

## СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

© 2009 г. А. А. Ветров, канд. техн. наук; Д. А. Данилов; С. С. Есипов; С. С. Комиссаров;  
А. Н. Сергушичев, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,  
Санкт-Петербург

E-mail: <a\_vetrov@mail.ru>

Приводятся результаты исследования спектральных характеристик серийных полупроводниковых лазеров с использованием оптического анализатора спектра и блока питания и управления для лазера. Получены семейства спектральных характеристик в широком диапазоне токов инжекции и температур. Определены температурные и токовые коэффициенты для длины волны излучения лазеров.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, управление длиной волны.

Коды OCIS: 140.5960, 140.3490, 140.3600

*Поступила в редакцию 31.03.2009*

### Введение

В последнее время волоконно-оптические датчики (ВОД) различных физических величин (сдвига, давления, вибраций, температуры и др.) составляют все более серьезную конкуренцию другим типам датчиков. Их успешному развитию в немалой степени способствует повсеместное внедрение оптоволоконных систем телекоммуникаций – от магистральных цифровых высокоскоростных систем дальней связи до локальных (внутриофисных) аналоговых систем передачи информации – и непосредственно связанное с ним расширение номенклатуры оптоэлектронных компонентов.

Ключевым элементом любой волоконно-оптической системы передачи информации или ВОД является оптический (чаще всего лазерный) источник излучения. Именно от стабильности его спектральных характеристик и возможности их изменения заданным образом в ряде случаев напрямую зависит эффективность функционирования всей системы.

Специализированные лазеры с перестраиваемой длиной волны излучения пока не доступны на массовом рынке и имеют высокую стоимость, препятствующую их применению в ВОД. Наряду с этим существуют серийно выпускаемые полупроводниковые лазеры для систем телекоммуникаций со встроенным микрохолодильником

Пельтье, в которых за счет поддержания постоянной температуры обеспечивается стабилизация длины волны излучения. Известно также, что кроме изменения рабочей температуры, к изменению длины волны излучения полупроводникового лазера приводит и изменение его тока инжекции [1]. Управляя этими параметрами, можно управлять и длиной волны, что может быть необходимо, например, для стабилизации рабочей точки ВОД интерференционного типа. Однако для практического использования этих эффектов в конкретных измерительных схемах волоконно-оптических датчиков необходим количественный экспериментальный анализ влияния температуры и тока инжекции (независимо друг от друга) на мощность и спектр излучения полупроводниковых лазеров, что и является целью данной работы.

### 1. Сведения об исследуемых лазерах

В качестве объектов исследования были выбраны серийные лазерные модули, которые выпускаются для оптоволоконных систем связи, однако по техническим характеристикам могут быть использованы для создания ВОД. Все исследованные в данной работе лазеры имеют одинаковые корпуса DIL14 с встроенными терморезистором, элементом Пельтье и фотодиодом. Вывод оптической мощности осуществляется

**Таблица 1.** Сведения об исследуемых лазерах

Тип лазера	Фирма-производитель	Тип резонатора	Количество экземпляров
LFD-18/2i	“ФТИ-Оптроник”, СПб.	DFB	2
LDI H-DFB-1550-10P	ИИТ, Минск	DFB	3
ПОМ-23	“Нолатех”, Москва	DBR	1
LFO-14/4i	“ФТИ-Оптроник”, СПб.	FP	1
ПОМ-18/1	“Нолатех”, Москва	FP	1

через одномодовое оптическое волокно в буфере, оконцованное коннектором FC. Краткие сведения об исследуемых лазерах приводятся в табл. 1.

Для исследований специально выбирались полупроводниковые гетеролазеры на основе InGaAsP материалов, работающие на длине волны 1,55 мкм и наиболее отличающиеся друг от друга как типом оптического резонатора (FP – резонатор Фабри–Перо, DFB – с распределенной обратной связью, DBR – с брэгговской решеткой на выходном оптическом волокне), так и фирмой-производителем.

