

Волноводные характеристики одномодовых микроструктурных волоконных световодов со сложным распределением профиля показателя преломления

А.В.Белов, Е.М.Дианов

С использованием метода эквивалентного ступенчатого профиля показателя преломления рассчитаны основные волноводные характеристики одномодовых микроструктурных волоконных световодов (МВС). Предложена новая структура таких световодов с W-образным профилем распределения показателя преломления. Дисперсионные характеристики световодов данной структуры были рассчитаны на основе решения скалярного волнового уравнения. Показано, что в подобных структурах возможно смещение нуля хроматической дисперсии в область коротких длин волн ($\lambda_0 \approx 0.8$ мкм) с сохранением одномодового режима распространения. Предложен также ряд структур МВС со сложным распределением профиля показателя преломления и с возможностью формирования сборок данных структур в круглых кварцевых трубках.

Ключевые слова: световоды, микроструктурные волоконные световоды, дисперсия волоконных световодов.

В последнее время в оптике интенсивно развивается новое научное направление – фотонные кристаллы. Фотонные кристаллы формируются на основе различных оптических структур с периодически изменяющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью, что приводит к образованию так называемых фотонных запрещенных зон [1]. Различного рода локальные дефекты в таких структурах приводят к нарушению симметрии фотонного кристалла и к возможности локализации фотонов в области данного дефекта. В случае протяженного дефекта это способствует образованию волноведущей структуры типа световода.

Существуют также волноведущие структуры другого типа – так называемые микроструктурные волоконные световоды (МВС), которые обычно изготавливаются из одного материала – кварцевого стекла. Прохождение света в них обеспечивается периодической структурой, состоящей из стекла и воздуха. Наибольшее распространение получили структуры, формирующиеся из одинаковых кварцевых капилляров, плотно упакованных в гексагональную структуру, в которой центральный капилляр замещается кварцевым стержнем.

Первоначально подобные структуры относились к фотонным кристаллам. Однако впоследствии было показано, что волноводные характеристики данных структур могут быть получены в рамках модели полного внутреннего отражения света, поэтому они стали называться микроструктурными волоконными световодами. Действительно, поскольку оболочка МВС состоит из кварцевых капилляров, то ее эффективный показатель преломления меньше, чем показатель преломления сердцевины, что позволяет рассматривать МВС как обычный волоконный световод.

Однако волноводные характеристики МВС существенно

отличаются от характеристик стандартных волоконных световодов. Это обусловлено тем, что, во-первых, разность показателей преломления сердцевины и оболочки в МВС почти на два порядка больше, чем в стандартных световодах. Во-вторых, эффективный показатель преломления оболочки МВС существенно сильнее зависит от длины волны излучения, чем в стандартных световодах, что приводит к появлению ряда уникальных волноводных характеристик МВС.

В силу этих двух отличий, например, длина волны нулевой хроматической дисперсии МВС может смещаться в область длин волн менее 1.3 мкм (нулевая длина волны хроматической материальной дисперсии в кварцевом стекле), что практически невозможно в стандартных волоконных световодах. Кроме того, при относительно малом размере отверстий капилляров в оболочке МВС возможна реализация одномодового режима распространения практически во всем спектральном диапазоне.

Для расчета волноводных характеристик МВС было предложено большое количество разнообразных теоретических методов [2–6]. Нами для расчета параметров МВС использовалась модель эквивалентного ступенчатого профиля, впервые предложенная Бирксом с соавторами в работе [2]. На рис. 1 приведено поперечное сечение гексагональной упаковки кварцевых капилляров с замещением центрального капилляра кварцевым стержнем. Для расчета эффективного показателя преломления оболочки $n_{\text{eff-cl}}$ единичная шестиугольная ячейка (рис. 1) замещалась кругом радиусом $A/2$, где A – расстояние между центрами отверстий кварцевых капилляров. Затем для круговой единичной ячейки решалось скалярное волновое уравнение в предположении, что поле $E(r)$ удовлетворяет граничному условию $dE(r)/dr|_{r=0} = 0$. Для его решения использовался итерационный метод, предложенный в работе [7].

