

# ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 681.7.068

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК СО СПИРАЛЬНЫМ ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ

© 2010 г. А. И. Сидоров\*, доктор физ.-мат. наук; А. А. Цирухин\*\*

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

\*\* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Санкт-Петербург

E-mail: aisidorov@newmail.ru

Представлены спектральные характеристики длиннопериодных волоконных решеток с сердечником из кварцевого волокна и оболочкой в виде спирали из полимера. Показано, что волоконные решетки этого типа обладают резонансными свойствами в спектральном интервале 1530–1560 нм. Проведено исследование влияния температуры на спектральный сдвиг резонансных полос.

*Ключевые слова:* длиннопериодная волоконная решетка, спиральное волокно, полимерное покрытие.

Коды OCIS: 060.2270, 060.2290, 060.2300

Поступила в редакцию 12.11.2009

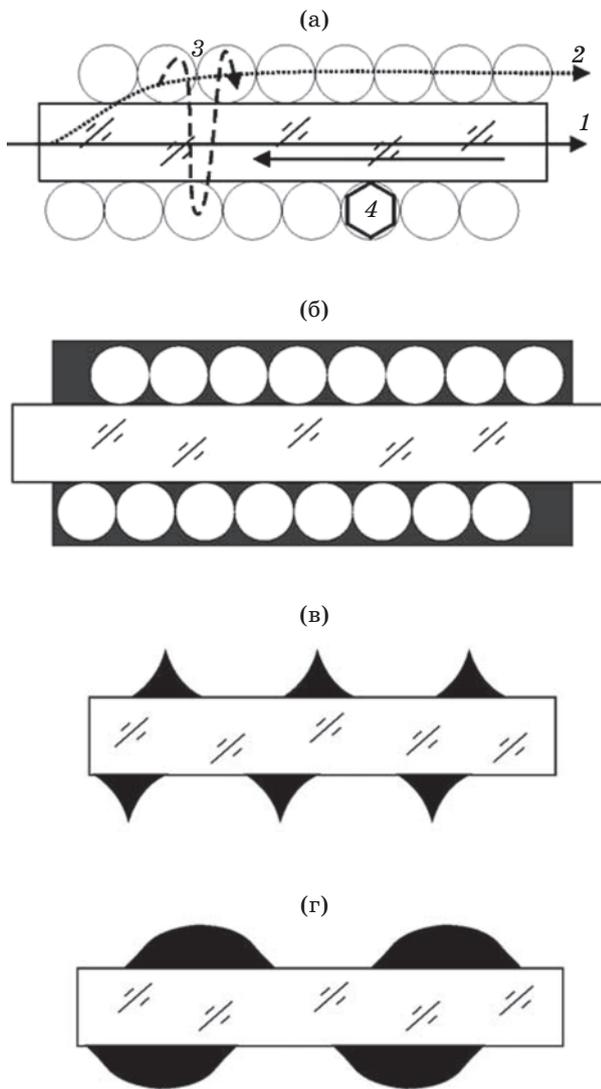
### Введение

Длиннопериодные волоконные решетки (ДВР) обладают резонансными свойствами и широко используются в фотонике в качестве волоконных фильтров и волоконных датчиков [1, 2]. Период продольной модуляции эффективного показателя преломления у ДВР, как правило, составляет 100–2000 мкм и существенно превышает длину волны оптического сигнала. Разновидностями ДВР являются решетки с наклонными штрихами и спиральные ДВР. Особенностью данных типов ДВР является, в частности, сильная связь  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  мод, что позволяет улучшить их резонансные характеристики [3–5]. ДВР с наклонными штрихами и спиральные ДВР изготавливают либо методом модификации ультрафиолетовым излучением показателя преломления волокна из фоточувствительного стекла [2], либо путем продольного скручивания стеклянного волокна, нагретого до температуры размягчения стекла [6, 7].

Целью данной работы было исследование возможности создания ДВР с полимерным покрытием в виде спирали и изучение их резонансных характеристик.