## 2. Описание экспериментальной установки

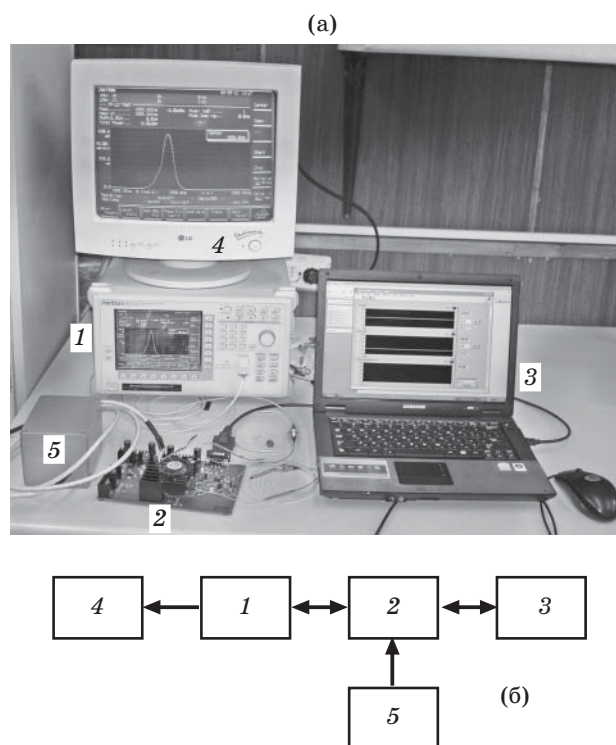
Экспериментальные исследования проводились на лабораторном измерительном стенде, внешний вид и блок-схема которого приведены на рис. 1.

Основным функциональным элементом стенда является специально разработанный электронный блок управления, позволяющий с помощью микроконтроллера задавать и поддерживать как температуру, так и ток лазерного диода.

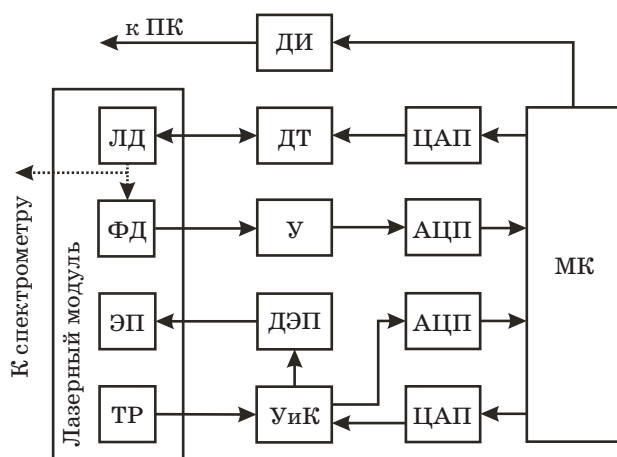
Структурная схема блока управления приведена на рис. 2. Лазерный диод (ЛД) питается от драйвера тока, который через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) управляется микроконтроллером (МК). Внутри лазерного модуля (корпус DIL 14) одна часть оптического сигнала с ЛД поступает на фотодиод (ФД), а другая часть выводится через оптоволокно, которое соединено со спектроанализатором. Аналоговый сигнал с ФД усиливается, преобразуется в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и поступает на микроконтроллер.

Стабилизация температуры осуществляется благодаря использованию терморезистора (ТР) и элемента Пельтье (ЭП). Температура задается цифровым сигналом (с микроконтроллера), который преобразуется в аналоговый сигнал посредством ЦАП и поступает на вход компа-

ратора. Сигнал с терморезистора усиливается и также поступает на компаратор и на АЦП, откуда подается на микроконтроллер. Компаратор сравнивает сигналы, поступающие с терморезистора и ЦАП; если они отличаются между собой, то компаратор подает сигнал на драйвер элемента Пельтье, представляющий собой управляемый стабилизированный источник тока. В зависимости от поступившего сигнала элемент Пельтье дополнительно нагревает или охлаждает лазерный диод, а вместе с ним и терморезистор. Когда температура на терморезисторе достигнет значения, заданного МК, сигналы с ЦАП и терморезистора сравниваются и процесс останавли-



**Рис. 1.** Лабораторный измерительный стенд. а – внешний вид, б – блок-схема. 1 – оптический спектроанализатор, 2 – блок управления с установленным лазером, 3 – персональный компьютер, 4 – дополнительный дисплей, 5 – блок питания.



