

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
СМЕШЕНИЯ-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЛАВЛЕННЫХ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯХ-
СУММАТОРАХ НА ОСНОВЕ МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ
СВЕТОВОДОВ**

*Перчевский А. А., студент; Демьяненко П. А., к.т.н., доцент,
Национальный технический университет Украины "Киевский политех-
нический институт", Киев, Украина*

**COMPUTER SIMULATION OF THE PROCESSES OF MIXING-DISTRIBUTION
OF RADIATION IN FUSED FIBER-OPTIC VALVES-ADDERES ON THE BASIS OF
MULTIMODE OPTICAL FIBERS**

*Perchevskiy Oleksii, Student Demianenko Petro, PhD, Associate Professor
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

Вступ

Формирование биконической области (БКО) является ключевым звеном в цепи технологических операций при изготовлении многопортовых сплавленных волоконно-оптических распределителей-сумматоров (ВОРС) оптического излучения на основе жгута из волоконных световодов (ВС). Именно на этой стадии закладываются основные параметры будущих ВОРС: величина собственных потерь и неравномерность распределения излучения, поступающего от входных портов, между выходными портами. Увеличенный, по сравнению с ВОРС других типов, уровень внутренних потерь, а также заметная неравномерность распределения излучения между выходными портами сплавленных ВОРС обусловлены спецификой процессов распространения излучения в БКО. Для получения высокого качества ВОРС его БКО должна обеспечивать:

- эффективный выход излучения из световедущих сердечников ВС входных портов в общий объем БКО на участке ее сужения;
- эффективный захват излучения световедущими сердечниками ВС выходных портов из общего объема БКО на участке ее расширения;
- многократное отражение излучения, распространяющегося внутри БКО, от границ "БКО-воздух" без выхода его за пределы БКО.

Из общих соображений следует, что геометрические параметры БКО должны соответствовать одновременно противоречивым требованиям: крутизна спада (нарастания) образующей БКО вдоль ее оси должна быть достаточно значительной, чтобы обеспечить надежный выход излучения из световедущих сердечников ВС на участке сужения БКО и следующий

надежный захват излучения сердечниками ВС на участке ее расширения. В то же время, она должна быть не такой большой, чтобы избежать набора критического угла лучами, после выхода их из сердечников ВС входных портов при следующих отражениях от границы "БКО-воздух".

В силу сложности механизма протекания процессов внутри БКО, их детальный (количественный) анализ весьма затруднен. Действительно, с одной стороны, поток оптического излучения в волоконном световоде (ВС) может быть интерпретирован как распространение в диэлектрическом волноводе электромагнитных волн весьма коротких длин (так называемый "волновой" подход). При этом, сопоставляя длину волны оптического излучения с размерами БКО ($\lambda \ll \chi$, где λ — длина волны, а χ — характеристический размер БКО, например, ее длина), при использовании волнового подхода к рассмотрению нашей задачи становится ясной проблема учета граничных условий (границ БКО, играющих, очевидно, определяющую роль в процессе распространения в ней излучения). В то же время, основные детали механизма распространения потока оптического излучения внутри БКО могут быть полностью поняты и описаны в рамках геометрической оптики в "лучевом" представлении потока излучения — ("лучевой" подход).

Критерием корректности использования того или иного подхода для описания явлений распространения излучения в ВС является так называемый V -параметр или нормализованная частота [1]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (1)$$

где a — радиус световедущего сердечника ВС; n_2 — показатель преломления материала оболочки ВС; n_1 — показатель преломления материала сердечника ВС; $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ — относительная разность показателей преломления.

Если $V \geq 10$, то лучевой подход дает практически точные результаты при рассмотрении большинства явлений распространения излучения в ВС [2]. При $V < 10$ лучевой подход уже не может быть использован для анализа распространения излучения в ВС и в этом случае требуется полный электромагнитный анализ, основанный на решении уравнений Максвелла.

Оценка величины V для стандартных одно- и многомодовых ВС типа "кварц-кварц", радиусы сердечников a для которых составляют, соответственно, 2,5 и 25 мкм, величина $\Delta \cong 0,01$, а показатель преломления материала сердечника $n_1 \cong 1,48$, дала значения 3,2 и 32. Это значит, что в нашем случае лучевой подход вполне может быть применен при рассмотрении процессов распространения излучения в БКО, сформированной на основе жгута из многомодовых ВС. В то же время, рассмотрение процессов распространения излучения в БКО, сформированной на основе жгута из од-

номодовых ВС, может вестись корректно только на основе решений уравнений Максвелла.

