

## СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДНЫХ ПЕРЕХОДНИКОВ

**Введение**

Плавное сужение волокон уменьшает потери, обусловленные отражением и излучением. Это широко используемый прием для изменения распределения поля моды при низких потерях. Плавно суженный ФК волновод и суженный ФК планарный волновод на эффекте фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) обладают потенциалом для существенного уменьшения длины сужения и восстановления первоначальной формы распределения поля моды при низких потерях [1]. Соблюдение плавности в ФК волноводных сужениях является важным условием для уменьшения потерь в них и (или) длины сужения.

Плавные переходы на основе оптических микроструктурных волокон (МВ) [1] характеризуются возможностью сохранения распределения поля волноводной моды. Значительное ограничение оптического поля, обеспечиваемое МВ с большим коэффициентом заполнения, может быть использовано для существенного уменьшения размеров пятна, излучаемого типичным ступенчатым оптическим волокном (СОВ). Конические переходы на основе МВ могут быть эффективны при использовании в обоих направлениях распространения волны.

Также такие плавные сужения на основе ФК могут быть использованы для управления дисперсией [2] и они позволяют при большом оптическом ограничении сохранять характеристики моды [3].

Плавно суженные ФК волокна (ФК переходники) и планарные ФЗЗ переходники могут также применяться для существенного преобразования распределения поля проходящей волны с низкими потерями без возникновения проблем, характерных для волоконных переходников со ступенчатым профилем показателя преломления [1]. В то же время такие переходники на фотонных кристаллах являются недостаточно исследованными. Распределения полей были, к примеру, исследованы в работе [4]. Но потери в различных типах переходников и величины пропускания исследованы недостаточно. Для выявления всего потенциала таких переходников необходимо их более детальное исследование.

Цель данной работы – численное исследование влияния размеров переходников на величину потерь оптической волны, проходящей через ФК и ФЗЗ переходники. Результаты вычислений для обычного переходника, ФК переходника и ФЗЗ переходника сравнены и проанализированы.

**Модель расчетов**

Поставленная задача решалась методом конечных разностей во временной области (КРВО) [5]. Данный метод является строгим решением уравнений Максвелла и не использует ни приближений, ни теоретических ограничений. Этот метод широко используется при численных исследованиях в интегральной оптике, особенно в случаях, когда невозможно получить адекватные решения с помощью метода распространения пучков, в связи со сложной геометрией структуры. Так как КРВО метод является прямым решением уравнений Максвелла, то учитывает намного больше эффектов, нежели решения монохроматического волнового уравнения.

Исследования проводились для волоконных (рис. 1) и для планарных (рис. 4) переходников. В данной работе рассмотрены три типа переходников: первый – обычный переходник (волоконный (рис. 2) и планарный (рис. 4)), второй – ФК переходник (волоконный (рис. 3) и планарный (рис. 5)) и третий – ФЗЗ переходник (планарный (рис. 5)).

*Обычный переходник* представляет собой участок сужения оптического планарного волновода со ступенчатым ППП (рис. 4) или же ступенчатого волокна (рис. 2). Материалом сердцевин и оболочки является оксид кремния с показателями преломления равными 1.46 и 1.45 соответственно. Распространение света в нем происходит за счет полного внутреннего отражения.