**Рис. 2.** Структурная схема блока управления. ДИ – драйвер интерфейса, ДТ – драйвер тока, У – усилитель, ДЭП – драйвер элемента Пельтье, УиК – усилитель и компаратор, МК – микроконтроллер, ЛД – лазерный диод, ФД – фотодиод, ЭП – элемент Пельтье, ТР – терморезистор, ПК – персональный компьютер, АЦП и ЦАП – аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи соответственно.

вается. В результате достигается стабилизация температуры. Благодаря предварительно проведенной калибровке терморезистора на специально разработанном лабораторном измерительном стенде, погрешность установки и стабилизации температуры на лазерном излучателе не превышала 0,1 град.

Посредством драйвера интерфейса, который преобразует уровни сигналов, микроконтроллер соединяется с компьютером. Особенностью данной системы является то, что стабилизированное значение тока и температуры может несколько отличаться от задаваемого с персонального компьютера (ПК). Поэтому на микроконтроллер поступают текущие значения температуры и тока, протекающего через лазерный диод. При измерениях в протокол наблюдений записываются именно эти значения.

Питание схемы осуществляется от сетевого блока питания, смонтированного в отдельном корпусе.

Контроль блока управления, а также считывание данных о токе и температуре, проводились с помощью компьютера и специальной программы, созданной в среде LabVIEW. Отображение текущих и заданных значений тока и температуры в графической и цифровой формах осуществлялось на экране ПК в виде виртуального прибора.

Исследование спектра и мощности излучения полупроводниковых лазеров проводилось с применением оптического анализатора спектра

Anritsu MS9710C, работающего в диапазоне длин волн от 600 до 1750 нм с максимальным разрешением 0,07 нм. Стабильность измерения длины волны составляет  $\pm 5$  пм. В области длин волн около 1550 нм может быть получено разрешение до 0,05 нм. Диапазон измерений оптической мощности находится в области от  $-90$  дБм до  $+10$  дБм, использование аттенюатора позволяет достичь значения  $+23$  дБм. Оптический анализатор спектра позволяет осуществлять поиск характерных максимумов на спектре и измерять длину волны и оптическую мощность пиков. Ввод оптического излучения осуществляется через волоконно-оптический кабель.

### 3. Экспериментальные результаты

В результате исследования для каждого из лазерных диодов, приведенных в табл. 1, получены два вида зависимостей – зависимости спектра излучения от тока инжекции при заданной температуре и зависимости спектра излучения от температуры при различных значениях тока инжекции. Всего было исследовано от 1 до 3 лазеров каждого типа, и установлена хорошая повторяемость результатов. Для лазеров LFD и LFO диапазон изменения температуры составлял от  $-10$  °C до  $+50$  °C и тока – от 5 до 35 мА, а для лазеров LDI и ПОМ диапазон изменения температуры составлял от 0 °C до  $+50$  °C и тока – от 5 до 50 мА.

#### 3.1. Зависимость длины волны одночастотных лазеров от тока инжекции и температуры

Наиболее интересные и важные с практической точки зрения результаты были получены для одночастотных лазеров с распределенной обратной связью (DFB-лазеров). DFB-лазеры производства Института информационных технологий (ИИТ) (г. Минск) имеют маркировку LDI, а производства фирмы “ФТИ-Оптроник” – маркировку LFD. Это одночастотные лазеры с единственной спектральной линией излучения в рабочем диапазоне токов инжекции. Наиболее характерный пример зависимостей положения максимума в спектре их излучения (в дальнейшем для простоты будем называть его “длина волны”) от температуры  $\lambda(T)$  и тока инжекции  $\lambda(I)$  для одного из исследованных образцов лазера LDI H-DFB-1550-10P приведен на рис. 3.

Как видно из графиков, эти зависимости характеризуются высокой степенью линейности и могут быть описаны линейными уравнениями.

