УДК 535.326

Ю.Н. Кульчин, Ю.А. Зинин

Гибридные брэгговские волокна

Исследованы оптические свойства брэгговских волокон с промежуточным слоем между периодической оболочкой и полой сердцевиной. С помощью метода матриц переноса рассчитаны потери волоконных мод. Показано, что при использовании промежуточного слоя с более высоким показателем преломления, чем у периодической оболочки, можно на порядок уменьшить оптические потери по сравнению со стандартным брэгговским волноводом.
Ключевые слова: оптические характеристики световодов, брэгговские волокна.

В первых промышленных волоконных волноводах распространение света основывалось на полном внутреннем отражении излучения от границы между сердцевиной и оболочкой световода. По этой причине показатель преломления сердцевины выбирался больше показателя преломления оболочки, однако существует ряд задач, которые требуют применения сердцевины с низким показателем преломления или вообще пустотелых: например, передача мощного лазерного излучения или подавление нелинейных эффектов. Если показатель преломления сердцевины меньше показателя преломления оболочки, то полное внутреннее отражение становится невозможным и механизм распространения света в волноводе основан на антирезонансном эффекте. В этом случае при конструктивной интерференции лучей, отраженных внутрь волновода внутренней и внешней поверхностью слоя оболочки, оптические потери проходящего через сердцевину излучения существенно уменьшаются [1]. Изменение параметров оболочки (показателя преломления или толщины оболочки) будет существенно влиять на оптические свойства световода. При этом уровень потерь волноводов, использующих только антирезонансный механизм, не позволяет использовать их для передачи сигналов на большие расстояния. Для успешной работы волокна или с антирезонансным эффектом, или с полным внутренним отражением достаточно двухслойной оболочки (вторым слоем обычно является защитный кожух). При использовании многослойной диэлектрической оболочки, состоящей из периодически повторяющихся слоев с высоким и низким показателем преломления, можно существенно уменьшить величину потерь [2]. При большом количестве подобных слоев мы получаем фотонный одномерный кристалл (в цилиндрической системе координат). В фотонных кристаллах существуют частотные интервалы, называемые фотонными запрещенными зонами, излучение с частотами из этих зон может распространяться только вдоль дефектов периодической структуры, т.е. вдоль волокна. Таким образом, механизм распространения света в подобном волноводе основан на фотонных запрещенных зонах. Волокна с конечным числом чередующихся пар слоев обычно называют брэгговскими волокнами. Все моды подобного волокна являются вытекающими, причем моды с наименьшим затуханием сильно отличаются по величине потерь. Выбирая длину волокна, можно фактически добиться пропускания только одной моды.

Волноводы, в которых задействованы одновременно два механизма пропускания, принято называть гибридными [3]. Исследованию гибридных микроструктурированных волокон посвящен ряд работ. Однако в случае концентрических многослойных волокон исследуются большей частью брэгговские волокна с толщиной слоев, сравнимой с длиной волны излучения. В подобных волокнах на пропускание влияют и механизм фотонной запрещенной зоны, и антирезонансные эффекты от ближайшего к сердцевине слоя оболочки с высоким показателем преломления [4]. В этом случае первый слой оболочки полностью идентичен всем слоям с нечетными номерами при нумерации от сердцевины (одинаковая толщина и одинаковый показатель преломления). В дальнейшем первый слой оболочки, примыкающий к сердцевине, будем называть промежуточным, так как его параметры будут отличаться от параметров остальной периодической оболочки. В работе [5] исследовалось влияние толщины промежуточного слоя на оптические свойства пустотелого волокна с периодической оболочкой. Целью этой работы является исследование влияния показателя преломления промежуточного слоя на величину оптических потерь модифицированного брэгговского волокна.

Выбор исследуемого волокна и численного метода. Периодическая оболочка удерживает излучение определенных частот в области сердцевины и промежуточного слоя, а промежуточный

слой благодаря антирезонансному механизму влияет на оптические свойства волокна. Изменение параметров примыкающего к сердцевине слоя не перестраивает фотонную запрещенную зону, которая определяется фиксированными параметрами периодической части оболочки.

Для расчета оптических характеристик исследуемого волокна воспользуемся методом матриц переноса [5]. В качестве исходного брэгговского волокна для исследования мы выбрали волокно со следующими параметрами: пустотелая сердцевина с радиусом 1,8278 мкм, периодическая оболочка состоит из 16 слоев с низким показателем преломления n_L=1,17 толщины d_L=0,346 мкм и 16 слоев с высоким показателем n_H = 1,49 толщины d_H = 0,2133 мкм. Пропускание таким волокном излучения с длиной волны λ = 1 мкм хорошо исследовано. В статье [6] сравнивались результаты, полученные с учетом реальной структуры волокна, с результатами зонной диаграммы для бесконечной периодической оболочки и был сделан вывод, что TM и HE моды из-за высоких потерь можно игнорировать. Дисперсионное уравнение для мод TE_{0K} принимает следующий вид [5]:

$$p_{21} + p_{22} = 0, \tag{1}$$

где p_{gq} – элементы результирующей матрицы, которая связывает параметры поля на оси волокна с параметрами поля в последнем слое оболочки.