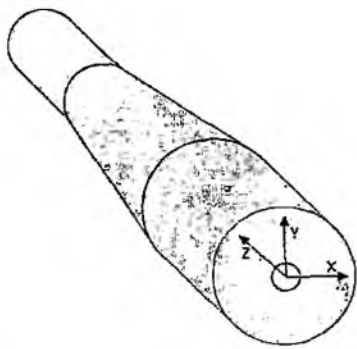


Рис. 1



Рис. 2

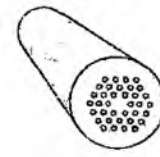


Рис. 3

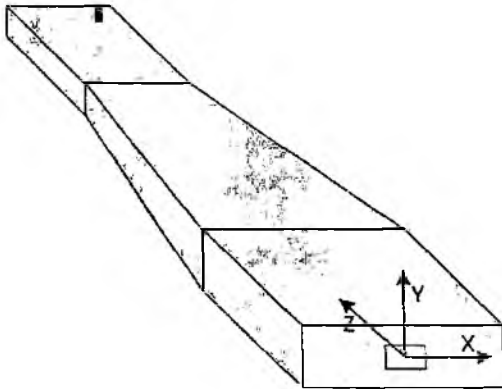


Рис. 4



Рис. 5

Второй тип волоконного переходника на основе ФК представляет собой сужение ФК волокна или так называемого микроструктурного волокна (МВ) (далее этот тип переходника будет называться волоконный ФК переходник, рис. 3). Основным материалом является оксид кремния с показателем преломления равным 1,46 с воздушными цилиндрическими отверстиями, направленными параллельно направлению распространения волны. В этом переходнике также используется эффект полного внутреннего отражения. Периодичность ФК в оболочечной области переходника позволяет перейти в моделировании на гомогенную среду с эффективным показателем преломления [6 – 8], что упрощает моделирование переходника, сокращает время расчетов распределения электромагнитного поля и упрощает анализ его свойств, а именно, его волноводных характеристик. Можно лучше понять волноводные свойства МВ на основе применения теории обычных волноводов (эффект полного внутреннего отражения) для рассмотрения оболочечной ФК области МВ, как гомогенной среды с эффективным показателем преломления [7, 9]. При введении эффективного показателя преломления трехмерный переходник можно свести к двумерному случаю [6, 8, 10, 11]. Такой метод гомогенизации периодических сред может быть применен при моделировании широкого круга структур интегральной и волоконной оптики – таких как волноводы, переходники, разветвители и т.д. [5]. Таким образом, в данной работе ФК переходник заменяем его эффективной моделью, которая имеет эффективный показатель преломления ФК оболочечной области и эффективный радиус сердцевины. Последний был получен в работе [8].

Показатель преломления оболочки (рис. 6) в эффективной модели ФК переходника экспоненциально уменьшается при сужении и имеет ориентировочно величины от 1,455 в широкой части до 1,425 в узкой части [9], т.е. разница показателей преломления оболочки и сердцевины увеличивается к выходу переходника и поэтому должно увеличиваться оптическое ограничение моды. Величины показателей преломления в широкой части также зависят от собственной ширины входа переходника, выход переходника остается неизменным.

На рис. 6 видно, что для больших входных радиусов сердцевины эффективный показатель преломления больше в начальной части ФК переходника. На выходе переходника величины эффективного показателя преломления становятся одинаковыми, так как все ФК переходники

имеют одинаковый радиус и, соответственно, одинаковые параметры ФК в оболочечной области. Как хорошо известно, размер сердцевинки волноводных структур на основе ФК зависит от ФК геометрии, т.е. зависит от диаметра отверстий, постоянной решетки и их отношения. Так как сердцевинка получена удалением одного ряда отверстий в центре и соответственно размер сердцевинки будет прямо пропорционален двойной величине постоянной решетки. Если изменить выше перечисленные геометрические параметры, то изменится размер сердцевинки (рис. 8). Эффективный размер сердцевинки для определенной геометрии был найден, как было описано выше, т.е. в эффективной модели такой показатель преломления оболочки (ФК) был найден, так же, как и геометрические параметры ФК и эффективный размер сердцевинки, для которых поперечное распределение основной моды имеет те же размеры, и затухание имеет те же величины, как в эффективной модели, так и в оригинальной ФК структуре.

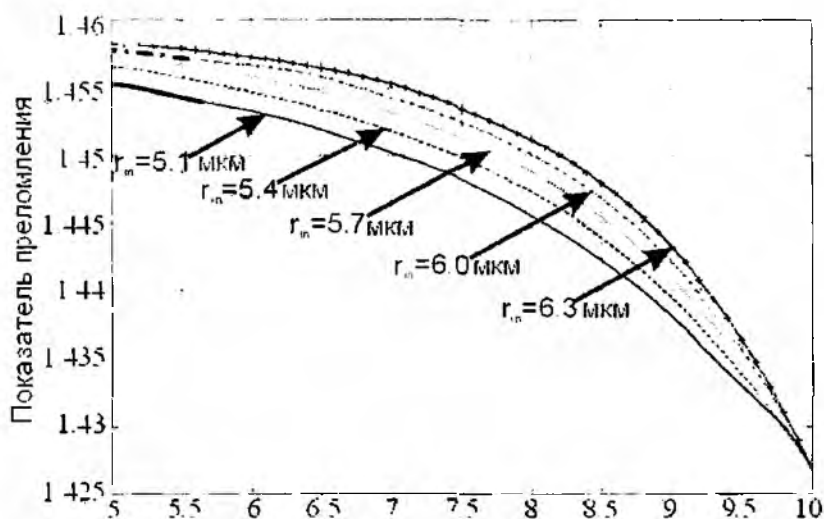


Рис. 6

Планарный переходник на основе ФК представляет собой сужение планарного ФК волновода (далее этот тип переходника будет называться планарный ФК переходник, показанный на рис. 5). Область сердцевинки имеет форму переходного участка. Основным материалом является оксид кремния с показателем преломления равным 1.46 с воздушными отверстиями, расположенными перпендикулярно направлению распространения волны. Этот переходник работает также на эффекте полного внутреннего отражения, которое происходит благодаря наличию разности показателей преломления сердцевинки и оболочки. Данный переходник исследовался без применения модели эффективного показателя преломления (рис. 5). В планарном случае нет нужды использовать данный метод, так как ресурсов вычислительной техники достаточно для расчетов двумерных задач. Поэтому исследовалась модель реальной структуры с отверстиями.

