta \right], \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент чувствительности фотоприемника,  $P_1$  и  $P_2$  – 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. Мгновенная частота  $\omega(t)$  си-

гнала определяется режимом сканирования фазы  $\varphi(t)$  световой волны в интерферометре, при этом

$$\omega(t) = \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial \Delta l(t)}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\Delta l(t)$  – переменная составляющая оптической разности хода и  $\lambda$  – длина волны излучения в вакууме.

Для узкополосных источников света с гауссовским профилем спектральной линии степень взаимной когерентности, определяемая как модуль нормированной автокорреляционной функции сигнала, равна

$$|\gamma_{12}(\tau)| = \exp\left[-(\tau/\tau_c)^2\right], \quad (3)$$

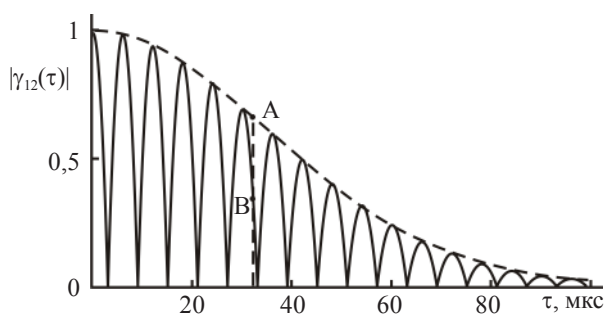
где  $\tau_c$  – время когерентности излучения источника, примерно равное обратной ширине  $\Delta\nu$  спектральной линии источника.

Если спектр источника содержит две или более сравнимых по мощности спектральные компоненты, автокорреляционная функция  $\gamma_{12}(\tau)$  уже не является монотонной [9]. Для гауссовского спектрального дублета с одинаковыми ширинами линий  $\Delta\nu \approx \tau_c^{-1}$  и разностью частот несущих  $F$  выполняется условие

$$|\gamma_{12}(\tau)| = \exp\left[-(\tau/\tau_c)^2\right] |\cos(\pi F \tau)|. \quad (4)$$

График этой зависимости приведен на рис. 1.

Спектр частотно-модулированного сигнала биений обычно содержит несколько гармоник, кратных основной частоте модуляции, а их амплитуды выражаются функциями Бесселя [10] и по большей части определяются значением функции взаимной когерентности  $|\gamma_{12}(\tau)|$ . Очевидно, мощность и эволюции спектра сигнала биений, регистрируемого на выходе двулучевого сканирующего интерферомет-



**Рис. 1.** Расчетная зависимость степени взаимной когерентности от времени задержки сигнала для однополосного (A) излучения (штриховая линия) и гауссовского спектрального дублета (B) (сплошная линия). Время когерентности  $\tau_c \approx 50$  мкс, разность несущих –  $F = 155$  кГц.

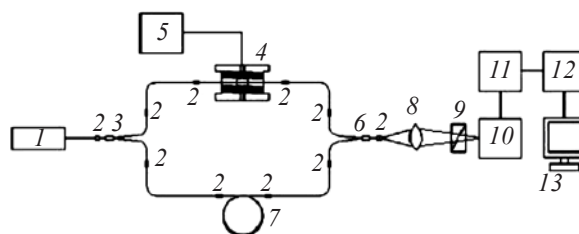
ра, характеризуют форму и временные изменения спектра сигнала источника света.

Достижение устойчивого режима генерации одночастотных полупроводниковых лазеров с точностью до нескольких единиц–десятков кГц затруднительно. Вследствие нестабильности тока накачки, изменений температуры активной среды лазера, расстройки его резонатора и влияния обратнорассеянного излучения в оптическом канале передачи спектр таких лазеров содержит одну либо две или более линии генерации, положение и мощности которых флуктуируют во времени. Такие изменения спектрального состава излучения лазера сильно влияют на амплитуду сигнала биений в интерферометре, что поясняет рис. 1. С переходом от одночастотного (A) к двухчастотному (B) режиму генерации при произвольных значениях времени задержки возможно заметное изменение степени взаимной когерентности интерферирующих волн, что приводит к соответствующим изменениям уровня сигнала биений в интерферометре. Исследования статистических характеристик сигналов биений на выходе интерферометра Маха–Цендера дают полезную информацию о характере и динамике изменений спектра излучения полупроводникового лазера и происходящих в нем физических процессах.