Рассчитанное распределение $n_{\text{eff-cl}}$ для МВС с $d/A = 0.6$, где d – диаметр отверстия, приведено на рис. 2. Очевидно, что эффективный показатель преломления оболочки изменяется в двух граничных пределах: при $\lambda \rightarrow 0$

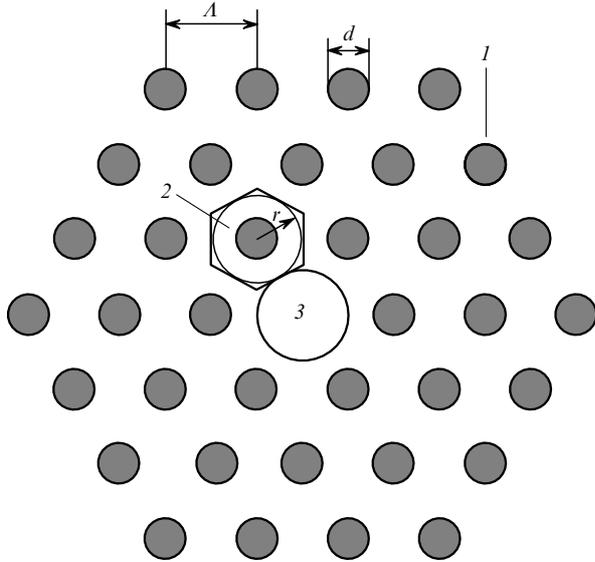


Рис.1. Поперечное сечение МВС с гексагональной упаковкой кварцевых капилляров: 1 – отверстия с $d/A = 0.45$; 2 – элементарная ячейка гексагональной упаковки; 3 – сердцевина.

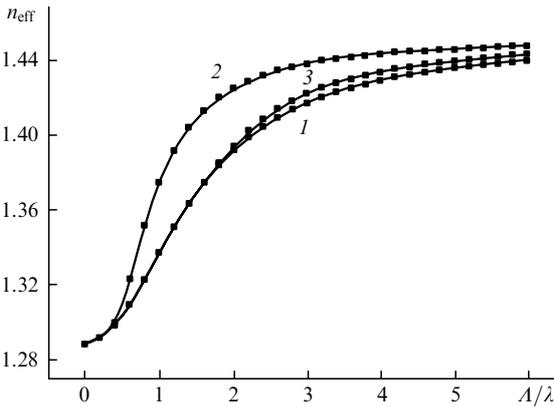


Рис.2. Зависимости эффективных показателей преломления для оболочки (1), основной (2) и первой высшей (3) мод МВС.

имеем $n_{\text{eff-cl}} \rightarrow n_q$, где $n_q = 1.45$ – показатель преломления кварцевого стекла, а при $\lambda \rightarrow \infty$ имеем $n_{\text{eff-cl}} = 1 + (1 - d^2/A^2)\Delta n$, где Δn – разность показателей преломления кварцевого стекла и воздуха; в нашем случае при $d/A = 0.6$ значение $n_{\text{eff-cl}} \rightarrow 1.288$. Далее, решая скалярное волновое уравнение для эффективной сердцевины МВС с учетом рассчитанного $n_{\text{eff-cl}}$ и предполагая, что радиус сердцевины равен $A/2$, определяем эффективные показатели преломления для основной (LP_{01}) и первой высшей (LP_{11}) мод.

По аналогии со стандартными одномодовыми световодами характеристический параметр V_{eff} для дырчатых световодов находится на основании следующего выражения:

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi A}{\lambda} \frac{1}{2} (n_q^2 - n_{\text{eff-cl}}^2)^{1/2},$$

где λ – длина волны. В случае используемого нами скалярного приближения параметр $V_{\text{eff-cr}}$, соответствующий длине волны отсечки первой высшей моды, равен ~ 2.4 . Следует отметить, что более точные методы

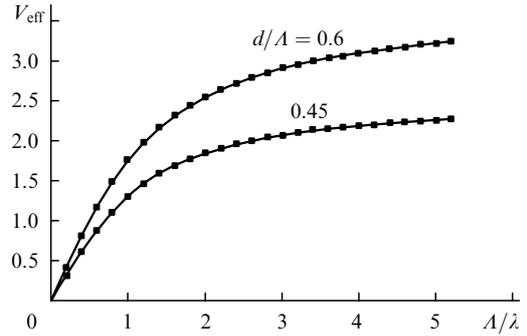


Рис.3. Зависимости V_{eff} для двух параметров d/A .

