

Свойства световодов с фотонной запрещенной зоной и сердцевинной из кварцевого стекла; критерий одномодовости

О.Н.Егорова, С.Л.Семенов, М.Ю.Салганский, В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов

Исследованы свойства световодов с фотонной запрещенной зоной и сердцевинной из кварцевого стекла с малым (не более 0.4) отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов оболочки и малой (не превышающей 0.03) разностью показателей преломления в оболочке. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что количество мод в сердцевине зависит только от того, как образована сердцевина, – в результате пропуска одного или нескольких элементов оболочки, и не зависит от параметров оболочки. Если пропущен один элемент, то лишь одна дисперсионная зависимость моды сердцевинной попадает в фундаментальную запрещенную зону, и световод является одномодовым, если семь, то световод будет многомодовым.

Ключевые слова: волоконные световоды с фотонной запрещенной зоной, волоконные световоды с большим полем моды.

1. Введение

Одной из проблем, с которыми сталкиваются разработчики волоконно-оптических лазерных систем, характеризующихся высокой интенсивностью излучения в сердцевине световода и значительной длиной, являются нежелательные нелинейно-оптические эффекты, ограничивающие мощность и энергию импульсов, распространяющихся в световоде без искажений. Снижение интенсивности излучения в сердцевине световода возможно за счет увеличения ее диаметра. Одной из самых успешных конструкций световода с большим диаметром сердцевинной на сегодняшний день является световод, имеющий дырчатую микроструктурированную оболочку с малым отношением диаметра отверстий к расстоянию между ними и сердцевину из кварцевого стекла [1].

Преимуществом световодов с дырчатой микроструктурированной оболочкой является возможность достижения в них режима «бесконечной одномодовости», т.е. одномодовости в широком спектральном диапазоне, поскольку разность показателей преломления сердцевинной и эффективного показателя преломления оболочки значительно уменьшается с уменьшением длины волны [2, 3]. Однако такие световоды имеют ряд недостатков, в том числе наличие отверстий в структуре, в которые могут проникать загрязняющие вещества, приводящие к существенному снижению надежности и лучевой стойкости. Для устранения этого недостатка требуется специальная операция, позволяющая закрыть отверстия на торцах при сохранении волноведущих свойств световода. Другой проблемой является существенное усложнение процесса вы-

тяжки таких световодов, при котором, в зависимости от давления внутри отверстий, их диаметр может варьироваться в широких пределах; это делает результаты вытяжки менее предсказуемыми, поскольку высока вероятность получения искаженных структур поперечного сечения световода.

Альтернативным решением являются световоды с сердцевинной из кварцевого стекла и микроструктурированной отражающей оболочкой, не содержащей отверстий, локализирующие излучение в сердцевине за счет эффекта фотонной запрещенной зоны [4, 5]. Такие световоды появились сравнительно недавно и их оптические свойства еще недостаточно изучены.

Световод с фотонной запрещенной зоной представляет собой двумерный фотонный кристалл с сердцевинной, образовавшейся в результате отсутствия одного или нескольких элементов фотонного кристалла. Примеры поперечного сечения таких световодов представлены на рис. 1. Элементы оболочки представляют собой цилиндры диаметром d с осью, параллельной оси световода, показатель преломления которых на несколько процентов выше, чем у чистого кварцевого стекла. Расстояние между центрами соседних элементов равно Λ . Мода сердцевинной возбуждается на длинах волн, находящихся в спектральных об-

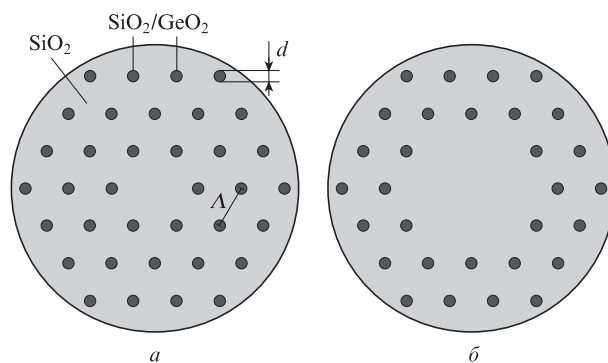


Рис. 1. Поперечное сечение световодов с фотонной запрещенной зоной и сердцевинной из кварцевого стекла, образованной в результате отсутствия одного (а) и семи (б) элементов оболочки.