## Эксперимент

Принципиальная схема волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера, предназначенного для исследования когерентных (спектральных) характеристик одночастотных полупроводниковых лазеров, показана на рис. 2.

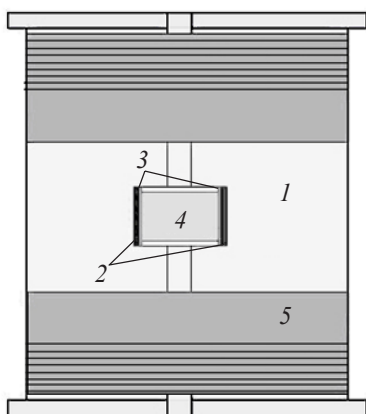
Соединительные устройства интерферометра выполнены на основе одномодового оптического волокна. В линии задержки также использовалось



**Рис. 2.** Принципиальная схема измерительного стенда. 1 – РБЗ-лазер, 2 – разъемные соединители (коннекторы FC-125-SM), 3, 6 – волоконно-оптические разветвители, 4 – фазовый оптический модулятор, 5 – генератор сигналов, 7 – оптическая линия задержки, 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.

одномодовое ( $\lambda = 1,33$  мкм) оптоволокно с потерями 0,3–0,5 дБ/км, обеспечивающее разности хода  $\Delta = (l_1 - l_2)$ , где  $l_1$  и  $l_2$  – полные длины оптоволокна, которые в первом и втором плечах интерферометра составляют 2–10320 м, средний показатель преломления сердцевины оптоволокна  $n \approx 1,45$ . Интерферометр смонтирован на массивном амортизированном оптическом столе. 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 полого цилиндра из дюралюминия диаметром 63 мм и высотой 34 мм, на который уложено 16 м одномодового волокна, при этом  $l_2 \approx 18$  м (рис. 3). В разрезе стенки цилиндра установлен пьезокерамический ультразвуковой преобразователь, подключенный к генератору синусоидального сигнала на частоте  $f$  в диапазоне 1–100 кГц.

Радиальные акустические колебания цилиндра сопровождаются упругими деформациями катушки оптоволокна, вследствие эффекта фотоупругости обеспечивающими двулучепреломление в волокне и фазовую модуляцию света в интерферометре [11]. Модулятор работал в режиме минимальных значений управляющих напряжений, при которых глубина модуляции много меньше одного радиана. Паразитная амплитудная модуляция при прямом подключении модулятора к фотоприемнику не наблюдалась. ИК излучение на выходе обоих плеч интерферометра в значительной степени линейно поляризовано. Сравнительно высокая поляризация излучения на выходе интерферометра связана с различием оптических потерь в многовитковых катуш-



**Рис. 3.** Схема волоконно-оптического фазового модулятора. 1 – цилиндр, 2 – изоляторы (слюда), 3 – электроды, 4 – пьезокерамика, 5 – оптоволоконная катушка.

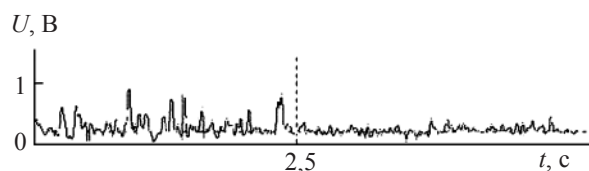
ках одномодового оптоволокна для волноводных мод, поляризованных в плоскости витков катушки и перпендикулярных к ней. Исследовались когерентные свойства излучения промышленных одночастотных передающих оптоэлектронных модулей производства ООО “НОЛАТЕХ” типа ПОМ-РБЗ (1,32 мкм) и ПОМ-14-1 РБЗ (1,55 мкм) с выходной мощностью 1,5–2,0 мВт. Когерентные характеристики излучения этих модулей оказались весьма близки друг к другу.