Третьим типом переходника на основе ФК является планарный волновод на основе ФК, в котором область дефекта имеет форму переходного участка (далее этот тип переходника будет называться планарный Ф33 переходник, рис. 5). Как видно из рисунка, конструкции ФК и Ф33 переходников схожи, но они различаются по физическим эффектам, лежащим в основе их функционирования. Основным материалом является оксид кремния с показателем преломления равным 1.46, со стержнями из арсенида галлия (показатель преломления равен 3.37), расположенными перпендикулярно направлению распространения волны. Этот переходник работает на эффекте Ф33, т.е. рабочая длина волны расположена в пределах Ф33 ФК в оболочечной области. Область оболочки Ф33 переходника, которая состоит из ФК, имеет следующие параметры: отношение между радиусом стержня и постоянной решетки  $r/\Lambda = 0.23$ , постоянная решетки  $\Lambda = 0.7$  мкм, радиус стержня  $r = 0.23$  мкм. Для рассматриваемого двумерного ФК (область оболочки Ф33 переходника) была рассчитана Ф33 (рис. 7).

На рис. 7 показана область существования ФЗЗ для исследуемого ФК (область, ограниченная кривыми). Как можно видеть, область оболочки ФЗЗ переходника имеет полную ФЗЗ для рабочей длины волны  $\lambda = 0.98 \text{ мкм}$  (точка на рис. 7).

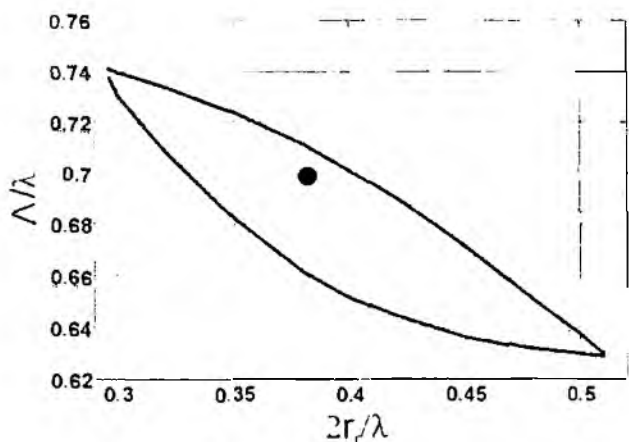


Рис. 7

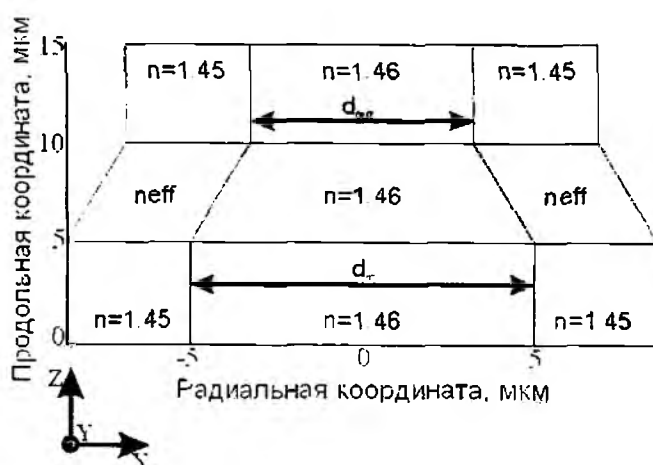


Рис. 8

Таким образом, все типы переходников имеют в качестве материала сердцевины оксид кремния (1,46), где и распространяется волна. Такой выбор материала обоснован тем, что он является базовым материалом для элементной базы современных волоконно-оптических систем связи.

Для всех типов переходников выходной радиус сердцевины равен 3,3 мкм. Длина переходников равна 5 мкм (рис. 8). В данной работе показаны результаты для переходников с входными радиусами сердцевины 5,1, 5,7, и 6,3 мкм.

Численное исследование трехмерных структур переходников представляет собой сложную задачу, ввиду относительно малых размеров ФК и сложности расчетов приводящих к большим затратам вычислительных ресурсов. Поэтому в данной работе введен ряд упрощений.