О.Н.Егорова, С.Л.Семенов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: egorova@fo.gpi.ru, sls@fo.gpi.ru

М.Ю.Салганский, В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: misalghan@yandex.ru

Поступила в редакцию 4 октября 2011 г., после доработки – 26 декабря 2011 г.

ластях, которые соответствуют запрещенным зонам фотонно-кристаллической оболочки. В световоде с фотонной запрещенной зоной отсутствуют воздушные отверстия, что делает их изготовление и эксплуатацию проще, чем дырчатых световодов.

В [5] впервые исследовался световод с отношением диаметра элемента фотонно-кристаллической оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов $d/\Lambda < 0.4$. Малость этого отношения позволила увеличить расстояние Λ , что в свою очередь дало возможность увеличить диаметр поля наименьшей моды сердцевинки до 20 мкм. При этом ширина запрещенной зоны составила несколько сотен нанометров и был достигнут приемлемый уровень оптических потерь. Следует также отметить, что при малом отношении d/Λ возможна эффективная накачка такого световода с торца, поскольку только часть излучения, пропорциональная $(d/\Lambda)^2$, будет захвачена элементами оболочки. При большом d/Λ эта часть будет достаточно велика, тогда как при $d/\Lambda < 0.2$ потери мощности накачки составят всего несколько процентов.

Для дальнейшего увеличения диаметра модового пятна в световодах с фотонной запрещенной зоной при сохранении одномодового режима распространения излучения необходимо знать, как модовый состав зависит от параметров оболочки и сердцевинки световода. Этому вопросу и посвящена данная статья. Исследования проводились с помощью зонных диаграмм.

2. Численное моделирование

Расчеты дисперсионных зависимостей мод оболочки и сердцевинки проводились методом плоских волн [6] с помощью пакета программ MIT Photonic-Bands (MPB) [7].

Зонная диаграмма оболочечных мод при разности показателей преломления элемента оболочки и окружающей среды $\Delta n = 0.015$ и отношении $d/\Lambda = 0.1$ представлена на рис.2 в координатах $(\beta - kn_0)\Lambda$ и λ/Λ , где β – постоянная распространения моды; $k = 2\pi/\lambda$; n_0 – показатель преломления нелегированного кварцевого стекла. Области, в которых существуют моды оболочки, закрашены серым, запрещенные зоны расположены ниже «уровня» кварцевого стекла $(\beta - kn_0)\Lambda = 0$ и показаны белым цветом. На рис.2 представлены три запрещенные зоны – I, II и III. Зона I является наиболее длинноволновой (фундаментальной) запрещенной зоной фотонно-кристаллической оболочки. Нижняя и верхняя границы зоны I обозначены β_L и β_U соответственно и пересекают линию «уровня» кварцевого стекла в точках 1 и 2.

Диапазон изменения дисперсионной зависимости моды сердцевинки находится в границах запрещенной зоны β_L и β_U . Поэтому постоянная распространения моды сердцевинки β находится в пределах $\beta_L < \beta < kn_0$ в области 1–2 и $\beta_L < \beta < \beta_U$ в области 2–3. Поскольку мода с постоянной распространения β характеризуется углом к оси световода $\theta = \arccos[\beta/(kn_0)]$, то границы запрещенной зоны определяют максимальный и минимальный углы, под которыми может распространяться мода, т. е. числовую апертуру световода $NA = n_0 \sin \theta$.

Мода сердцевинки испытывает отсечку при пересечении ее дисперсионной кривой с нижней и верхней границами запрещенной зоны в точках *a* и *b* соответственно. При этом каждая мода сердцевинки имеет как коротковолновую (в точке *a*), так и длинноволновую (в точке *b*) отсечку.