Отметим, что при увеличении разности хода с 5810 до 10320 м, максимальная амплитуда сигнала уменьшилась примерно на 30%. Амплитуда сигнала биений заметно флуктуировала, и уровень флуктуаций возрастал при изменениях тока накачки  $I_n$  и тока холодильника  $I_x$  лазера, а также при случайных механических деформациях волоконного контура интерферометра. Настройкой значений токов  $I_n$  и  $I_x$  достигался сравнительно стабильный режим сигнала биений, при этом оптимальные значения этих токов не всегда соответствовали рекомендованным производителем. На рис. 5 показана типичная временная зависимость амплитуды выходного сигнала биений при включенном и выключенном АОМ. Левая часть осциллограммы на рис. 4 характеризует неустойчивость спектра частот генерации исследуемого лазера. Правая часть осциллограммы показывает влияние флуктуаций постоянной разности фаз  $\delta$  (см. (1)), вызванных случайными температурными и механическими возмущениями в контуре интерферометра.

Сравнительную оценку степени взаимной когерентности световых волн на выходе интерферометра при различных значениях оптической разности хода и управляющих токах лазера удобно выполнить посредством коэффициента  $\Gamma$ , равного отношению максимального значения величины  $S_{\max}$  регистрируемого сигнала биений к среднему геометрическому мощностей  $P_1$  и  $P_2$  интерферирующих волн,

$$\Gamma = S_{\max} / \sqrt{P_1 P_2}. \quad (5)$$

При постоянных значениях коэффициента  $A$  чувствительности фотоприемника (1) и усиления элект-



**Рис. 4.** Левая часть осциллограммы – временная зависимость амплитуды сигнала биений, частота модуляции 6 кГц, правая часть – выходной сигнал при отключенном АОМ. Источник – ПОМ-РБЗ (1,32 мкм).

ронного усилителя, применяемых при регистрации сигнала биений, выполняется пропорциональность коэффициента  $\Gamma$  и степени взаимной когерентности

$$\Gamma \propto |\gamma_{12}(\tau)|. \quad (6)$$

Типичные экспериментальные значения коэффициента  $\Gamma$ , измеренные при разных режимах питания лазера типа ПОМ-РБЗ (1,32 мкм) и различных значениях разности хода  $\Delta$  приведены в таблице. Из нее видно, что даже при больших различиях мощностей интерферирующих сигналов коэффициенты  $\Gamma$  для минимальных и максимальных значений разности хода отличаются незначительно.

### Обсуждение результатов

То обстоятельство, что интенсивный сигнал биений на выходе интерферометра уверенно регистрировался при значении  $\Delta$  свыше 10 км, подтверждает, что промышленные образцы лазеров с ВРБ даже в условиях работы при комнатной температуре генерируют высококогерентное ИК излучение с шириной спектральных линий менее 20 кГц (по порядку величины  $\Delta\nu \approx c/\Delta$ ). Вместе с тем, наблюдаемая нестабильность амплитуды сигнала биений показывает, что мгновенный, в масштабе времени порядка нескольких секунд, спектр исследованных полупроводниковых источников света не является строго квазимонохроматическим. При больших (несколько км) разностях хода в интерферометре средняя временная задержка интерферирующих сигналов флуктуирует вследствие колебаний температуры оптоволокна и упругих напряжений, вызванных случайными механическими деформациями волокна [12]. В результате случайных сдвигов положения рабочей точки интерферометра (рис. 1) значение коэффициента  $\gamma_{12}$ , а следовательно, и амплитуда сигнала биений также флуктуирует. Другими возможными причинами флуктуаций амплитуды сигнала биений являются изменения состояния поляризации излучения в протяженном оптоволокне и изменения