расчета волноводных характеристик дырчатых световодов дают $V_{\text{eff-cr}} \approx 2.11$ [6].

На рис.3 приведены значения V_{eff} , рассчитанные для двух структур МВС с диаметрами отверстий $d/A = 0.45$ и 0.6 . Видно, что при $d/A = 0.45$ параметр $V_{\text{eff}} < 2.4$ практически для любой длины волны, т.е. МВС остаются одномодовыми во всем спектральном диапазоне, если $d/A \leq 0.45$. В этом состоит одно из существенных различий волноводных характеристик МВС по сравнению с таковыми для стандартных одномодовых световодов, в которых разность показателей преломления сердцевины и оболочки Δn не зависит от длины волны и, следовательно, при $\lambda \rightarrow 0$ параметр $V \rightarrow \infty$. В случае МВС Δn существенно сокращается с уменьшением λ (рис.2), и поэтому при $\lambda \rightarrow 0$ параметр $V \rightarrow \text{const}$.

Спектральная зависимость хроматической дисперсии определялась с использованием рассчитанной зависимости эффективного показателя преломления сердцевины n_{eff} по следующей формуле:

$$D = -\frac{\lambda d^2 n_{\text{eff}}}{c d\lambda^2}.$$

Материальная хроматическая дисперсия чистого кварцевого стекла сердцевины МВС находилась по трехчленной формуле Селлмейера[8]. Рассчитанные дисперсионные кривые для разных значений d/A и для $A = 2.3$ мкм приведены на рис.4. Видно, что при относительно больших диаметрах отверстий ($d/A > 0.45$) нулевая длина волны хроматической дисперсии смещается в область коротких длин волн ($\lambda < 1$ мкм). Кроме того, видно, что при определенных значениях d/A (~ 0.35) можно реализовать дырчатые световоды с уплощенной дисперсией в широком спектральном диапазоне 1.1 – 1.5 мкм.

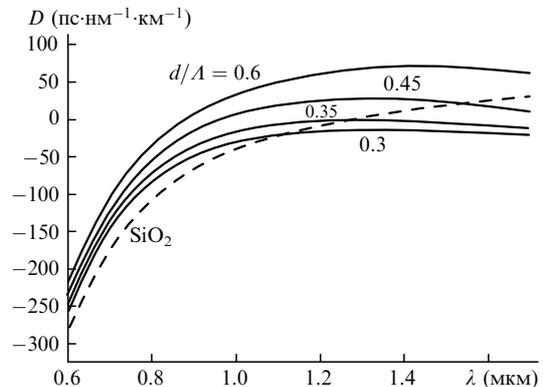


Рис.4. Расчетные зависимости хроматической дисперсии в МВС от длины волны для разных значений d/A и $A = 2.3$ мкм. Штриховая кривая – $D(\lambda)$ для кварцевого стекла.

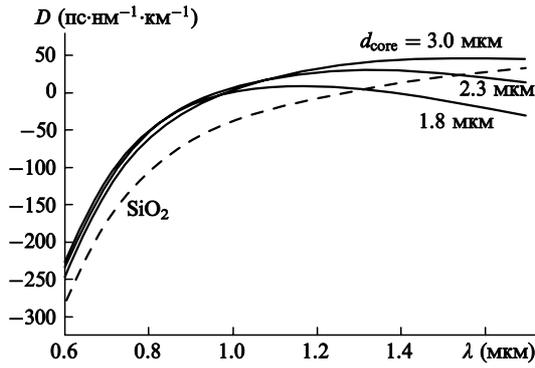


Рис.5. Расчетные зависимости хроматической дисперсии в МВС от длины волны ($d/\Lambda = 0.45$, $\Lambda = 2.3$ мкм) для разных диаметров сердцевин d_{core} . Штриховая кривая – $D(\lambda)$ для кварцевого стекла.