Зависимость длины волны излучения от тока инжекции при постоянной температуре можно представить уравнением вида

$$\lambda(I, T) = \alpha(I, T)I + b, \quad (1)$$

где  $\alpha(I, T)$  – токовый линейный коэффициент, в общем случае зависящий от тока и температуры;  $b$  – коэффициент, имеющий размерность длины волны, который математически должен быть численно равен длине волны лазера при нулевом токе инжекции. Однако, учитывая, что при нулевом токе инжекции лазерная генерация отсутствует, этот коэффициент физического смысла не имеет и в дальнейшем учитываться не будет.

В результате исследований было экспериментально установлено, что коэффициент  $\alpha(I, T)$  не

зависит от тока, однако незначительно увеличивается с ростом температуры. В предположении, что эта зависимость  $\alpha(T)$  носит линейный характер, представим ее в виде

$$\alpha(T) = \gamma T + \alpha(0), \quad (2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий температурную зависимость токового коэффициента длины волны и имеющий размерность  $[\text{нм } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ мА}^{-1}]$ ;  $\alpha(0)$  – токовый коэффициент длины волны при  $T = 0^\circ\text{C}$ .

Тогда, с учетом сделанных замечаний, зависимость длины волны излучения от тока инжекции при постоянной температуре можно представить уравнением вида

$$\lambda(I, T) = \gamma TI + \alpha(0)I. \quad (3)$$

В табл. 2 приводятся значения токовых коэффициентов  $\gamma$  и  $\alpha(0)$  для различных типов лазеров, а также средние значения коэффициента  $\alpha$ , рассчитанного для  $T = 25^\circ\text{C}$  с учетом соотношения (3).

Из приведенных данных видно, что коэффициент  $\gamma$  очень мал: при изменении температуры в пределах  $100^\circ\text{C}$  коэффициент  $\alpha$  меняется примерно на  $0,001 \text{ нм/мА}$ . Погрешность такого порядка при изменении значения тока на  $100 \text{ мА}$  даст погрешность в оценке длины волны в  $0,1 \text{ нм}$ , поэтому в практических расчетах коэффициентом  $\gamma$  можно пренебречь и считать  $\alpha(T) = \text{const}$ .

Анализ полученных данных показывает, что в целом характер зависимости  $\lambda(I, T)$  у всех исследованных лазеров идентичный и токовый коэффициент  $\alpha$  длины волны излучения находится в диапазоне  $0,006\text{--}0,007 \text{ нм/мА}$  для обоих типов DFB-лазеров. В работе [1] приводится значение коэффициента  $\alpha = 0,008 \text{ нм/мА}$  для лазера на основе InGaAsP, что хорошо согласуется с результатами эксперимента данной работы. Однако следует отметить, что значение  $\alpha$ , полученное для лазера LFD-8/2i (1), заметно отличается от результатов эксперимента с другими лазерами. Вероятно, это отличие связано с индивидуальной