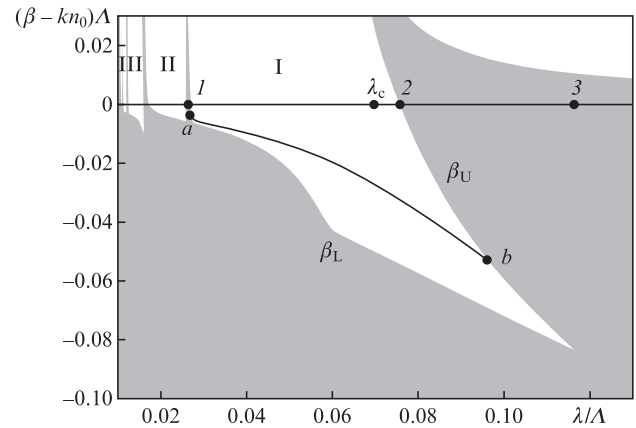


Рис.2. Зонная диаграмма световода с разностью показателей преломления элемента оболочки $\Delta n = 0.015$ и отношением $d/\Lambda = 0.1$. Сердцевина световода образована одним пропущенным элементом. Зоны, в которых могут существовать моды оболочки, показаны серым цветом, запрещенные зоны – белым, дисперсионная кривая моды сердцевинки – кривая *ab*; $\lambda_c = (\lambda_3 + \lambda_1)/2$.

Таким образом, границы запрещенной зоны определяют спектральную область существования моды сердцевинки, а также максимальный и минимальный углы, при которых возможно распространение моды.

Для изучения того, как изменяется положение границ фундаментальной запрещенной зоны в зависимости от параметров фотонно-кристаллической оболочки, был проведен расчет зонных диаграмм для трех значений Δn (0.005, 0.015 и 0.030) и пяти значений d/Λ (0.05, 0.1, 0.2, 0.3 и 0.4).

Можно ввести относительную ширину запрещенной зоны $\Delta\lambda/\lambda_c = (\lambda_3 - \lambda_1)/\lambda_c$, где λ_1 и λ_3 – длины волн, соответствующие точкам 1 и 3 (рис.2), $\lambda_c = (\lambda_3 + \lambda_1)/2$ – длина волны, которую можно принять за середину запрещенной зоны. При этом следует отметить, что $\Delta\lambda/\lambda_c$ характеризует только ширину запрещенной зоны, а область, в которой локализуется мода сердцевинки, является более узкой и определяется точками пересечения дисперсионной зависимости моды (или мод в случае многомодового световода) с краями запрещенной зоны.

На рис.3,а представлены зависимости относительной ширины запрещенной зоны $\Delta\lambda/\lambda_c$ от отношения d/Λ при различных значениях Δn оболочки. Видно, что величина $\Delta\lambda/\lambda_c$ не зависит от Δn и увеличивается, хотя и незначительно, при уменьшении отношения d/Λ . В то же время разность показателей преломления сердцевинки и эффективного показателя преломления оболочки на длине волны, соответствующей середине запрещенной зоны, значительно возрастает по модулю при увеличении и d/Λ , и Δn (рис.3,б).

Чтобы определить модовый состав световодов с сердцевинкой, сформированной в результате отсутствия одного и семи элементов оболочки, мы исследовали расчетные дисперсионные зависимости мод, лежащие в фундаментальной запрещенной зоне. Расчеты проводились для $\Delta n = 0.005, 0.015, 0.03$ и $d/\Lambda = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$. Результаты расчета для $\Delta n = 0.015$ и $d/\Lambda = 0.1$ представлены на рис.2 (нет одного элемента) и рис.4 (нет семи элементов). Для других наборов параметров модовый состав сердцевинки является таким же и дисперсионные диаграммы имеют схожий вид.