Характер поведения дисперсионной кривой существенно зависит от ряда других параметров и, в первую очередь, от расстояния между центрами отверстий Λ и от диаметра сердцевин d_{core} . Так, на рис.5 приведены зависимости D/λ для $d/\Lambda = 0.45$, $\Lambda = 2.3$ мкм и различных d_{core} . Видно, что при малых диаметрах сердцевин ($d_{core} \approx 1.8$ мкм) возможна также реализация световодов с уплощенной дисперсионной кривой.

Другой важной волноводной характеристикой МВС является размер пятна моды. На основе расчета размера пятна моды можно оценивать потери на стыковку МВС, потери на изгибы и микроизгибы и ряд других параметров. Следует отметить, что важна не только оценка абсолютного значения размера пятна моды, но и его спектральная зависимость. Для определения диаметра пятна моды, обусловленного потерями на изгибы, в МВС использовалась следующая формула [9]:

$$\omega_b = \left[\frac{\int E^2(e)r^3 dr}{\int E^2(r) dr} \right]^{1/2}$$

На рис.6 приведена рассчитанная по данной формуле спектральная зависимость диаметра пятна моды для МВС с параметрами $d/\Lambda = 0.6$ и $\Lambda = 2.3$ мкм. Видно, что диаметр пятна (3–4 мкм) мал и изменяется не более чем в 1.5 раза при изменении длины волны от 1.0 до 2.3 мкм. Таким образом, МВС данного типа теоретически обладает достаточно малыми изгибными потерями в широком спектральном диапазоне.

Как отмечалось выше, смещение длины волны в область коротких длин волн ($\lambda_0 < 0.9$ мкм) возможно при относительно больших размерах отверстий ($d/\Lambda > 0.6$). Однако в данном случае МВС перестает быть одномодо-

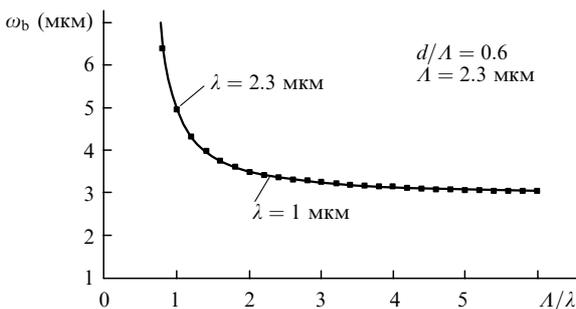


Рис.6. Зависимость диаметра пятна моды от A/λ при $d/\Lambda = 0.6$, $\Lambda = 2.3$ мкм.

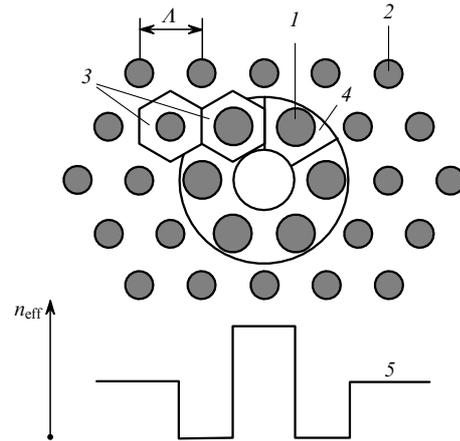


Рис.7. Поперечное сечение МВС с гексагональной укладкой кварцевых капилляров и W-профилем:

1 – отверстия с $d/\Lambda = 0.6$; 2 – отверстия с $d/\Lambda = 0.45$; 3 – элементарные ячейки в гексагональной упаковке; 4 – эквивалентная элементарная ячейка в депрессированной оболочке; 5 – распределение эффективного показателя преломления.

вым. Поэтому в настоящей работе для обеспечения одномодового режима распространения и смещения нулевой длины волны хроматической дисперсии в коротковолновую сторону предлагается использовать световоды со сложным распределением профиля показателя преломления (W-профилем). В этом случае внутренние диаметры отверстий капилляров, расположенных непосредственно около сердцевин МВС, больше остальных отверстий в оболочке, благодаря чему, около сердцевин формируется слой с меньшим эффективным показателем преломления, чем в оболочке (рис.7).