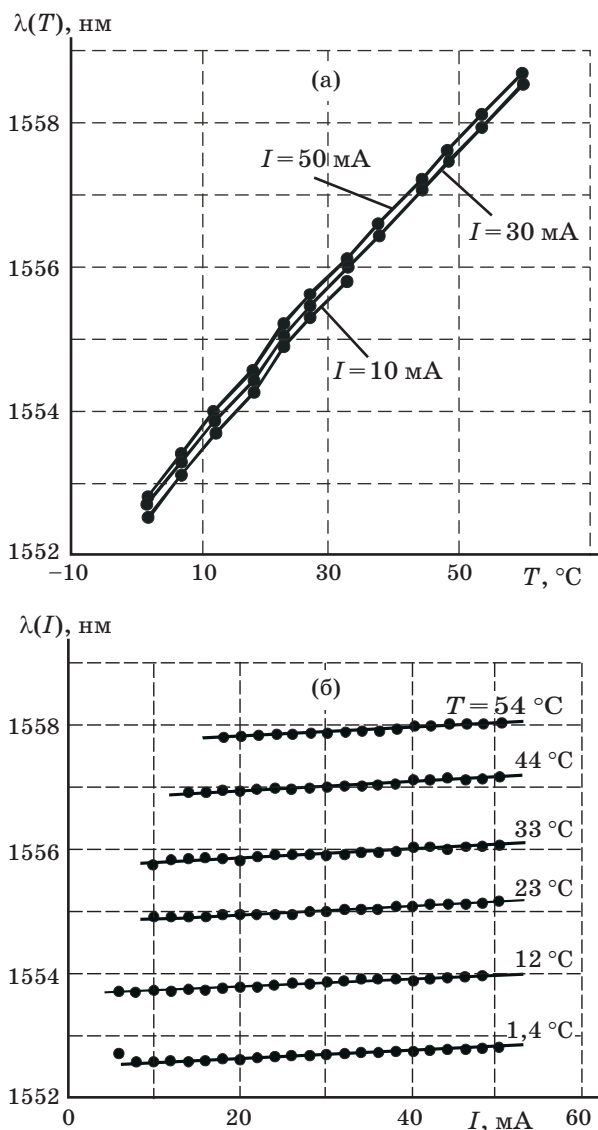


Рис. 3. Типовые зависимости длины волны  $\lambda$  DFB-лазера от температуры  $T$  (а) и тока инжекции  $I$  (б).

Таблица 2. Токовые коэффициенты длины волны излучения DFB-лазеров

Лазер	$\gamma \times 10^{-5},$ $\text{нм } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ мА}^{-1}$	$\alpha(0), \text{ нм/мА}$	$\alpha, \text{ нм/мА}$
LFD-18-2i (1)	0,1	0,019	0,019
LFD-18-2i (2)	3	0,0066	0,007
LDI-6578	2	0,0056	0,006
LDI-6579	1	0,0063	0,007
LDI-6580	1	0,0067	0,007



особенностью прибора и обусловлено тем, что лазеры марки LDI H-DFB-1550-10P, исследованные в данной работе, были взяты из одной партии, тогда как LFD-18/2i (1) и (2) были произведены в разное время.

Температурная зависимость длины волны одночастотных лазеров (рис. 3) в целом имеет квазилинейный характер и может быть описана уравнением

$$\lambda(T) = \beta(T)T + \lambda_0, \quad (4)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент зависимости длины волны от температуры,  $\lambda_0$  – некоторое номинальное (паспортное) значение длины волны излучения.

Однако, как видно из рис. 3, температурный коэффициент длины волны  $\beta$  не является постоянной величиной и незначительно уменьшается с ростом температуры. Для оценочных расчетов можно воспользоваться линейной аппроксимацией этой зависимости

$$\beta(T) = \chi T + \beta(0), \quad (5)$$

где  $\chi$  – коэффициент нелинейности, имеющий размерность  $\text{нм}/^\circ\text{C}^2$ ;  $\beta(0)$  – значение коэффициента  $\beta$  при  $T = 0^\circ\text{C}$ .

Таким образом, зависимость длины волны излучения лазерного модуля от температуры носит квадратичный характер

$$\lambda(T) = \chi T^2 + \beta(0)T + \lambda_0. \quad (6)$$

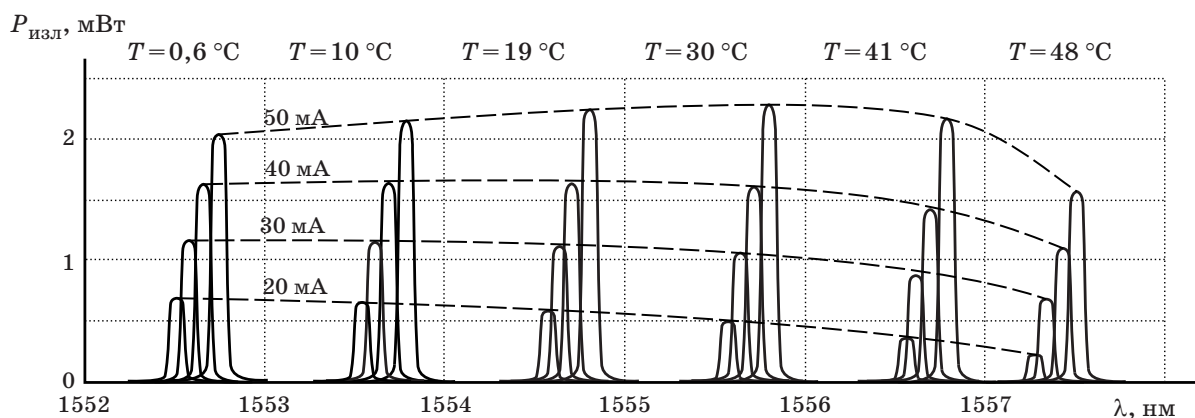
Коэффициенты  $\chi$  и  $\beta(0)$ , а также рассчитанные по ним средние значения температурного коэффициента  $\beta$  длины волны для  $T = 25^\circ\text{C}$  приводятся в табл. 3.