В предложенной модели рассматривались только аксиально-симметричные моды в случае волоконных переходников, что также позволило свести трехмерный случай к двумерному, так как аксиально-симметричные моды в любом сечении по оси волокна имеют одинаковое распределение поля. Рассматривалось двумерное продольное сечение вдоль оси симметрии структуры ( $z-x$  плоскость), например на рис. 8 показана общая схема переходника любого типа.

Время расчетов было дополнительно уменьшено благодаря сокращению радиальных размеров области оболочки, т.е. радиуса оболочки структуры (рис. 9) [9]. Это сокращение было применено благодаря использованию идеально согласованных граничных условий, используемых на краях структур [12], и это сокращение не повлияло на распределение электромагнитного поля, т.к. данные граничные условия характеризуются 100 % поглощением и нулевым отражением, что и позволяет моделировать структуры с бесконечными размерами [9]. Согласованные граничные условия на краях структуры имеют вид:  $n \times (\nabla \times E_z) - j\beta E_z = -2j\beta E_{y0}$ .

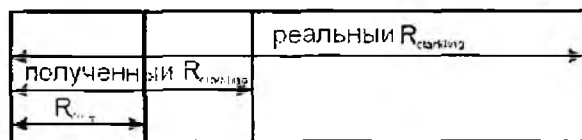


Рис. 9

### Результаты и обсуждения

В данной работе приведены результаты, полученные для рабочей длины волны  $\lambda = 0,98 \text{ мкм}$  [13]. Были найдены распределения полей поперечных электрических волн для трех входных радиусов сердцевины всех типов переходников. На рис. 10 – 12 показаны рас-

пределения полей в таких переходниках. Можно видеть результат взаимодействия волн, входящих и отраженных от стенок ФК переходника (рис. 11) и ФЗЗ переходника (рис. 12). С точки зрения волновой оптики переходник – это неоднородность волокна, и поэтому в них существует обмен энергией между модами. Как результат, имеет место взаимодействие и искажение поля в таких переходниках. Искажение может быть обнаружено по пикам энергии на выходе переходников, причем оно возрастает с возрастанием входного радиуса переходников. Этот эффект объясняется тем, что больший входной радиус означает больший угол переходника (принимая во внимание то, что выходной радиус неизменен). Поэтому угол падения входной волны возрастает по отношению к плоскости сердцевина/оболочка переходника. И это приводит к возрастанию и искажений и вытекания оптических волн.

Можно легко обнаружить на рис. 11 области ФК переходника, где происходит максимальная утечка излучения. ФК переходник с маленьким входным радиусом имеет преобладающее вытекание в начальной части переходника. Это можно объяснить тем, что минимум эффективного показателя преломления оболочки расположен в начале такого ФК переходника. Поэтому максимальная разница показателей преломления как раз в начальной части переходника, как показано на рис. 6, и поэтому меньшее ограничение оптического поля именно в этой части. Возрастание входного радиуса ФК переходника приводит к смещению продольного положения максимума утечки к конечной части переходника, что было подробно описано в предыдущем подразделе.



Рис. 10



Рис. 11



Рис. 12

В ФЗЗ переходнике наибольшие потери имеют место в начале и в конце переходника (рис. 12).

В обычном переходнике не наблюдаются существенные отражения излучения от стенок, так как сердцевина и оболочка этого переходника имеют малую разницу показателей преломления (рис. 10).

Для этих переходников были рассчитаны потери на участке от входа к выходу переходника. Потери были посчитаны на участке начало входного волокна – выход переходника. Потери были посчитаны как отношения логарифма интегралов мощности по радиальному сечению на выходе и входе переходников:  $\alpha = 10 \log \left( \frac{\int_{R1} P_{out}}{\int_{R2} P_{in}} \right)$ , где  $P_{out}$  – выходная мощность и  $P_{in}$  – входная мощность.

В таблице представлены данные таких расчетов потерь. Те же данные в виде графика представлены на рис. 13.

Радиус, мкм \ Потери, дБ	Обычный переходник	ФК переходник	ФЗЗ переходник
5.1	0.52	0.36	0.22
5.4	0.54	0.41	0.27
5.7	0.76	0.59	0.37
6.0	0.88	0.76	0.41
6.3	0.97	0.81	0.48

На рис. 13 сплошной линией показан ФЗЗ переходник, пунктирной – ФК переходник и штрихпунктирной – обычный переходник. Как можно видеть, потери возрастают при возрастании входного радиуса переходника (т.е. при возрастании угла перехода) для всех типов переходников.