Эффективная толщина депрессированной оболочки определялась из условия, что эффективная площадь отверстия в эквивалентной единичной ячейке (сектор в депрессированной оболочке) равна отношению площади отверстия к площади единичной шестиугольной ячейки. При этом условии и выбранных параметрах световода ($d/\Lambda = 0.6$ в депрессированной оболочке) эффективный радиус оболочки $r_{cl} = 1.3\Lambda$.

Расчитанная кривая хроматической дисперсии для данного W-профиля приведена на рис.8. Видно, что дисперсионная зависимость в области коротких длин волн ($\lambda < 1.0$ мкм) совпадает с зависимостью $D(\lambda)$ для МВС, оболочка которого полностью заполнена дырками с $d/\Lambda = 0.6$. С другой стороны, известно, что наличие депрессированной оболочки в силу больших потерь на вытекание первой высшей моды приводит к существенному частотному сдвигу отсечки в область коротких длин волн [10]. При малой толщине депрессированной оболочки ($r_{cl}/r_{core} < 2$) эффективная длина волны отсечки МВС определяется разностью показателей преломления сердцевин и внешней оболочки.

Следует отметить, что структуры данного типа могут формироваться непосредственно в круглых кварцевых опорных трубах с использованием капилляров с различными внешними и внутренними диаметрами. На рис.9 приведены поперечное сечение такой сборки и распределение эффективного показателя преломления. Отметим, что сборка МВС в круглой кварцевой трубе позволяет существенно упростить технологический процесс последовательного формирования заготовок и процесс перетяжки заготовок в одномодовый световод. На рис.10 по-

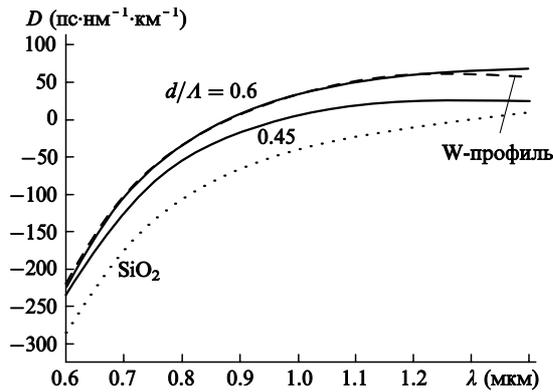


Рис.8. Расчетные зависимости хроматической дисперсии для МВС со ступенчатым профилем при $d/\Lambda = 0.45$ и 0.6 , а также для МВС с W-профилем распределения показателя преломления. Пунктирная кривая – $D(\lambda)$ в кварцевом стекле.

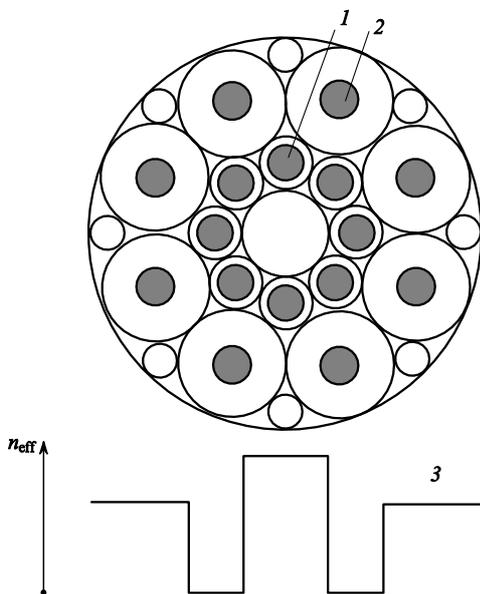


Рис.9. Поперечное сечение МВС с послойной укладкой капилляров с различными внутренними и внешними диаметрами: 1 – $d/\Lambda = 0.6$; 2 – $d/\Lambda = 0.45$; 3 – распределение эффективного показателя преломления в световоде с W-профилем.