Как видно из рис.2, в фундаментальную запрещенную зону попадает только одна (дважды вырожденная) мода сердцевинки. Таким образом, световоды с одним отсут-

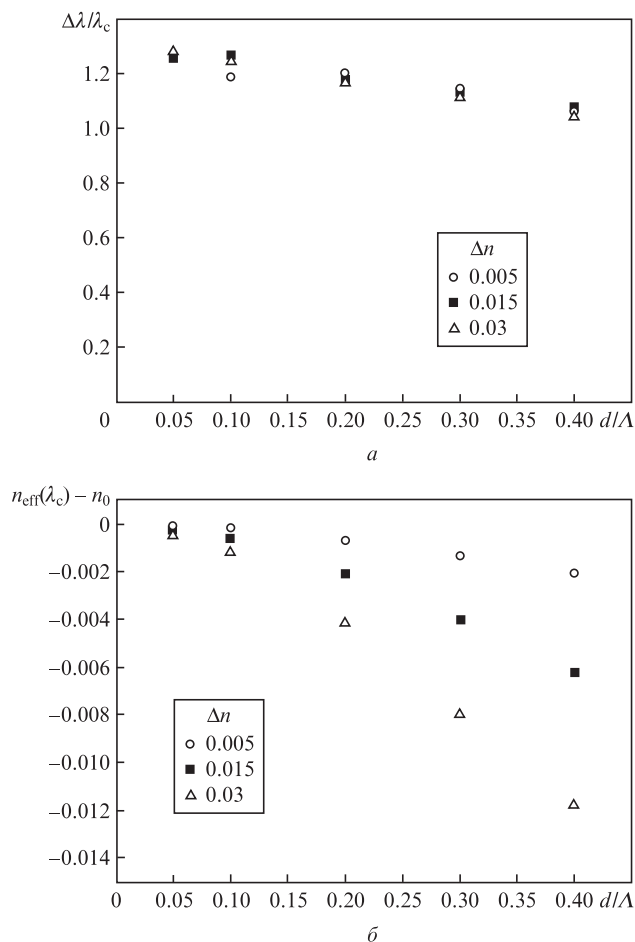


Рис.3. Относительная ширина запрещенной зоны (а) и разности показателей преломления сердцевинки и оболочки в середине запрещенной зоны (б) при различных значениях Δn .

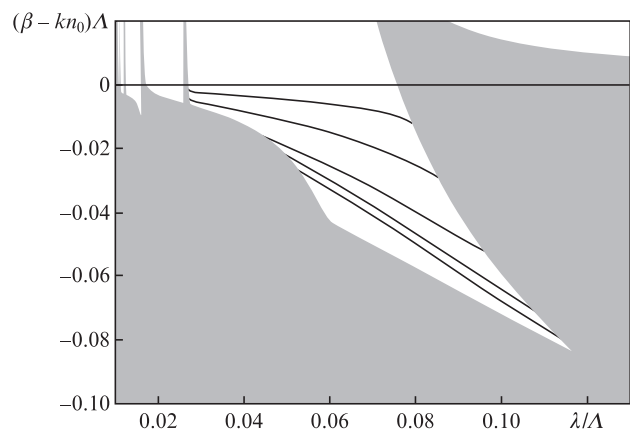


Рис.4. Зонная диаграмма световода с сердцевинкой, образованной в результате отсутствия семи элементов; $\Delta n = 0.015$, $d/\Lambda = 0.1$.

ствующим элементом оболочки являются одномодовыми во всей фундаментальной запрещенной зоне. В световодах с семью отсутствующими элементами оболочки в запрещенную зону попадают дисперсионные зависимости 14 мод. Поскольку некоторые из них вырождены, они образуют пять групп мод с приблизительно одинаковыми дисперсионными зависимостями. Полученный модовый состав аналогичен описанному в работе [8] для дырчатых микроструктурированных световодов.