Рис. 13

ФЗЗ переходник имеет наивысшее ограничение поля внутри и соответственно наименьшие потери вытекания.

### Выводы

Показано, что для того, чтобы излучение претерпевало меньшие потери и не образовывались моды высших порядков, необходимо меньшее отношение входной радиус переходника/длина (угол) переходника. Например, для ФЗЗ переходника при возрастании входного радиуса от 5,1 до 6,3 мкм (при неизменной длине 5 мкм и выходном радиусе 3,3 мкм) величины потерь возрастают от 0,2 до почти 0,5 дБ, тогда как для ФК переходника это возрастание еще больше – от 0,36 до 0,8 дБ.

Впервые показано, что обычный переходник имеет большие потери, чем ФК переходник, и ФК имеет большие потери, чем ФЗЗ переходник. Таким образом, ФЗЗ переходник имеет самые низкие потери. Например, при входном радиусе переходников 5,1 мкм, выходном радиусе 3,3 мкм и длине 5 мкм величины потерь для обычного переходника – 0,52 дБ, ФК переходника – 0,36 дБ и ФЗЗ переходника – 0,2 дБ. Однако при этом ФЗЗ переходника имеет значительные искажения формы моды.

**Список литературы:** 1. Town G. E., Lizier J. T. Tapered holey fibers for spot-size and numerical-aperture conversion // *Optics Letters*. 2001. Vol. 26. № 14. P. 1042-1044. 2. Chandalia J.K., Eggleton B.J., Windeler R.S., Kosinski S.G., Liu X., Yu C. Adiabatic coupling in tapered air-silica microstructured optical fiber // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2001. Vol. 13, № 1. P. 52-54. 3. Soon Ryong Park, Beom-hoan O. Novel design concept of waveguide mode adapter for low-loss mode conversion // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2001. Vol. 13, № 7. P. 675-677. 4. Дегтев А.В. Сравнение свойств обычных переходников, переходников на фотонных кристаллах и переходников на фотонной запрещенной зоне // *Радиотехника*. 2007. № 151. С. 253 – 258. 5. Scarmozzino R., Gopinath A., Pregli R. Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2000. Vol. 6, № 1. P. 150-162. 6. Иванов П.С., Угольц Х., Лысак В.В., Сухойванов И.А. Фотонные кристаллы в оптических коммуникационных системах // *Радиоэлектроника и информатика*. 2002. №2. С. 34-38. 7. Иванов П.С., Угольц Х., Шулика А.В., Кублик А.В., Сухойванов И.А. Локализация света в дефекте полупроводникового фотонного кристалла // *Радиоэлектроника и информатика*. 2002. №3. С. 42-45. 8. Sukhoivanov I. A., Kublik A. V., Rojas-Laguna R., Guryev I. V., Dyogtyev A. V., Ivanov P. S. Modified effective-index model for study of holey-waveguide optical components // *Proc. of SPIE: LFNM'2003: 5<sup>th</sup> International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling*. 2004. Vol. 5582. P. 230-237. 9. Sukhoivanov I.A., Rojas-Laguna R., Andrarde-Lucio A., Dyogtyev A. V., Ivanov P.S. Waveguide couplers formed by tapered photonic crystal fiber // *Proc. of SPIE: PhotonicsEurope'2004*. 2004. Vol. 5450. P. 231-239. 10.

Ivanov P.S., Unold H.J., Michalzik R., Maehnss J., Ebeling K.J., Sukhoivanov I.A. Application of photonic crystal effective index model for defining single-mode conditions in PCSELS // Proc. LEOS Annual Meeting, Glasgow (Scotland). 2002. P. 221-222. 11. Ivanov P.S., Unold H.J., Michalzik R., Maehnss J., Ebeling K.J., Sukhoivanov I.A. Theoretical study of cold-cavity single-mode conditions in vertical-cavity surface-emitting lasers with incorporated two-dimensional photonic crystals // J. Opt. Soc. Am. 2003. №12. С. 2442–2447. 12. Andrew R. Weily, Levente Horvath, Karu P. Esselle Barry C. Sanders. Performance of PMI. absorbing boundary conditions in 3D photonic crystal waveguides // Microwave and Optical Technology Letters. 2004. Vol. 40, № 1. P. 1-3. 13. Sukhoivanov I.A., Dyogtyev A.V., Ivanov P.S. Comparison of the tapered photonic crystal fiber waveguide couplers and conventional couplers // Proc. 6<sup>th</sup> International conference on transparent optical networks (ICTON'2004). Wroclaw (Poland). 2004. P. 298-301.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редакцию 26.06.2008*