Таким образом, исследование процессов распространения излучения внутри БКО с целью установления ее оптимальных (с точки зрения параметров ВОРС) геометрических параметров и выработки на основании такого рассмотрения требований к параметрам технологического процесса формирования БКО, можно проводить отдельно для БКО на основе жгута из одномодовых ВС (“волновой” подход) и для БКО на основе жгута из многомодовых ВС (“лучевой”, как более простой в реализации, подход). При этом представляется весьма полезным провести сопоставление результатов, полученных при разных подходах рассмотрения поставленной задачи. В данной статье рассмотрено построение компьютерной модели для рассмотрения процессов смещения-распределения излучения в сплавных БКО ВОРС на основе многомодовых ВС.

Построение модели и алгоритма

Поиск оптимальных количественных характеристик геометрических параметров БКО, которым соответствуют оптимальные параметры ВОРС на их основе, решался путем математического моделирования процессов в БКО на основе многомодовых ВС с помощью персонального компьютера. В основу рассмотрения была положена лучевая модель распространения излучения в БКО.

Для проведения моделирования необходимо задаться уравнением кривой, описывающей границу БКО, на которой осуществляется полное внутреннее отражение излучения внутри БКО. Поскольку БКО формируется путем механического осевого растяжения расплавленного участка жгута ВС, то в качестве такого уравнения принимаем уравнение цепной линии, так как именно цепной линией описывается в таких случаях профиль свободной поверхности жидкости, соответствующий минимуму ее поверхностной энергии [3]. Однако, применять уравнение цепной линии в его каноническом виде (в каком оно обычно приводится в справочной литературе) в нашем случае не представляется возможным, поскольку не учитывает растяжение, поэтому мы его несколько модифицировали:

$$y(x) = k \cdot \cosh \frac{x}{m}, \quad (2)$$

где k и m некоторые постоянные коэффициенты, которые для нашего конкретного случая могут быть определены из следующих условий:

$$R = k \cdot Ch \frac{A_0}{m}; \quad R^2 A_0 = \int_0^A y^2 dx, \quad (3)$$

где R — радиус жгута ВС; $2A_0$ — длина расплавленного участка жгута ВС; $2A$ — длина сформированной БКО.

Первая из условий (3) является отражением требования объединения ("сшивание") границ нерасплавленного участка жгута ВС с началом (концом) БКО. Вторая — является требованием равенства (неизменности) объемов изначально расплавленной участка жгута и сформированной затем из нее БКО.

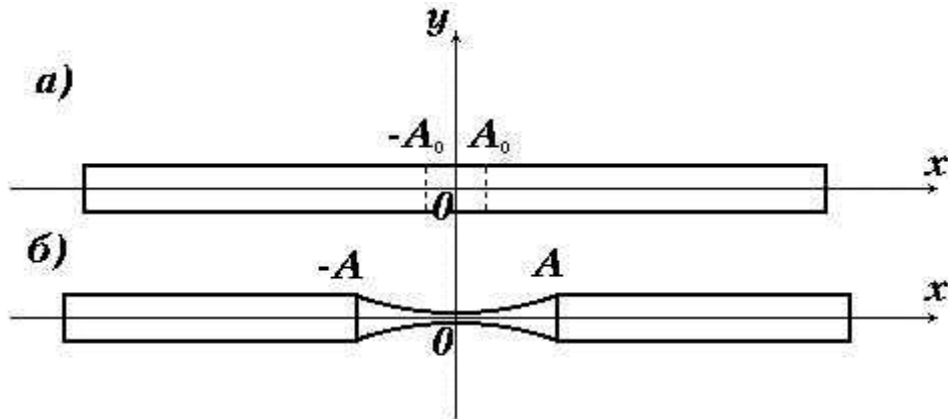


Рис.1. Схема формирования БКО
 а) жгут ВС с разогретым участком длиной $2A_0$;
 б) жгут ВС с растянутым участком длиной $2A$.