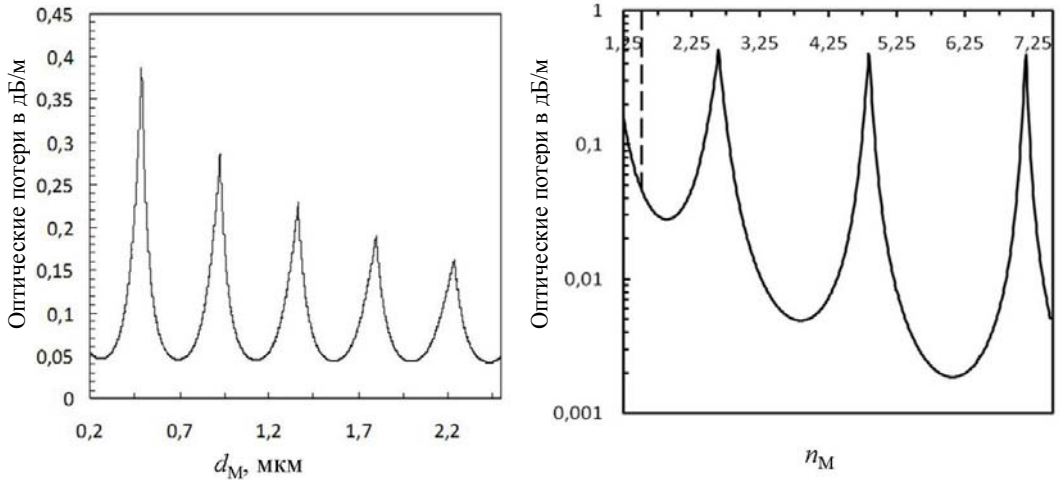
В работе [7] оптические потери γ для исследуемого волокна вычислены тремя различными методами: методом матриц переноса, асимптотическим методом и методом Галеркина. Показано что метод матриц переноса является наиболее точным и способен точно вычислять потери брэгговских волокон с конечным числом пар слоев. Выбранные параметры периодической оболочки близки по геометрии к структуре из четвертьволновых слоев диэлектрика. В работе [8] была рассчитана оптимальная геометрия подобной периодической структуры, при которой оптические потери минимальны. Различие оптимизированных и неоптимизированных потерь для моды TE_{01} составило ~32%, а толщина слоев оболочки для оптимизированной геометрии изменилась незначительно. Это позволяет считать выбранные для исследования параметры периодической оболочки волокна почти идеальными. Если мы теперь изменим параметры только первого слоя оболочки, то получим волокно с промежуточным слоем. Рассчитанные оптические потери гибридного волокна можно сравнить с потерями исходного брэгговского волокна, что позволит оценить влияние антирезонансного механизма.

Численные результаты и обсуждение. На рис. 1 построены графики зависимости оптических потерь γ от толщины d_M (рис. 1, *а*) и показателя преломления n_M (рис. 1, *б*) промежуточного слоя. Для исследуемого волокна моды TE_{01} и TE_{02} имеют наименьшие оптические потери. Проведенные вычисления показали, что оптические потери остальных мод вблизи минимумов кривых на несколько порядков больше. В окрестностях максимумов кривых, γ некоторых других мод превышают потери мод TE_{01} и TE_{02} всего в несколько раз. Дальнейший анализ проводится по этим двум модам, так как вблизи от минимумов кривых остальные моды быстро затухают и не влияют на одномодовый режим пропускания волокна, а вблизи от максимумов мы будем говорить о мультимодовом режиме (пропускание двух и более мод).

Кривые построены для случая, когда один из параметров промежуточного слоя выбирался таким же, как у слоя периодической оболочки с высоким показателем преломления, а другой параметр варьировался. С ростом d_M рассчитанные оптические потери имеют периодические осцилляции, и величина потерь в минимумах кривых почти не меняется, но величина потерь в максимумах уменьшается. Разница в величине потерь для соседних экстремумов ($\gamma_{max} - \gamma_{min}$) уменьшается при увеличении d_M, и при значительной толщине промежуточного слоя волокно становится мультимодовым. Изменяя толщину первого слоя оболочки, можно уменьшить потери брэгговского волокна с промежуточным слоем по сравнению с обычным брэгговским волокном лишь незначительно, но при определенных значениях d_M будут наблюдаться минимумы γ. В окрестностях минимумов волокно можно считать одномодовым.