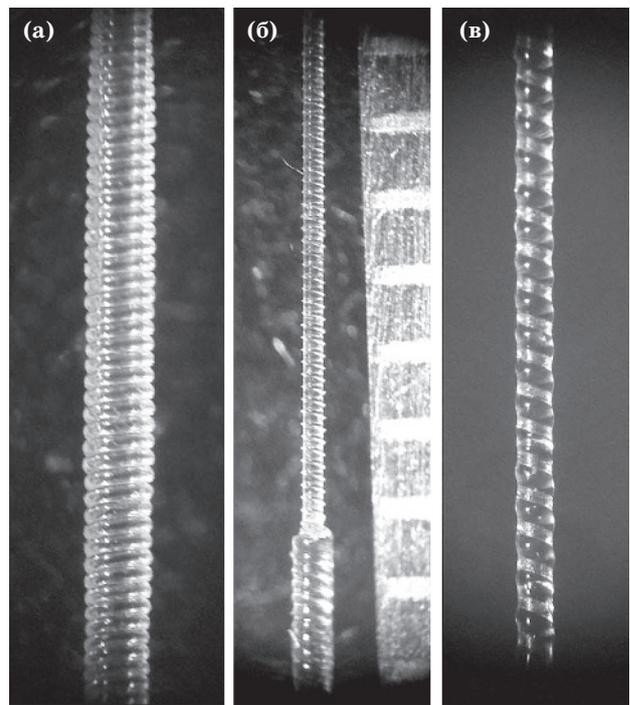
### Методика эксперимента

Для изготовления ДВР в качестве сердечника использовались многомодовые кварцевые волокна без оболочки диаметром 150–220 мкм. Длина спирального покрытия составляла 25–30 мм. Для изготовления оболочки в виде полимерной спирали использовались три метода. Первый метод заключался в намотке на сердечник спирали виток к витку из полиэтиленового волокна диаметром 60–150 мкм (рис. 1а). Фотография участка спиральной ДВР показана на рис. 2а. Для данной структуры ДВР в области контакта полимерного волокна с сердечником происходит изменение эффективного показателя преломления сердечника, благодаря чему вся структура приобретает продольную модуляцию показателя преломления в виде наклонных штрихов с периодом, равным диаметру полимерного волокна. Особенностью данной структуры является то, что кроме обычных сердечника и оболочки (1 на рис. 1), характерных для ДВР, здесь могут возникать и другие типы мод, свойства которых определяются геометрией оболочки. Так, вдоль сердечника по оболочке может распространяться волноводная мода, переходящая



**Рис. 1.** Геометрия ДВР с полимерной спиральной оболочкой. а – спираль из полимерного волокна (1 – мода сердечника, 2 – мода оболочки, 3 – мода спиральных петлевых резонаторов, 4 – мода шепчущей галереи), б – спираль из полимерного волокна с заполнением зазоров полимером, в – спираль из полимера после удаления полимерного волокна в случае полного заполнения зазоров полимером, г – спираль из полимера после удаления полимерного волокна при частичном заполнении зазоров полимером.

из одного витка в другой в месте их контакта (2 на рис. 1). Периодическая модуляция геометрии оболочки может придавать данной моде резонансные свойства. Спираль, намотанная на сердечник, представляет собой систему петлевых спиральных резонаторов с электромагнитной связью между витками [8, 9]. В такой структуре могут возникать резонансные волноводные моды, распространяющиеся непосредственно по виткам спирали (3 на рис. 1) и имеющие элект-



**Рис. 2.** Фотографии участков спиральных ДВР. а – спираль из полимерного волокна, б, в – спирали из эпоксидного компаунда. Пояснения в тексте.

ромагнитную связь в местах контакта витков. Но из-за больших потерь на светорассеяние в полимере и малого радиуса кривизны спирали такие моды будут обладать большим затуханием, а вся резонансная система будет иметь низкую добротность. В спиральной ДВР рассматриваемого типа могут возникать и моды, подобные модам шепчущей галереи [10, 11] (4 на рис. 1а). Однако такие моды, как и в предыдущем случае, будут иметь большие потери.