3. Экспериментальное исследование световодов

Экспериментальная проверка полученных результатов проводилась для нескольких образцов световодов с сердцевинкой, образованной в результате отсутствия одного и семи элементов фотонно-кристаллической оболочки. Образцы были изготовлены с помощью метода сборки и перетяжки, заключающегося в том, что заготовка микроструктурированного световода составляется из отдельных стержней, каждый из которых является заготовкой для отдельного элемента оболочки или сердцевинки. Затем набор стержней сплавляется в монолитную заготовку, которая перетягивается в световод. Стержни для элементов оболочки были получены путем перетяжки заготовок с легированной оксидом германия сердцевинкой, изготовленных методом MCVD, а стержни для сердцевинки – путем перетяжки цилиндрической заготовки из нелегированного кварцевого стекла. В табл.1 представлены параметры исследованных световодов, а на рис.5 – фотографии их поперечных сечений, сделанные с помощью электронного микроскопа.

Модовый состав образцов исследовался путем наблюдения с помощью CCD-камеры распределения в ближнем поле выходящего из световода излучения при различных условиях возбуждения. Излучение от внешнего источника вводилось в исследуемый световод с помощью подводящего световода путем стыковки торцов. При перемещении торца подводящего световода изменялись условия возбуждения мод исследуемого световода.

Табл.1. Параметры изготовленных световодов с фотонно-кристаллической структурой.

Номер световода	d/Λ	Λ (мкм)	Δn	Количество отсутствующих элементов	Количество слоев оболочки	Модовый состав
1	0.24	9.2	0.0185	7	6	Многомодовый
2	0.08	18	0.028	7	2	Многомодовый
3	0.12	11.4	0.028	1	6	Одномодовый
4	0.09	28.8	0.005	1	3	Одномодовый

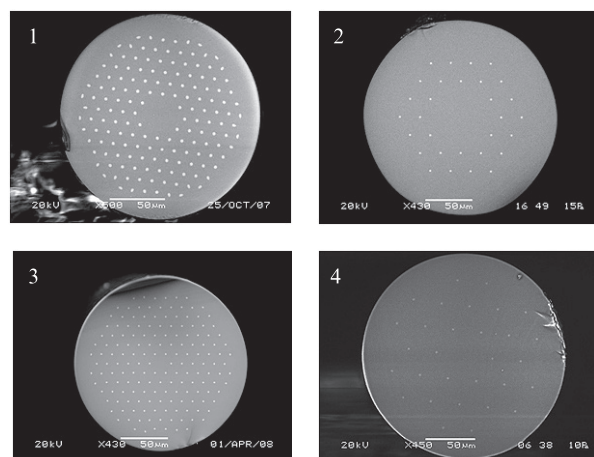


Рис.5. Фотографии торцов световодов 1–4 (табл.1), полученные с помощью электронного микроскопа.

При исследовании световодов с сердцевинной, образованной из-за отсутствия одного элемента оболочки, при любых условиях возбуждения всегда наблюдалось гауссово распределение интенсивности выходного излучения, что соответствует основной моде световода. При исследовании световодов с сердцевинной, образованной в результате отсутствия семи элементов, изменение условий возбуждения приводило к изменению распределения интенсивности на выходном торце световода, из чего можно заключить, что световод был многомодовым. Таким образом, в соответствии с результатами расчетов световоды с сердцевинной, образованной вследствие отсутствия одного элемента, оказались одномодовыми, а семи элементов – многомодовыми.

Увеличение размера модового пятна в случае сердцевинной, образованной отсутствием нескольких элементов оболочки, сопровождается увеличением количества мод сердцевинной, что затрудняет получение высококачественного пучка излучения волоконных лазеров и усилителей. Увеличить поле моды можно также путем увеличения расстояния между соседними элементами оболочки при сердцевинной, образованной отсутствием одного элемента. Световод 4 (рис.5) имеет наибольшее расстояние между элементами фотонно-кристаллической оболочки ($\Lambda = 28.8$ мкм), которое примерно в 30 раз превышает рабочую длину волны, а его сердцевина образована отсутствием одного элемента. Остальные параметры световода 4 были выбраны такими, чтобы центр фундаментальной запрещенной зоны приходился на длину волны 1 мкм: $d/\Lambda = 0.09$ и $\Delta n = 0.005$. Количество слоев оболочки было выбрано равным трем, поскольку в реальном лазере с накачкой в оболочку диаметр области накачки должен быть сравнительно небольшим (200–300 мкм). При трех слоях фотонно-кристаллической оболочки диаметр световода (диаметр области накачки) составил 200 мкм.