В зависимости оптических потерь от величины n_M (см. рис. 1, *б*) наблюдаются две особенности: потери осциллируют с увеличением показателя преломления промежуточного слоя, и значения потерь в минимумах кривой неизменно понижаются, что вызвано увеличением отражения в сердцевину волокна. Можно существенно уменьшить потери волновода выбором подходящего показателя преломления промежуточного слоя. Для брэгговского волокна, вся оболочка которого периодическая, оптические потери γ = 0,0503 дБ/м [7]. На рис. 1, *б* в эту точку опущена пунктирная линия. Если при неизменной d_M = 0,2133 мкм мы используем промежуточный слой с n_M = 1,89, то тогда вели-

чина потерь будет 0,0279 дБ/м. На рис. 1, *б* это соответствует первому минимуму оптических потерь. При этих параметрах волокно пропускает излучение с длиной волны 1 мкм в одномодовом режиме (мода TE_{01}). При дальнейшем увеличении n_M оптические потери проходят через максимум, а волокно начинает работать в мультимодовом режиме. Затем оптические потери начинают снова уменьшаться и во втором минимуме достигают значения 0,0049 дБ/м (при $n_M = 3{,}85$). По сравнению со стандартным брэгговским волокном оптические потери уменьшились на порядок, а режим пропускания тоже одномодовый. При $n_M = 6{,}07$ существует третий минимум: $\gamma = 0{,}0019$ дБ/м. Наличие этого экстремума представляет только теоретический интерес ввиду невозможности изготовления диэлектрического промежуточного слоя с таким высоким показателем преломления. Высота пиков (максимумов γ) почти не меняется при увеличении n_M.



а *б*

Рис. 1. Зависимость потерь от толщины и показателя преломления промежуточного слоя. По вертикали отложены оптические потери в дБ/м

Так как при оптической толщине первого слоя оболочки, сравнимой с длиной волны излучения, положения максимумов оптических потерь хорошо соответствуют параметрам промежуточного слоя, удовлетворяющим резонансному условию [4], а положение минимумов – антирезонансному условию, то наблюдаемое пропускание волокна можно объяснить гибридным механизмом. Механизм фотонной запрещенной зоны поддерживает достаточно низкие оптические потери небольшого количества мод, а антирезонансный механизм обусловливает осциллирующее поведение потерь при варьировании параметров промежуточного слоя.

Заключение. В настоящей работе проведено рассмотрение модового состава излучения и оптических потерь мод для брэгговского волокна с полой сердцевиной и дополнительным слоем, промежуточным между сердцевиной и периодической оболочкой. При изготовлении первого слоя оболочки из материала с более высоким показателем преломления, чем у остального волокна, можно существенно уменьшить оптические потери. Если при выбранном показателе преломления толщина слоя будет удовлетворять антирезонансному условию, то волокно будет одномодовым. Однако при толщине промежуточного слоя, достигающего десятка длин волн, влияние фотонной запрещенной зоны станет ослабевать и одномодовый режим станет недостижим.

Изменяя параметры первого слоя брэгговского волокна, можно управлять его оптическими свойствами, не меняя параметры его сердцевины и остальных слоев оболочки.

Исследование выполнено при поддержке Программы «Научный фонд» ДВФУ.

Литература

1. Желтиков А.М. Цвета тонких пленок, антирезонансные явления в оптических системах и предельные потери собственных мод полых световодов // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, вып. 6. – С. 619–629.

2. Маненков А.Б. Затухание быстрых волн в диэлектрических трубах // Радиотехника и электроника. – 1977. – Т. XXII, вып. 10. – С. 2043–2051.

3. Cerqueira S.Jr. Hybrid photonic crystal fiber / S.Jr. Cerqueira, F. Luan, C.M.B. Cordeiro et al. // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, № 2. – P. 926–931.

4. Litchinitser N.M. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides / N.M. Litchinitser, A.K. Abeeluck, C. Headley, B.J. Eggleton // Optics Letters. – 2002. – Vol. 27, № 18. – P. 1592–1594.

5. Кульчин Ю.Н. Брэгговские волокна с промежуточным слоем / Ю.Н. Кульчин, Ю.А. Зинин, И.Г. Нагорный // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, вып. 3. – С. 235–240.

6. Arguros A. Guided modes and loss in Bragg fiber // Optics Express. – 2002. – Vol. 10, № 24. – P. 1411–1417.

7. Guo Sh. Comparative analysis of Bragg fibers/ Sh. Guo, S. Albin, R.S. Rogowski // Optics Express. – 2004. – Vol. 12, № 1. – P. 198–207.

8. Смирнов А.С. Оптические свойства брэгговских волоконных световодов / А.С. Смирнов, Д.В. Богданович, Д.А. Гапонов, А.Д. Прямиков // Квантовая электроника – 2008. – Т. 38, вып. 7. – С. 620–633.

Кульчин Юрий Николаевич
Академик, директор Института автоматики и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН
Тел.: 8 (423) 231-04-39
Эл. почта: director@iacp.dvo.ru

Зинин Юрий Александрович
Канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник ИАПУ
Тел.: 8-953-222-35-10
Эл. почта: zinin@iacp.dvo.ru

Kulchin Yu.N., Zinin Yu.A.

Hybrid Bragg fibers

In the research we investigated the optical properties of Bragg fiber containing an intermediate layer between the periodic optical cladding and the hollow core. Attenuation losses of waveguide modes were calculated using transfer matrix method. It was shown that these attenuation losses can be reduced by an order of magnitude in comparison with the standard Bragg fiber by using the intermediate layer with a higher refractive index than that of the periodic optical cladding.

Keywords: optical characteristics of fibres, Bragg fibres.