Определить коэффициенты k и m можно при совместном решении уравнений (3) однако, получаемые при таком решении уравнения, трансцендентны относительно искомых коэффициентов и не позволяют выразить последние в явном виде через известные параметры (A , A_0 , R). Так, например, выражение, содержащее коэффициент m , имеет нижеследующий вид и не может быть разрешенным относительно m в обычных (известных) функциях:

$$\frac{A_0}{A} = \frac{\frac{2A}{m} + \text{Sh} \frac{2A}{m}}{\frac{2A}{m} \left(1 + \text{Ch} \frac{2A}{m} \right)}, \quad (4)$$

Для разрешения такого трансцендентного уравнения введем новую, вспомогательную, функцию $\Gamma(z)$:

$$\Gamma(z) = \frac{z + \text{Sh}z}{z(1 + \text{Ch}z)}, \quad (5)$$

Из сравнения выражений (4) и (5), видно, что аргумент новой функции $z = 2A/m$, а само значение функции $\Gamma(z) = A_0/A$. Очевидно, обратная ей функция запишется в виде: $\Gamma(A_0/A) = z$. Задать эти функции можно различными способами. В нашем случае удобнее всего задать эти функции в виде подпрограммы персонального компьютера в общей программе моделирования процессов в БКО. Определив функции Γ и Γ' для заданного соотношения A_0/A (величина, обратная кратности растяжения (удлинения) расплавленной зоны при формировании БКО), можно определить коэффициент m

($m=2A/z$), а подставив его значение в первое уравнение из условий (2), найти величину коэффициента k . После чего можно считать, что уравнение профиля БКО определено.

Аналогичным образом определялись также и профили световедущих сердечников отдельных ВС внутри БКО. При этом исходим из того очевидного факта, что в силу высокой вязкости кварца за время формирования БКО не успевают произойти сколь-нибудь заметного перемешивания материала ВС внутри БКО, которое могло бы привести к утрате индивидуальности областей сердечников и оболочек. Это позволяет считать корректным допущение о сохранении внутри БКО внутренней структуры (световедущие сердечники + светоизолирующие оболочки), деформированной, естественно, при формировании БКО согласно с уравнениями соответствующих цепных линий.

Моделирование процесса смешения-распределения излучения в сплавном ВОРС проводилось для БКО, сформированной на основе жгута из семи ВС, как варианта с наиболее геометрически совершенной (плотной) упаковкой ВС в жгуте. При этом мы считаем, что полученные результаты с достаточной степенью достоверности могут быть распространены и на ВОРС с другими числами портов. Моделирование производилось только для так называемых "меридиональных" лучей распространяющихся в плоскости, содержащей ось симметрии БКО, и проходящих, соответственно, через оси симметрий трех ВС жгута, что реально соответствует семи-портовому ВОРС.

Алгоритм расчета состоял в следующем. Для заданной длины разогретого участка жгута ($2A_0$) и его величины после растяжения ($2A$) рассчитывались коэффициенты k и m , входящие в уравнение цепной линии (2) и тем самым определялись уравнения для границ БКО и границ световедущих сердечников ВС. Затем в верхнюю точку верхнего световедущего сердечника "направлялся луч" (записывалось уравнение прямой, вдоль которой он распространяется), приходящий из недеформированной области световедущего сердечника ВС под предельным апертурным углом и исследовалось его поведение внутри БКО (отражение-преломление на границах "световедущий сердечник-светоизолирующая оболочка ВС", отражение-преломление на границах "БКО-воздух") вплоть до значения координаты $x=A_0$. При этом регистрировались (запоминались) результаты прохождения луча: вышел ли он за пределы БКО или на выходе из БКО попал в светоизолирующую оболочку ВС, световедущим сердечником какого ВС он захватился на расширяющемся участке БКО.

После этого на определенную величину (с шагом в 1°) изменялись (в пределах апертурного угла внутри ВС) углы вхождения луча в БКО и производился расчет прохождения каждого луча из указанного "веера" с фиксацией результатов прохождения каждого из них. Указанная процедура

расчета полностью повторялась для каждой новой точки вхождения луча в сердечник, получаемой последовательным смещением исходной точки вдоль диаметра сердечника ВС всякий раз с шагом в 0,1 его величины.