Зонная диаграмма световода 4 представлена на рис.6,а. Числовая апертура для длины волны, соответствующей середине запрещенной зоны в этом световоде, составляет 0.025, что соответствует разности показателей преломления сердцевинной и оболочки примерно 2×10^{-4} . Точки пересечения дисперсионной зависимости моды сердцевинной с краями запрещенной зоны отвечают длинам волн 400 и 1300 нм. В области 400–700 нм дисперсионная зависимость моды лежит близко к краю запрещенной зоны.

Излучение, выходящее из торца световода 4 длиной 10 см, наблюдалось в ближнем поле с помощью CCD-камеры (рис.6,б). Устойчивая локализация моды имела место в спектральной области 800–1200 нм, при этом длинноволновый край измерений был ограничен рабочим диапазоном CCD-камеры. При различных условиях возбуждения световода 4 излучением внешнего источника наблюдалось гауссово распределение выходной мощности, что свидетельствует об одномодовости световода. Измеренный с помощью CCD-камеры диаметр поля моды составил 35 мкм на длине волны 1050 нм. Оптические потери излучения в прямом отрезке световода, измеренные методом облома, были равны порядка 6 дБ/м в диапазоне 1–1.2 мкм (рис. 6,в). Высокий уровень оптических потерь связан с тем, что края поперечного распределения поля моды проникают за фотонно-кристаллическую оболочку и мода становится вытекающей. Таким образом, увеличение диаметра сердцевинной за счет увеличения расстояния между соседними элементами оболочки приводит к повышению уровня оптических потерь.