казано еще одно возможное поперечное сечение такой структуры; наличие в слое 12 капилляров позволяет получить более равномерное распределение поля в азимутальном направлении. Отметим, что использование капилляров с различными внутренними и внешними диаметрами во внешней оболочке позволяет формировать МВС с более сложным профилем показателя преломления в оболочке, чем простые W-профили. Это особенно важно с точки зрения выбора профиля показателя преломления микроструктурного волоконного световода, обладающего уплощенной кривой хроматической дисперсии в широком спектральном диапазоне (0.8–1.7 мкм).

В заключение следует отметить, что использованный в настоящей работе метод определения волноводных характеристик МВС на основе решения скалярного волнового уравнения является приближенным. Погрешность данного метода, как было показано в [3], невелика в области коротких длин волн и при относительно малых размерах отверстий ($d/\Lambda < 0.35$). Рассчитанные в настоя-

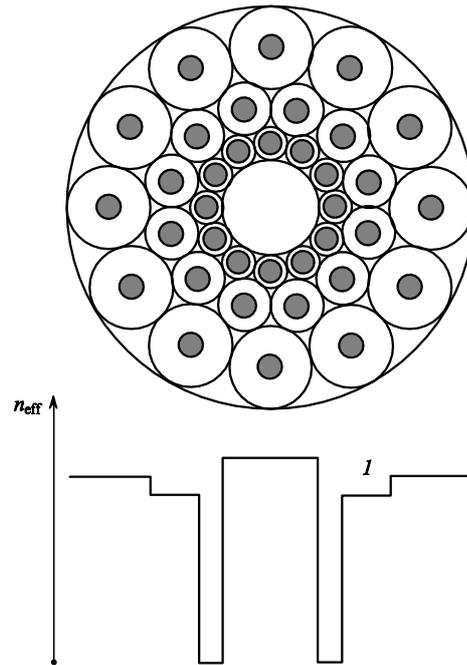


Рис.10. Поперечное сечение МВС со сложным распределением профиля показателя преломления (1 – распределение эффективного показателя преломления).

щей работе дисперсионные кривые при больших размерах дырок ($d/\Lambda \approx 0.6$) хорошо согласуются с более точными методами расчета [3, 5] и экспериментальными данными [11] в области коротких длин волн ($\lambda < 1.0$ мкм). Основное расхождение наших результатов с данными более точных методов наблюдается в области длин волн, превышающих 1.2 мкм.

Таким образом, в настоящей работе на основе метода эквивалентного ступенчатого профиля определены основные волноводные характеристики дырчатых одномодовых световодов. Предложены структуры дырчатых световодов с W-профилем распределения показателя преломления. Показано, что в данных структурах возможно смещение нуля хроматической дисперсии в область коротких длин волн ($\lambda_0 \approx 0.8$ мкм) с сохранением одномодового режима распространения. Предложен также ряд структур МВС со сложным распределением профиля показателя преломления и с возможностью формирования сборок этих структур в круглых кварцевых трубках.

1. Желтиков А.М. *УФН*, **170**, 1203 (2000).
2. Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **22**, 961 (1997).
3. Monro T.M., Richardson D.J., Broderick N.J.R., Bennett P.J. *J. Lightwave Technol.*, **17**, 1093 (1999).
4. Ferrando A., Silvestre E., Miret J.J., Andres P. *Opt. Lett.*, **24**, 276 (1999).
5. Brechet F., Marcou J., Pagnoux, Roy P. *Opt. Fiber Technol.*, **6**, 181 (2000).
6. Ghosh R., Kumar A., Meunier J.-P., Marin E. *Opt. Quantum Electron.*, **32**, 963 (2000).
7. Geckeler S. *Siemens Forsch.-u. Entwickl.-Ber.*, **14**, N. 3, 89 (1985).
8. Fleming J.W. *Appl. Opt.*, **23**, 4486 (1984).
9. Белов А.В., Курков А.С. В сб. *Труды ИОФАН* (М.: Наука, 1990, с.49).
10. Kawakami S., Nishida S., Sumi M. *Proc. IEE*, **123**, 586 (1976).
11. Ouzounov D., Homoelle D., Zipfel W., Webb W.W., Gaeta A.L., West J.A., Fajardo J.C., Koch K.W. *Opt. Commun.*, **192**, 219 (2001).