Согласно второму методу сердечник предварительно покрывался толстым слоем жидкого полимера, после чего проводилась намотка полимерной спирали до момента затвердевания слоя полимера. В качестве материалов для оболочки в данном случае использовались полиэтиленовое волокно и оптический эпоксидный компаунд. После затвердевания полимера на сердечнике формировалась структура, состоящая из полимерной спирали с зазорами, заполненными полимером с иным показателем преломления (рис. 1б). Достоинством такой структуры является возможность изменения в широких пределах показателей преломления спирали и наполнителя путем соответствующего подбора материалов.

Наконец, третий метод заключался в намотке полимерной спирали из волокна на слой жидкого полимера и удалении полимерной спирали после затвердевания полимерного слоя. При этом на сердечнике оставался затвердевший слой полимера в виде витков спирали, не контактирующих друг с другом. В случае полного заполнения зазоров между витками спирали из волокна жидким полимером поперечное сечение сформированной спирали имело вид треугольника с вогнутыми сторонами (рис. 1в). При неполном заполнении – имело вид сектора эллипса (рис. 1г). Фотографии таких спиральных ДВР, изготовленных из кварцевого волокна и оптического эпоксидного компаунда, показаны на рис. 2б и рис. 2в.

Спектры пропускания ДВР измерялись в телекоммуникационном диапазоне длин волн. При измерении спектров пропускания ДВР использовался перестраиваемый волоконный лазер на эрбиевом стекле (PriTel, Inc) со спектральным диапазоном перестройки 1530–1560 нм. Приемником излучения служил измеритель мощности с волоконным входом (FPM-3200, ILX LightWave). Выходной сигнал измерителя мощности регистрировался с помощью осциллографа АСК-3106 (Актаком) и выводился на персональный компьютер.

### Экспериментальные результаты

На рис. 3 показаны спектры пропускания спиральной ДВР с сердечником из кварцевого стекла диаметром 150 мкм и спиралью из полиэтиленового волокна диаметром 60 мкм. Период ДВР – 60 мкм. Полная длина спирали равна 30 мм. Из рисунка видно, что в спиральной ДВР могут возникать как “отрицательные”, так и “положительные” резонансы. Первый тип резонансов относится к резонансам мод сердечника, второй – к резонансам мод оболочки [5]. Обращает на себя внимание то, что, несмотря на большие потери на светорассеяние в полимере, спектральная ширина резонансов по полувысоте не превышает 0,3 нм. Таким образом, в многомодовых спиральных ДВР с полимерной оболочкой могут быть реализованы узкие резонансные полосы отражения и пропускания.

На рис. 4а показана спектральная зависимость коэффициента пропускания спиральной ДВР с полным заполнением зазоров спирали оптическим эпоксидным компаундом в спектральном интервале вторичного резонанса мод сердечника. Сердечник изготовлен из кварцевого стекла диаметром 220 мкм, спираль из

полиэтиленового волокна диаметром 150 мкм. Период ДВР – 150 мкм. Полная длина спирали равна 25 мм. Спектральная ширина резонанса на длине волны 1542,5 нм по полувысоте не превышает 2 нм.

На рис. 4б показана спектральная зависимость коэффициента пропускания спиральной ДВР из эпоксидного компаунда, изготовленной методом намотки и удаления полимерного волокна (см. рис. 2б). Сердечник изготовлен из кварцевого стекла диаметром 220 мкм. Поперечное сечение спирали – треугольник с двумя вогнутыми сторонами. Период ДВР – 120 мкм. Полная длина спирали равна 25 мм. Спектральная ширина резонанса на длине волны 1543,6 нм по полувысоте не превышает 2 нм.