В целом, как видно из табл. 3, полученное значение температурного коэффициента  $\beta$  длины волны излучения одночастотных лазеров LFD и LDI находится в диапазоне  $0,092\text{--}0,104 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ , что близко к литературным данным, приведенным, например в [1]. При этом коэффициент при квадратичном члене весьма мал ( $|\chi| \leq 0,0004 \text{ нм}/^\circ\text{C}^2$ ), поэтому в некоторых случаях нелинейностью температурной зависимости длины волны излучения можно пренебречь.

Кроме зависимостей положения центрального максимума длины волны излучения лазеров от температуры и тока инжекции, также исследовались и зависимости мощности лазерного излучения от этих параметров. На рис. 4, где приведена наиболее характерная сводная спектрограмма для одночастотных лазеров LDI и LFD, хорошо виден сдвиг спектральной характеристики при изменении температуры и тока инжекции, а также то, что зависимость мощности от температуры имеет максимум. Это связано, во-первых, с тем, что при больших токах начинается генерация на неосновных модах (происходит перекачка

**Таблица 3.** Температурные коэффициенты длины волны излучения DFB-лазеров

Лазер	$\chi$ , $\text{нм}/^\circ\text{C}^2$	$\beta(0)$ , $\text{нм}/^\circ\text{C}$	$\beta$ , $\text{нм}/^\circ\text{C}$
LFD-18-2i (1)	–0,0002	0,1018	0,0968
LFD-18-2i (2)	–0,0002	0,0985	0,0935
LDI-6578	–0,0003	0,1112	0,1037
LDI-6579	–0,0004	0,1024	0,0924
LDI-6580	–0,0003	0,1056	0,0981



**Рис. 4.** Зависимость мощности  $P_{\text{изл}}$  и длины волны  $\lambda$  излучения DFB-лазера от температуры  $T$  и тока инжекции  $I$  (сводная спектрограмма).

энергии из основной моды в моды других порядков). Другая причина заключается в том, что регистрируемая спектральная характеристика является суперпозицией спектральной характеристики излучения лазера и его резонатора. В лазерах типа LDI и LFD в качестве резонатора используется брэгговская решетка, нанесенная на поверхность кристалла (DFB-лазер). При изменении температуры происходит изменение спектральной характеристики как излучения активной области, так и самого резонатора (за счет изменения его геометрических размеров в связи с температурным расширением кристалла); в результате этого спектральные максимумы решетки и излучения могут расходиться, что приводит к ослаблению мощности выходного излучения.

### 3.2. Температурная и токовая зависимости спектральных характеристик лазерного диода с брэгговской решеткой на оптическом волокне

В лазерах ПОМ-23 брэгговская решетка нанесена не на поверхность кристалла, а на само оптоволокно, поэтому при изменении температуры рабочей области спектр решетки практически не изменяется. При малых токах лазер излучает в широком диапазоне частот и поэтому на спектрограмме видно большое количество максимумов и минимумов, отражающих спектральную структуру решетки. С ростом тока растет общая мощность излучения и выделяется пик, на максимуме длины которого будет происходить генерация лазерного излучения.