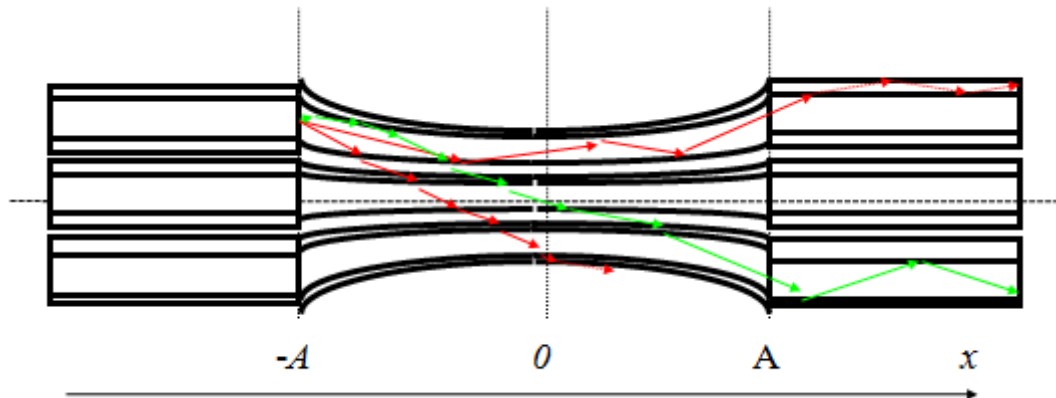


Рис. 2. Схема моделирования процессов распространения излучения в БКО

- луч, прошедший с входного порта в выходной;
- луч, не прошедший из входного порта в выходной.

После "просмотра" таким образом первого (верхнего) световедущего сердечника ВС входного порта, определялись:

- коэффициенты передачи излучения из него в сердечники ВС выходных портов k_{11} , k_{12} , k_{13} . Для этого определялись отношения количеств лучей, захваченных каждым из световедущих сердечников ВС на выходе из БКО, к числу лучей, вводимых в БКО со стороны входных портов по световедущему сердечнику первого ВС;

- собственные потери излучения в БКО α_1 . Для этого определялось отношение суммарного количества лучей, не захваченных световедущими сердечниками ВС на выходе из БКО (это лучи, вышедшие, из объема БКО в воздух, а также лучи, прошедшие сужающуюся часть ("перетяжку") БКО, но не захваченные световедущими сердечниками, а попавшие в светоизолирующие оболочки ВС выходных портов) к числу лучей, вводимых в БКО первым световедущим сердечником ВС входного порта.

После такого "просмотра" первого (верхнего) световедущего сердечника ВС, переходили ко второму (среднему) ВС, "просматривая" его сердечник только до середины (до $y=0$), поскольку, в силу симметрии БКО, результаты моделирования для верхней и нижней половин БКО будут идентичными.

На этом расчет ВОРС с БКО данной геометрии, определяемой величиной расплавленного участка жгута ВС и степенью его растяжения, считается законченным.

Для определения оптимальных геометрических параметров БКО весь цикл расчетов повторяется для других значений величин A и A_0 , определяющих область расплавления и степень растяжения БКО. Предельно воз-

можная величина растяжения при формировании БКО в каждом конкретном случае определяется допустимым сужением БКО в центральной ее части (в области перетяжки) до величины диаметра, при котором еще возможен одномодовый режим прохождения через него излучения. Практически минимальная величина диаметра БКО в области перетяжки принималась нами равной 5 мкм.

Оптимальные значения величин A и A_o , задающих геометрические параметры БКО, можно определить анализируя полученные результаты. Критерием оптимальности служат, с одной стороны, минимальные значения коэффициентов внутренних потерь излучения α_i в ВОРС на основе данной БКО и, с другой стороны, минимальный разброс коэффициентов передачи излучения k_{ij} в пределах одного и того же ВОРС с данной геометрией БКО.

Результаты моделирования

В результате моделирования процессов в БКО, сформированной на основе жгута из многомодовых ВС при условии пошагового изменения основных технологических параметров БКО (длина участка разогрева жгута ВС и кратность его растяжения), была получена таблица экспериментальных данных. Данная таблица представляет собой набор численных значений (выраженных для большей наглядности при обработке результатов в относительных единицах, в процентах) основных параметров ВОРС на основе БКО данной геометрии: $k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{21}, k_{22}, \alpha_1, \alpha_{1B}, \alpha_2, \alpha_{2B}$, где:

k_{ij} — коэффициент передачи излучения из ВС i -го входного порта в ВС j -го выходного порта;

α_i — коэффициент потерь, обусловленный уходом излучения в светоизолирующую оболочку при возбуждении ВС i -го входного порта;

α_{iB} — коэффициент потерь, обусловленный выходом излучения за пределы БКО при возбуждении ВС i -го входного порта;

Выводы

Проведенную работу можно рассматривать как первый шаг к созданию более общей модели. По отношению к такой модели, рассматриваемая модель является только ее "плоским разрезом". При дальнейшем переходе к объемной модели, в ней, очевидно, необходимо учитывать также поведение в БКО как тангенциальных лучей собственно ВС, так и сделать модель с возможностью рассмотрения тангенциальных лучей внутри самой БКО. Такая модель позволит более полно учитывать особенности реальной конструкции БКО и с большей надежностью определять оптимальные параметры технологического цикла формирования БКО, которые обеспечивали бы производство качественных ВОРС.