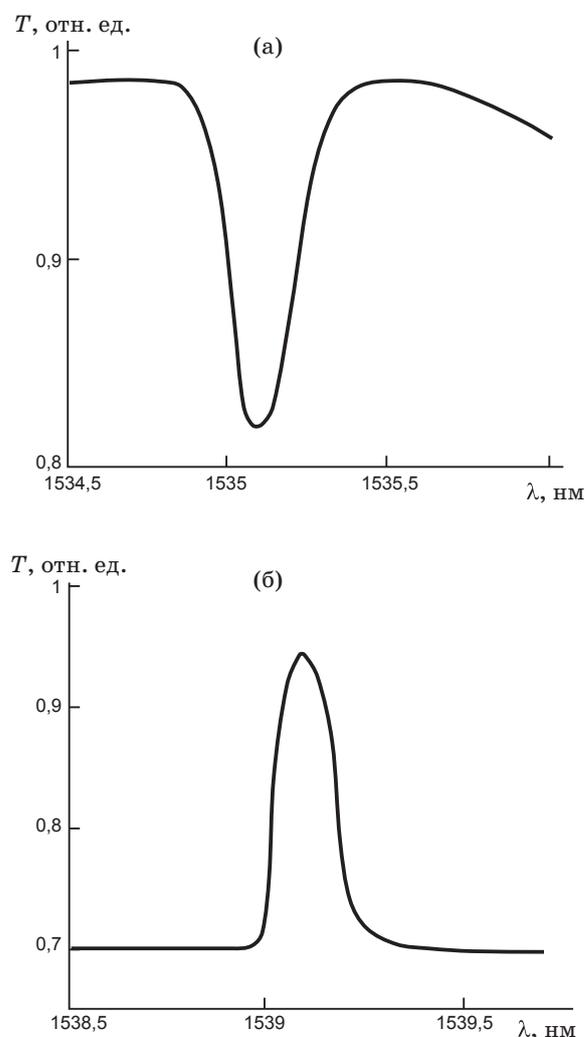
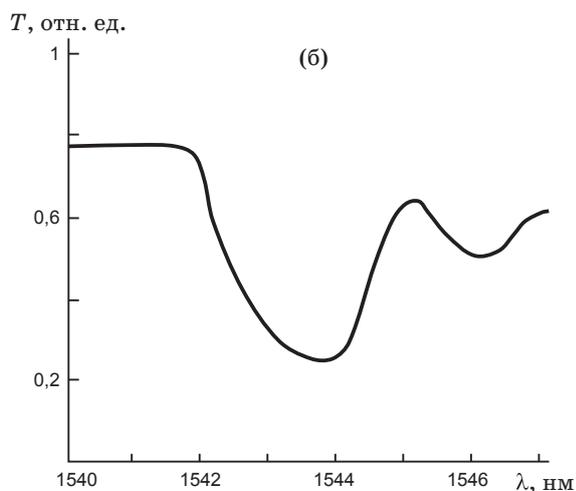
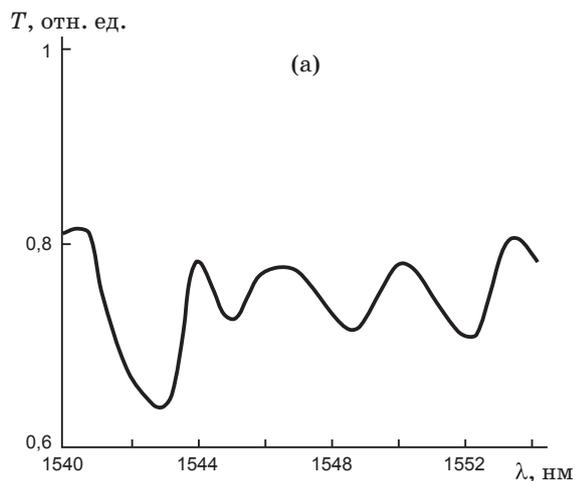


Рис. 3. Спектральные характеристики спиральной ДВР со спиралью из полиэтиленового волокна. а – резонанс моды сердечника, б – резонанс моды оболочки.

