

# Подавление мод высшего порядка при помощи спектрально-селективных поглощающих слоев в световодах с двойной отражающей оболочкой

Т.А. Кочергина\*, С.С. Алешкина, М.М. Бубнов, М.Е. Лихачев

*Научный центр волоконной оптики РАН*

*\*E-mail: [tatyana@fo.gpi.ru](mailto:tatyana@fo.gpi.ru)*

DOI:10.31868/RFL2018.122-123

Для ряда задач волоконной оптики (например, для создания эффективных иттербиевых лазеров, излучающих на длине волны 0,98 мкм [1], а также для эрбиевых (без иттербия) лазеров и усилителей с накачкой по оболочке [2]) необходимо использование в схемах активных световодов с большим отношением диаметров сердцевины и оболочки. На первый взгляд решение данной задачи кажется легко осуществимым. Так существующее коммерчески доступное оборудование применимо для работы с волоконными световодами, имеющими минимальный внешний диаметр до 80 мкм. Создание одномодовой сердцевины с диаметром до 30-35 мкм в спектральном диапазоне 0.98-1.55 мкм так же представляется формально осуществимо [2, 3]. Проблема заключается в том, что в световодах с двойной отражающей оболочкой и большим отношением диаметров сердцевины и оболочки, понятие «одномодовости» сердцевины теряет свой смысл. Действительно, моды высшего порядка, имеющие эффективный показатель преломления (ПП) меньше ПП кварцевого стекла (формально моды являются модами оболочки, а не сердцевины), в силу наличия второй отражающей оболочки продолжают удерживаться в волоконной структуре и имеют практически нулевые потери на распространение. В случае, когда диаметр первой отражающей оболочки превышает диаметр сердцевины «всего» в несколько раз, существенная часть интенсивности этих мод локализуется в области сердцевины, что в свою очередь приводит к их усилению наравне с фундаментальной модой LP<sub>01</sub>.

На рисунке 1а приведен модельный профиль показателя преломления световода, сердцевина которого в приближении бесконечной кварцевой оболочки на рабочей длине волны 1.55 мкм поддерживает распространение только лишь фундаментальной моды LP<sub>01</sub>. Диаметр сердцевины составляет 35 мкм. Депрессированный слой профиля ПП, прилегающий к области сердцевины, введен для уменьшения длины волны отсечки мод высшего порядка. Как видно из рисунка, уменьшение диаметра первой отражающей оболочки до 80 мкм, и создание второй отражающей оболочки с апертурой NA<sub>оболочки</sub>=0.3, приводит к существенному изменению модового состава сердцевины световода (см. рисунок 1а, таблица 1). Так доля мощности мод высшего порядка LP<sub>11</sub> и LP<sub>21</sub> в области сердцевины на рабочей длине 1550 нм составляет 94 и 84% соответственно, что в активном световоде приведет к их эффективному усилению наравне с фундаментальной модой.

В настоящей работе нами предложено реализовать подавление нежелательных мод путем внесения в волоконную структуру дополнительного кольцевого слоя, способствующего изменению распределения интенсивности мод высшего порядка и не оказывающего влияние на распределение интенсивности фундаментальной моды. Так как использование такой конструкции световода ориентировано для схем с накачкой по оболочке, то потери на распространение

мод высшего порядка могут быть увеличены путем легирования кольцевого слоя поглощающим элементом, имеющим нулевые (близкие к фундаментальным) потери на пропускание на длине волны накачки и интенсивное поглощение на длине волны сигнала. Для настоящей задачи в качестве поглощающих элементов могут быть использованы ионы редкоземельных элементов [4].

Внесение в конструкцию световода дополнительного кольцевого слоя с соответствующим образом подобранными параметрами (показателем преломления и толщиной слоя) позволяет существенно изменить профиль мод высшего порядка (рисунок 1б, таблица 1), уменьшить интеграл перекрытия этих мод с областью легирования и уменьшить их усиление, соответственно. Создание высокого поглощения в кольцевом слое обеспечит дополнительные потери для мод, имеющих ненулевую интенсивность поля в области слоя. Так поглощение в слое величиной порядка 200 дБ/м для моды  $LP_{11}$  будет вносить потери равные 36 дБ/м, для моды  $LP_{21}$  потери составят 20 дБ/м, для моды  $LP_{02}$  - 40 дБ/м. Подавление мод более высокого порядка может быть дополнительно осуществлено посредством их большей чувствительности к изгибу. При этом уровень потерь на распространение фундаментальной моды  $LP_{01}$  останется на приемлемо низком уровне ( $\alpha \sim 0,02$  дБ/м).

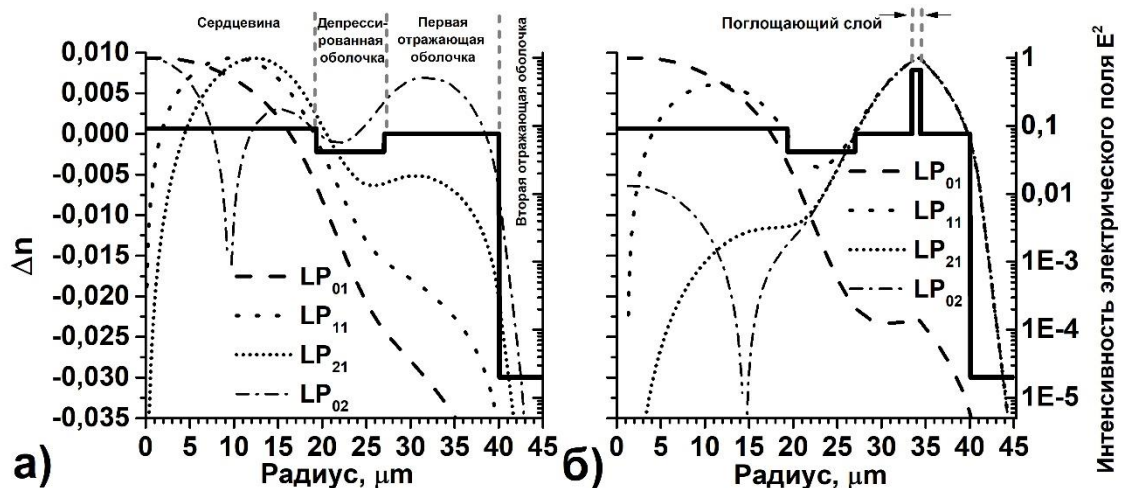


Рис.1. Распределение интенсивности электрического поля мод для дизайна световода: а – без поглощающего слоя, б – с поглощающим слоем.

Таблица 1. Рассчитанная доля мощности мод световода в сердцевине и кольцевом слое

Название моды	Доля мощности мод в сердцевине световода без поглощающего слоя, %	Доля мощности мод в сердцевине световода с поглощающим слоем, %	Доля мощности мод в поглощающем слое, %
$LP_{01}$	98,119	97,759	0,009
$LP_{02}$	14,041	0,187	20,140
$LP_{11}$	94,166	16,987	18,244
$LP_{21}$	84,219	0,148	19,817

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-10553).

## Литература

- [1] S.S. Aleshkina, A.E. Levchenko et al. *IEEE Photonics Technology Letters* **30**, 127 (2018)
- [2] L. Kotov, M. Likhachev et al. *Optics Letters* **38**, 2230 (2013)
- [3] S.S. Aleshkina, M. Likhachev et al. *Proceedings of SPIE* **9728**, 97281C (2016)
- [4] Т.А. Кочергина, С.С. Алешкина и др. *Квантовая электроника* **48**, в печати (2018)