С увеличением тока мощность излучения растет и пик несколько сдвигается в область более длинных волн, однако по достижению определенного значения тока инжекции начинает преобладать излучение на других (более коротковолновых) модах. Известно, что температура в гораздо большей степени влияет на длину волны излучения, поэтому при изменении температуры такие переходы будут происходить чаще. На рис. 5 приводится график зависимости длины волны спектрального максимума излучения от температуры.

Как видно, длина волны лазерного диода ПОМ-23 (DBR) с брэгговской решеткой на оптическом волокне мало зависит от температуры и носит квазипериодический характер. При изменении температуры от  $-5$  до  $+30$  °C наблюдались квазипериодические изменения длины волны в пределах  $0,5$  нм.

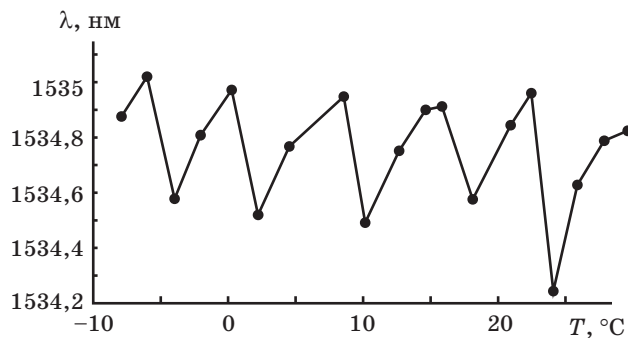


Рис. 5. Зависимость длины волны  $\lambda$  лазера ПОМ-23 от температуры  $T$ .

Из-за перечисленных выше особенностей температурный и токовый коэффициенты перестройки длины волны для этих лазеров не имеют физического смысла. Благодаря высокой стабильности частоты, DBR-лазеры могут применяться в ВОД, однако только в тех случаях, где не требуется осуществлять плавную подстройку длины волны.

### 3.3. Температурная и токовая зависимости спектральных характеристик одномодовых лазеров

Спектр лазеров с резонатором Фабри-Перо состоит из гораздо большего числа отдельных мод по сравнению с резонатором на основе брэгговской решетки. В рамках данной работы проводилось исследование двух лазеров с резонатором Фабри-Перо: LFO-14/4i и ПОМ 18/1. Они обладают схожими спектрами излучения и характерными особенностями, однако LFO-14/4i имеет длину волны  $1,3$  мкм, а ПОМ 18/1 –  $1,55$  мкм.

В результате экспериментов было обнаружено, что даже при незначительном изменении тока или температуры происходит резкое изменение энергии отдельных мод в спектральной характеристике (рис. 6), однако изменение длин волн каждой моды в отдельности в зависимости от температуры и тока подчиняется общей закономерности, выявленной на DFB-лазерах. В связи с этим имеет смысл говорить о токовом или температурном коэффициентах только для какой-то одной выделенной моды.

На рис. 7 приведен график зависимости длин волн отдельных мод лазера LFO-14/4i от тока инжекции. Усредненное значение токового коэффициента для LFO-14/4i составляет  $0,007$  нм/мА, а для ПОМ 18/1 –  $0,008$  нм/мА, что близко значениям, полученным при исследовании DFB-лазеров.

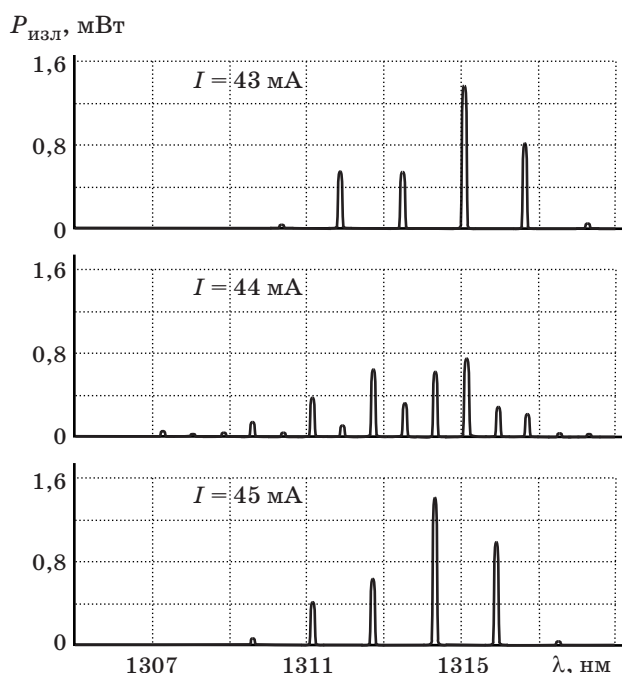


Рис. 6. Перераспределение спектральных составляющих ГР-лазера (LFO-14/4i) в зависимости от небольших вариаций тока инжекции  $I$ .