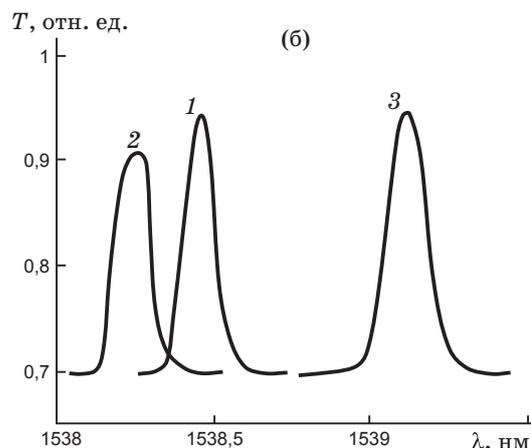
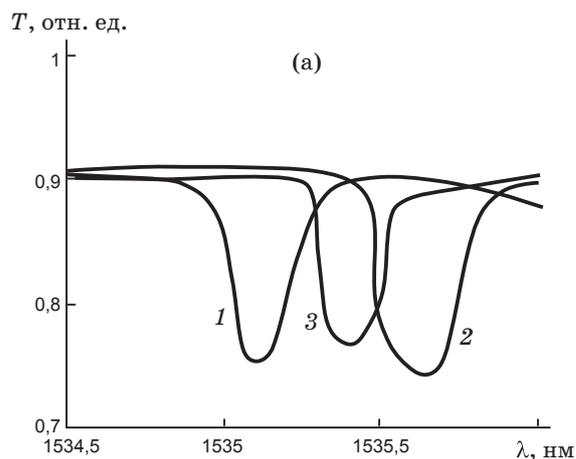


**Рис. 4.** Спектральные характеристики спиральных ДВР. а – со спиралью из полиэтиленового волокна с заполнением эпоксидным компаундом, б – со спиралью из эпоксидного компаунда.

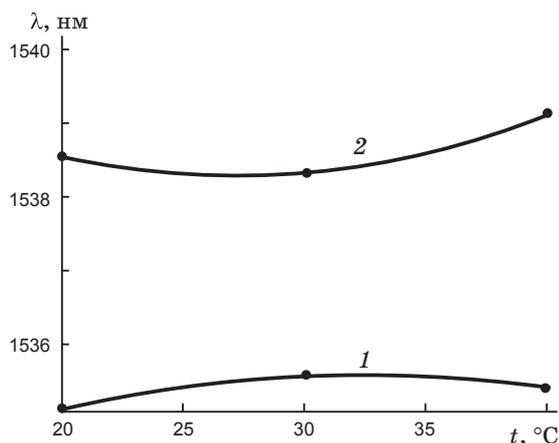
В двух последних случаях не наблюдаются “положительные” резонансы мод оболочки, а спектральная ширина резонансов мод сердечника возрастает до 2 нм. Причинами этого могут быть геометрия ДВР, высокий показатель преломления эпоксидного компаунда и наличие у него полос поглощения в спектральном интервале измерений.

Важной характеристикой ДВР является чувствительность ее оптических свойств к температуре. На рис. 5 показаны спектральные характеристики спиральной ДВР, аналогичные приведенным на рис. 3, но при разной температуре окружающей среды. Соответствующие температурные зависимости спектрального положения резонансов показаны на рис. 6. При увеличении

температуры  $t$  в интервале 20–40 °С происходит спектральный сдвиг резонансов мод сердечника в сторону меньших длин волн, а затем резонансы смещаются в сторону больших длин волн. Для резонансов мод оболочки наблюдается обратный процесс. Спектральный сдвиг резонансов для указанного интервала температур в среднем составляет 0,025 нм/°С. Аналогичный результат получен для ДВР со спиралью из эпоксидного компаунда в интервале температур 20–60 °С. Для сравнения, спектральный сдвиг резонансов ДВР с гофрированным полимерным покрытием [12] при тех же условиях составляет 0,02 нм/°С, а при  $t > 50$  °С – 0,2 нм/°С [13]. Для спиральных ДВР из стекла спектральный сдвиг резонансов при  $t < 100$  °С равен 0,02–0,04 нм/°С [7]. Малая чувствительность спектрального положения резонансов спиральных ДВР с полимерным покрытием к изменению температуры делает их



**Рис. 5.** Влияние температуры на спектральные характеристики ДВР со спиралью из полиэтиленового волокна. а – резонанс моды сердечника, б – резонанс моды оболочки. 1 – 20 °С, 2 – 30 °С, 3 – 40 °С.



