

УДК 681.7

**УСЛОВИЯ ДОСТИЖЕНИЯ ОДНОМОВОДОГО РЕЖИМА В ПОЛЫХ
АНТИРЕЗОНАНСНЫХ СВЕТОВОДАХ С БОЛЬШОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ
ПЛОЩАДЬЮ МОДОВОГО ПОЛЯ**

Ананьев В.А. (Акционерное общество «Научно-производственное объединение
Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Университет ИТМО),

Демидов В.В. (Акционерное общество «Научно-производственное объединение
Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»)

**Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор
Никоноров Н.В.** (Университет ИТМО)

В работе приведены результаты исследований модового состава излучения в полых антирезонансных световодах с большой эффективной площадью модового поля и системой из шести несоприкасающихся капилляров оболочки на основе построения численных моделей в программной среде COMSOL Multiphysics. Показано, что ключевым фактором достижения одномодового режима распространения излучения в ближней и средней инфракрасных (ИК) областях спектра является высокий уровень затухания первой высшей моды, обусловленный фазовым согласованием с фундаментальной модой оболочки.

Введение. На протяжении последних десяти лет значительное внимание разработчиков в области волоконно-оптической техники сосредоточено на создании и всестороннем изучении кварцевых микроструктурированных световодов с полый сердцевинной, принцип локализации электромагнитного излучения в которых основан на эффектах наличия и отсутствия антирезонансных явлений в оболочке из ограниченного числа капилляров. Это обусловлено рядом преимуществ таких световодов относительно аналогов, сердцевина которых выполнена из стекла, а именно, возможностью передачи высокоинтенсивных лазерных импульсов, управления дисперсией и нелинейностью, функционирования в средней инфракрасной области спектра.

Одной из актуальных задач рассматриваемого направления волоконной оптики является получение в полых антирезонансных световодах устойчивого одномодового режима распространения излучения, обеспечивающего однозначную интерпретацию передаваемых световых потоков и удобство их пространственного согласования с источниками и приемниками излучения. Способы достижения в таких световодах одномодового режима базируются на выборе геометрических параметров сердцевины и капилляров оболочки, усиливающих делокализацию высших мод сердцевины за счет их фазового согласования с интенсивно затухающими модами оболочки. Целью настоящей работы было исследование упомянутого процесса применительно к оптическим элементам с большой эффективной площадью модового поля, имеющих возможность передачи интенсивных световых потоков в ближней и средней ИК областях спектра.

Основная часть. В качестве базового объекта для исследования использовался полученный ранее квазиодномодовый световод из кварцевого стекла с сердцевинной диаметром 46 мкм (эффективная площадь поля фундаментальной моды составила более 1000 мкм²) и оболочкой на основе шести несоприкасающихся капилляров. Толщина стенок капилляров составляла около 2,8 мкм, что обеспечивало существование, по меньшей мере, четырех спектральных областей с максимальным пропусканием оптического сигнала – вблизи длин волн 1,3, 1,6, 2,15 и 3,25 мкм.

Оценка эффективности фазового согласования наиболее конкурентной из группы высших мод (первой высшей моды) сердцевины и фундаментальной моды оболочки осуществлялась в программной среде COMSOL Multiphysics с применением метода конечных элементов. Для решения этой задачи были построены и численно проанализированы более двадцати кросс-секций полого антирезонансного световода с вариацией внешнего диаметра капилляров

оболочки (d_{out}) без изменения толщины их стенок, а также внутреннего диаметра опорной оболочки.

В результате проведенных численных экспериментов был установлен более интенсивный характер вытеснения электрического поля за пределы сердцевины по мере уменьшения отношения d_{out}/D (D – диаметр сердцевины), что нашло отражение в монотонном увеличении эффективной площади поля фундаментальной моды (S). В частности, для $d_{out}/D = 1,00$ $S = 432,6$ мкм², для $d_{out}/D = 0,74$ $S = 634,1$ мкм², для $d_{out}/D = 0,43$ $S = 1134,0$ мкм² на длине волны 1,3 мкм. Как оказалось, это обстоятельство справедливо и при смещении в область больших значений длины волны излучения. Так, для случая $d_{out}/D = 0,43$ $S = 1144,6$ мкм² на длине волны 1,6 мкм, $S = 1150,5$ мкм² на длине волны 2,15 мкм, $S = 1159,9$ мкм² на длине волны 3,25 мкм. Вместе с тем оптический элемент с геометрией, соответствующей наибольшему значению эффективной модовой площади, может не отвечать условию распространения только фундаментальной моды.

Для проверки последнего утверждения была дана оценка эффективности фазового согласования (равенства волноводных показателей преломления) направляемой первой высшей моды сердцевины и ненаправляемой фундаментальной моды оболочки. Оказалось, что фазовое согласование упомянутых модовых компонент происходит в том случае, если доля мощности фундаментальной моды оболочки (P_{clad}) составляет не менее 0,5 от суммарной в паре мод (P) ($d_{out} = 27,4$ мкм и $P_{clad}/P = 0,516$ для $\lambda = 1,3$ мкм, $d_{out} = 27,6$ мкм и $P_{clad}/P = 0,635$ для $\lambda = 3,25$ мкм). С позиции выбора геометрических параметров световода этот критерий отвечает неравенству $0,82 < d_{out}/D < 0,88$. Добавим, что условию фазового согласования в паре «фундаментальная мода оболочки – первая высшая мода сердцевины» соответствует наибольшее из вычисленных значений оптических потерь, а именно, 25 дБ/м на $\lambda = 1,3$ мкм и 35 дБ/м на $\lambda = 3,25$ мкм. Это эквивалентно затуханию мощности первой высшей моды более чем в 300 раз на участке световода длиной 1 м, что фактически способствует поддержанию режима передачи только фундаментальной моды сердцевины в отрезках длиной даже в несколько десятков сантиметров.

Выводы. В результате комплексного численного анализа серии полых антирезонансных световодов, построенных на основе системы из шести несоприкасающихся капилляров с толщиной стенки 2,8 мкм в оболочке было установлено, что одномодовый режим передачи излучения, обусловленный фазовым согласованием первой высшей моды сердцевины и фундаментальной моды оболочки, достигается при значении внешнего диаметра капилляров 27,45 мкм. При этом значение эффективной площади поля фундаментальной моды составляет 531 мкм². Для всех остальных геометрических конфигураций световода характерно нарушение одномодового режима за счет наличия примеси мощности первой высшей моды, затухание которой сопоставимо с затуханием фундаментальной моды.

Ананьев В.А. (автор)

Подпись

Никоноров Н.В. (научный руководитель)

Подпись