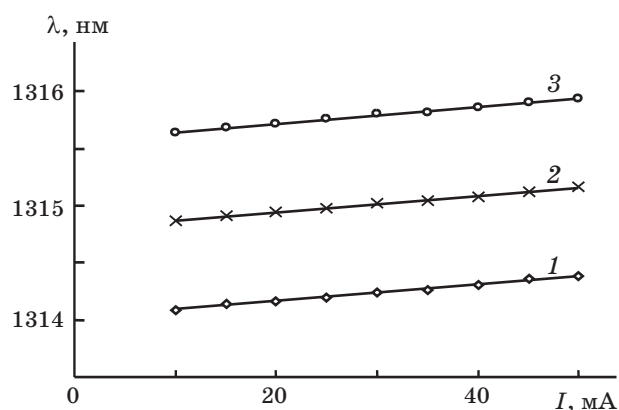


Рис. 7. Зависимость длины волны различных мод лазера LFO-14/4i от тока инжекции  $I$ . 1 – мода № 1, 2 – № 2, 3 – № 3.

### Заключение

Экспериментальные исследования показали, что для управления длиной волны излучения наиболее пригодны DFB-лазеры, причем перестройка длины волны может осуществляться как током инжекции, так и температурой излучателя.

При управлении током лазерного диода коэффициент, характеризующий перестройку его длины волны в области  $\lambda = 1550$  нм, составляет

$\alpha \approx 0,007$  нм/мА. Следовательно, при изменении тока инжекции в практически используемом диапазоне  $\Delta I = 40$  мА смещение длины волны составит  $\Delta \lambda \approx 0,28$  нм. Достоинством такого способа управления является быстродействие, а недостатками – малый диапазон перестройки и зависимость мощности излучения от длины волны (см. рис. 3).

При управлении температурой лазерного диода коэффициент, характеризующий перестройку его длины волны в области  $\lambda = 1550$  нм, составляет  $\beta \approx 0,1$  нм/°С, и, следовательно, при изменении температуры в диапазоне  $\Delta T = 40$  °С смещение длины волны  $\Delta \lambda \approx 4$  нм. Таким образом, диапазон перестройки длины волны лазерного диода за счет изменения температуры может более чем на порядок превышать диапазон перестройки длины волны за счет изменения тока инжекции. Кроме того, мощность излучения при этом меняется незначительно (см. рис. 4). Недостатками такого способа управления являются большая энергоемкость и малое быстродействие. Таким образом, исследованные одночастотные лазеры LFD и LDI, благодаря возможности перестройки длины волны излучения, могут быть использованы в ВОД на основе торцевого интерферометра [2], позволяя создать систему со стабилизацией положения рабочей точки интерферометра [3] при изменяющихся внешних паразитных воздействиях. Анализ полученных температурных и токовых коэффициентов длины волны излучения позволяет сделать вывод, что диапазона температурной перестройки длины волны излучения вполне достаточно для поддержания рабочей точки интерферометра в оптимальном положении при изменении внешних паразитных воздействий в широком диапазоне. В то же время выявленная слабая зависимость длины волны излучения DFB-лазеров от тока инжекции не позволяет в полной мере решить эту задачу.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики // Под ред. Т. Окоси. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
2. Ветров А.А., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н. Волоконно-оптический торцевой интерферометр – универсальный элемент построения датчиков смещения // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 1. С. 3–6.
3. Ветров А.А., Комиссаров С.С., Лучинин В.В., Сергушичев А.Н. Волоконно-оптическая сенсорная система // Патент РФ № 2279112. 2006.