**Рис. 6.** Зависимость спектрального положения резонанса от температуры для ДВР со спиралью из полиэтиленового волокна. 1 – резонанс моды сердечника, 2 – резонанс моды оболочки.

перспективными для использования в качестве фильтров, а также в качестве датчиков физических величин в тех случаях, когда требуется исключить влияние температуры. В частности, спиральные ДВР с низкой чувствительностью оптических характеристик к температуре могут оказаться полезными в качестве датчиков показателя преломления окружающей среды [13].

### Выводы

Представленные результаты показывают, что ДВР со спиральным полимерным покрытием обладают резонансными свойствами в телекоммуникационном диапазоне длин волн. Полуширина резонансных линий может составлять 0,3–2 нм. Достоинствами ДВР этого типа являются простота изготовления и большой выбор оптических материалов как для сердечника, так и для спирального покрытия. Относительно низкая чувствительность спектральных характеристик к температуре делает их перспективными для использования в качестве резонансных фильтров и датчиков физических величин.

Работа проводилась при поддержке правительства Санкт-Петербурга (грант № 3,5/30-04/031) и “Гранта проектов аспирантов, докто-

рантов и сотрудников СПбГЭТУ, молодых ученых по разделу III Темплана”.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Vengsarkar A.M., Lemaire P.J., Judkins J.B.* Long-period fiber gratings as band-rejection filters // *J. of Lightwave Technol.* 1996. V. 14. № 1. P. 58–65.
2. *James S.W., Tatam R.P.* Optical fiber long-period grating sensors: characteristics and application // *Measur. Sci. and Technol.* 2003. V. 14. P. R49–R61.
3. *Lee K.S., Erdogan T.* Transmissive tilted gratings for LP<sub>01</sub>-to-LP<sub>11</sub> mode coupling // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 1999. V. 11. № 10. P. 1286–1288.
4. *Lee K.S., Erdogan T.* Mode coupling in spiral fiber gratings // *Electron. Lett.* 2001. V. 37. № 3. P. 156–157.
5. *Lee K.S.* Coupling analysis of spiral fiber gratings // *Opt. Comm.* 2001. V. 198. P. 317–324.
6. *Ivanov O.V.* Fabrication of long-period gratings by twisting a standard single-mode fiber // *Opt. Lett.* 2005. V. 30. P. 3290–3292.
7. *Kopp V.I., Churikov V.M., Zhang G.* Single- and double-helix chiral fiber sensors // *JOSA. B.* 2007. V. 24. № 10. P. A48–A52.
8. *Sumetsky M., Dulashko Y., Fini J.M., Hale A., DiGiovanni D.J.* The microfiber loop resonator: theory, experiment, and application // *J. Lightw. Techn.* 2006. V. 24. P. 242–250.
9. *Xu F., Horak P., Brambilla G.* Optical microfiber coil resonator refractometric sensor // *Opt. Express.* 2007. V. 15. № 12. P. 7888–7893.
10. *Matsko A.B., Ilchenko V.S.* Optical resonators with whispering-gallery modes – part I: Basics // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2006. V. 12. P. 3–14.
11. *Ilchenko V.S., Matsko A.B.* Optical resonators with whispering-gallery modes – part II: Applications // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2006. V. 12. P. 15–32.
12. *Сидоров А.И., Цирухин А.А.* Формирование полимерных периодических структур на поверхности оптических волокон // *ЖТФ.* 2010. Т. 80. В. 1. С. 125–129.
13. *Patric H.J., Kersey A.D., Bucholtz F.* Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction // *J. of Lightwave Technol.* 1998. V. 16. № 9. P. 1606–1612.