Проанализировав коэффициенты $k_{ij}, \alpha_i, \alpha_{iB}$, для 121 БКО с разными значениями величин A и A_o , можно констатировать: для жгута, скрученного с семи стандартных многомодовых ВС типа "кварц-кварц" со ступенчатым

профилем показателя преломления и с диаметрами световодящего сердечника и светоизолирующей оболочки 50 мкм 125 мкм, соответственно, оптимальная длина расплавленной области жгута лежит в пределах от 2 до 3,5 мм. При этом оптимальная величина кратности механического растяжения расплавленной области лежит в пределах от 3 до 4.

Литература

1. Ghatak A. K. Graded Index Optical Waveguides: A Review / A. K. Ghatak, K. Thyagarajan // Prog. in Optics. Vol.XVIII. Amsterdam, North Holland, 1980. — 64p.
2. Волоконная оптика и приборостроение / М. М. Бутусов, С. Л. Галкин, С. П. Орбинский, Б. П. Пал; Под общ.ред.М. М. Бутусова. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987. — 328 с.
3. Зельдович Я. Б. Элементы прикладной математики / Я. Б. Зельдович, А. Д. Мышкис — М. : Наука, 1972, — с.420.

References

1. Ghatak A. K., Thyagarajan K. Graded Index Optical Waveguides: A Review//Prog. in Optics. Vol.XVIII. Amsterdam, North Holland, 1980. 64p.
2. Volokonnaia optika i priborostroenie/M.M.Butusov, S.L.Galkin, S.P.Orobinskii, B.P.Pal; Pod obshch.red.M.M.Butusova. - L.: Mashynostroenie. Leningr. otd-nie, 1987. - 328 s.
3. Zeldovich Ya. B., Myshkis A. D. Elementy prikladnoi matematiki. - M.: Nauka, 1972, 420. s.

Перчевський О. О., Дем'яненко П. О. Комп'ютерне моделювання процесі змішування-розподілу випромінювання в сплавних волоконно-оптичних розподільників-суматорів на основі багатомодових волоконних світловодів. Викладено побудову математичної моделі і алгоритму комп'ютерної програми для аналізу процесів змішування-розподілу оптичного випромінювання в біконічній області зплавних волоконно-оптичних розподільників-суматорів на основі джгута із стандартних кварцевих волоконних світловодів. Проаналізовані критерії оптимальності геометричних параметрів БКО.

Ключові слова: біконічна область, волоконно-оптичні розподільники-суматори.

Перчевский А. А., Демьяненко П. А. Компьютерное моделирование процессов смешения-распределения излучения в сплавленных волоконно-оптических распределителях-сумматорах на основе многомодовых волоконных световодов. Изложено построение математической модели и алгоритма компьютерной программы для анализа процессов смешения-распределения оптического излучения в биконической области сплавных волоконно-оптических распределителей-сумматоров на основе жгута из стандартных кварцевых волоконных световодов. Проанализованы критерии оптимальности геометрических параметров БКО.

Ключевые слова: биконическая область, волоконно-оптические распределители-сумматоры.

Perchevskiy O., Demianenko P. The computer process simulation of the radiation mixing-distribution in fused fiber-optic valves-adders on the basis of multimode optical fibers.

Introduction. The problem is state, the input data is chosen. Options for solving the problem were covered and the most optimal method for modeling processes was selected.

Building the model and algorithm. Mathematical model structure and computer algorithm of analyzing program for optic irradiation mixing-separation processes in biconical area of the melted fiberoptic deviders-summarizers based on standard quartz fiber light guiders was presented.

Processing of the results. Processing of the results for the main parameters on the basis biconical areas with different geometries was conduct. The importance of well-formed graphs with good visualization was described.

Conclusions. An optimisation criterion for geometric parameters of biconical area was analyzed.

Keywords: *biconical area, fiber optical distributors-adders.*