режимов генерации лазера, вызванные обратным рассеянием излучения в интерферометре [4]. Значения коэффициента  $\Gamma$  примерно одинаковы при сравнительно малых (30–60 м) и при больших (свыше 10 км) разностях хода в интерферометре, что указывает на то, что спектр лазера не является строго монохроматическим и, скорее всего, содержит две или более нестабильных по амплитуде и частоте узкополосных линии генерации. Это подтверждает осциллограмма на рис. 4. На ней флуктуации сигнала биений при отключенном АОМ, обусловленные случайными изменениями фазы  $\delta$  (1), существенно меньше, чем в рабочем состоянии интерферометра. Разнос  $F$  спектральных несущих может составлять от сотен кГц до десятка МГц, при этом  $F \sim c/L$ , где  $L$  – период изменения функции когерентности (4) в единицах длины.

Обращает на себя внимание повышенное значение коэффициента  $\Gamma$ , достигаемое при разности хода около 5,8 км и определенных значениях токов накачки и холодильника. Возможной причиной такого увеличения степени взаимной когерентности интерферирующих волн могут быть нелинейные явления в оптической линии задержки, в том числе вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, влияние которого особенно сильно при сверхмалых ширинах спектра возбуждающего излучения и при больших длинах взаимодействия излучения со средой. Эти процессы достаточно сложны и должны явиться предметом самостоятельных исследований.

Измерения статистических характеристик случайных сигналов биений на выходе волоконного интерферометра Маха–Цендера, используемого в анализе когерентных свойств шумов лазерных излучателей, позволяют более точно установить характер шумов и особенности динамики спектра таких лазеров, а также сформулировать практические рекомендации по их дальнейшему усовершенствованию.

### Выводы

Сканирующий волоконно-оптический интерферометр Маха–Цендера с разностью хода до 10,3 км использован для исследования когерентных характеристик промышленных одночастотных лазеров с волоконной решеткой Брэгга диапазонов 1,32 и 1,55 мкм. Спектр и флуктуации регистрируемых сигналов биений показывают, что кратковременная, длительностью несколько единиц – десятков секунд, ширина спектра этих лазеров может составлять менее 20 кГц, при этом такие излучатели, по-видимому, не являются строго одночастотными и генери-

Значения коэффициента  $\Gamma$  для различных оптических разностей хода

$\Delta$ , м	$\Gamma \times 10^{-3}$ , В/мкВт
2	0,62
22	0,58
42	0,78
5810	1,62
5810	0,78
10320	0,65

руют на нескольких – двух или более – близко расположенных спектральных линиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К.* Волоконно-оптические датчики. Пер. с япон. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
2. *Шереметьев А.Г.* Когерентная волоконно-оптическая связь. М.: Радио и связь, 1991. 192 с.
3. *Дмитриев А.Л., Чжан Яньшенъ, Ма Ксиню.* Волоконно-оптический кольцевой пассивный резонатор в маломодовом режиме распространения излучения // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 3. С. 19–23.
4. Физика полупроводниковых лазеров / Под ред. Х. Такумы. М.: Мир, 1989. 310 с.
5. *Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П., Сумароков М.А., Климов К.И.* Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530–1560 нм // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 6. С. 529–530.
6. *Wyatt R., Devlin W.J.* 10-kHz Linewidth 1–5/ $\mu\text{m}$  InGaAsP External Cavity Laser with 55 nm Tuning Range // Electron. Lett. 1983. V. 19. № 2. P. 110–112.
7. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
8. *Демтредер В.* Лазерная спектроскопия. Пер. с англ. М.: Наука, 1985. 608 с.
9. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 161 с.
10. *Евтихеев Н.Н., Евтихеева О.А., Компанец И. Н., Краснов А.Е., Кульчин Ю.Н., Одинокоев С.Б., Ринкевичус Б.С.* Информационная оптика. М.: Изд. МЭИ, 2000. 612 с.
11. *Гуляев Ю.В., Меш М.Я., Проклов В.В.* Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. М.: Радио и связь, 1991. 152 с.
12. *Карначева Т.А., Дмитриев А.Л.* Влияние температуры на поляризационные свойства однородных и двулучепреломляющих волоконных световодов // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 11. С. 73–76.