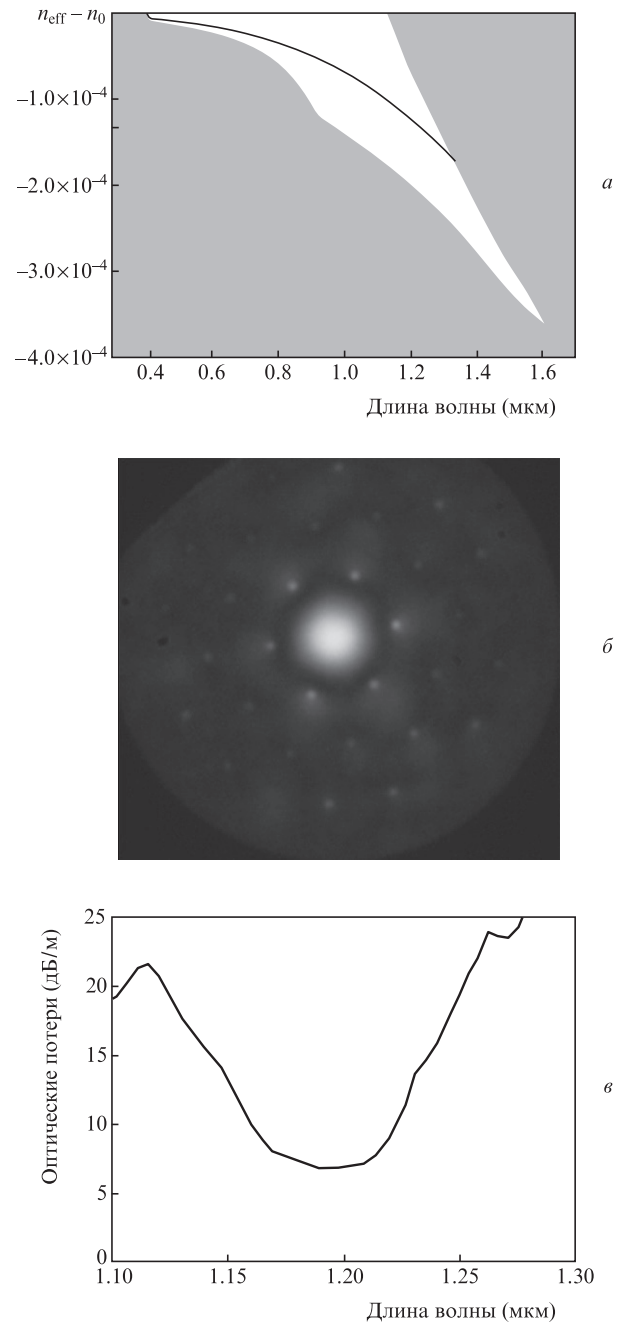


Рис.6. Зонная диаграмма световода 4 (табл.1) (а), распределение мощности по торцу световода (б) и спектр оптических потерь (в).

4. Заключение

В работе исследовался модовый состав световодов с фотонной запрещенной зоной и сердцевинной из кварцевого стекла, имеющих малое ($d/\Lambda \leq 0.4$) отношение диаметра элемента оболочки d к расстоянию между центрами соседних элементов Λ и малую ($\Delta n = 0.005 - 0.03$) разность показателей преломления в оболочке.

Проведенные расчеты показали, что количество мод сердцевинной, попадающих в фундаментальную запрещенную зону в исследованном диапазоне параметров, зависит только от того, образована сердцевина в результате отсутствия одного или нескольких элементов оболочки. Если отсутствует один элемент, то только одна (дважды вырожденная по поляризации) мода сердцевинной попадает в фундаментальную запрещенную зону, если семь –

световод становится многомодовым. При этом модовый состав сердцевины не зависит от изменения выбранных параметров оболочки Δn и d/Λ . Экспериментальная проверка подтвердила теоретические расчеты.

Увеличить диаметр поля моды в данных световодах можно за счет увеличения как количества отсутствующих элементов, так и расстояния между соседними элементами оболочки. Однако оба подхода имеют свои недостатки.

– Увеличение диаметра поля моды путем формирования сердцевины пропуском не одного, а семи элементов приводит к многомодовости световода, что требует дополнительной модификации его конструкции для подавления распространения высших мод и затрудняет получение высококачественного лазерного пучка.

– Увеличение диаметра поля моды за счет увеличения расстояния между элементами фотонно-кристаллической оболочки позволяет сохранить одномодовость, однако приводит к росту оптических потерь. Мода становится вытекающей из-за проникновения краев поперечного распределения поля моды за пределы оболочки. Так, в световоде с $\Lambda = 28.8$ мкм, $d/\Lambda = 0.09$, $\Delta n = 0.005$ и с сердцевиной, сформированной отсутствием одного элемента, диаметр поля моды составил 35 мкм, а оптические потери – 6 дБ/м.

Аналогичные проблемы наблюдаются и в микроструктурированных световодах – световодах с отверстиями, поэтому работы по усовершенствованию обоих типов световодов остаются актуальными.

Авторы выражают признательность Е.М. Дианову за инициирование и поддержку проведенных исследований. Работа проведена на средства гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-8069.2010.2, а также гранта РФФИ № 10-02-00334-а.

1. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. *Opt. Lett.*, **21**, 1547 (1996).
2. Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **22**, 961 (1997).
3. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. *Photonic Crystals. Molding the Flow of Light* (Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2008).
4. Argyros A., Birks T.A., Leon-Saval S.G., Cordeiro C.M.B., Luan F., Russell P.St.J. *Opt. Express*, **13**, 309 (2005).
5. Egorova O.N., Semjonov S.L., Kosolapov A.F., Denisov A.N., Pryamikov A.D., Gaponov D.A., Biriukov A.S., Dianov E.M., Salganskii M.Y., Khopin V.F., Yashkov M.V., Gurianov A.N., Kuksenkov D.V. *Opt. Express*, **16**, 11735 (2008).
6. Johnson G.S., Joannopoulos J.D. *Opt. Express*, **8**, 173 (2001).
7. ab-initio.mit.edu/mpb
8. Guobin R., Zhi W., Shuqin L., Shuisheng J. *Opt. Express*, **11**, 1310 (2003).