

Научная статья

УДК 681.7.068.4

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-28-38



Многосердцевинное оптическое волокно со ступенчатыми одномодовыми сердцевинами. Часть 1. Изоляция сплошными оболочками

✉ Мария Сергеевна Былина, BylinaMaria@mail.ru

✉ Людмила Александровна Гульяева, lyudmila150@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: Оптическое волокно с несколькими несвязанными сердцевинами внутри общей оболочки (многосердцевинное волокно) применяется для увеличения пропускной способности линейных трактов систем связи. Количество сердцевины в одном волокне ограничивается взаимными влияниями между ними, для уменьшения которого применяются различные конструктивные решения. Целью работы является сравнение различных многосердцевинных волокон и выявление конструкций, позволяющих разместить наибольшее число сердцевины в общей оболочке стандартного диаметра 125 мкм.

В первой части данной работы проведено моделирование одномодовых волокон с сердцевинами, изолированными дополнительными сплошными оболочками. В результате моделирования рассчитаны характеристики фундаментальных мод сердцевины каждого из волокон – распределение напряженности электрического поля, хроматическая дисперсия и диаметр поля фундаментальной моды, предложена методика и проведена оценка взаимных влияний, определено максимальное возможное число сердцевины. Показано, что изолирующая оболочка снижает взаимные влияния и позволяет увеличить количество сердцевины за счет уменьшения расстояния между ними.

Ключевые слова: многосердцевинное волокно, одномодовая сердцевина, фундаментальная мода, взаимные влияния, перекрестные помехи, затухание перекрестных помех, моделирование

Ссылка для цитирования: Былина М.С., Гульяева Л.А. Многосердцевинное оптическое волокно со ступенчатыми одномодовыми сердцевинами. Часть 1. Изоляция сплошными оболочками // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 4. С. 28–38. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-28-38

Multi-Core Optical Fiber with Stepped Single-Mode Cores. Part 1. Insulation with Solid Clads

✉ Maria Bylina, BylinaMaria@mail.ru

✉ Ludmila Gulyaeva, lyudmila150@gmail.com

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: An optical fiber with several unrelated cores inside a common clad (multi-core fiber) is used to increase the capacity of linear paths of communication systems. The number of cores in one fiber is limited by mutual influences between them, to reduce which various design solutions are used. The aim of the work is to compare various multi-core fibers and identify structures that allow placing the largest number of cores in a common shell with a standard diameter of 125 microns.

In the first part of this paper, modeling of single-mode fibers with cores isolated by additional solid shells is carried out. As a result of modeling, the characteristics of the fundamental modes of the cores of each fiber are calculated – the distribution of the electric field strength, chromatic dispersion and the diameter of the field of the fundamental mode, a technique is proposed and an assessment of mutual influences is carried out, the maximum possible number of cores is determined. It is shown that the insulating clad reduces mutual influences and allows increasing the number of cores by reducing the distance between them.

Keywords: multi-core fiber, single-mode core, fundamental mode, mutual influences, crosstalk, crosstalk attenuation, simulation

For citation: Bylina M., Gulyaeva L. Multi-Core Optical Fiber with Stepped Single-Mode Cores. Part 1. Core Insulation with Solid Clads. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(4):28–38. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-28-38

1. ВВЕДЕНИЕ

Общей тенденцией развития оптических сетей связи является увеличение объемов информации, передаваемой по одному одномодовому оптическому волокну (ОВ). Увеличение объемов может быть достигнуто за счет увеличения канальной скорости передачи и количества каналов при использовании технологии плотного спектрального мультиплексирования (DWDM, аббр. от англ. Dense Wavelength Division Multiplexing). В настоящее время канальные скорости передачи могут составлять $B = 100\text{--}800$ Гбит/с, а количество каналов в одном ОВ измеряется десятками. Однако в ряде случаев этого оказывается недостаточно. Ограничивающим фактором уже являются размеры самого ОВ.

Для увеличения пропускной способности предлагаются схемы пространственного мультиплексирования. Одним из вариантов его реализации является применение многосердцевинных волокон (МСВ) [1–3]. МСВ представляет собой оптическое волокно с несколькими несвязанными сердцевинами, объединенными общей оболочкой, диаметр которой составляет 125 мкм, то есть равен диаметру оболочки обычного телекоммуникационного волокна с одной сердцевиной [2–7]. Если сердцевинки имеют одинаковые параметры, то они могут использоваться для параллельной передачи информации.

Каждая сердцевина в МСВ является аналогом обычного одномодового световода, в котором может быть реализована любая из существующих технологий передачи информации.

Максимальная скорость передачи B_{tot} , реализуемая по МСВ, составляет:

$$B_{tot} = N_{core} \cdot B, \quad (1)$$

где B – скорость передачи информации по одной сердцевине МСВ, N_{core} – количество сердцевин.

Из (1) следует, что для повышения пропускной способности необходимо увеличивать число сердцевин N_{core} , которое при фиксированном диаметре

общей оболочки ограничено их взаимными влияниями.

Целью данной работы является сравнительный анализ различных конструкций МСВ, позволяющих разместить наибольшее число сердцевин внутри общей оболочки стандартного диаметра 125 мкм. Для этого необходимо, во-первых, предложить методику оценки взаимных влияний между сердцевинами МСВ; во-вторых, предложить критерий оценки минимально допустимого расстояния между соседними сердцевинами в МСВ, при котором достигается максимальное количество сердцевин; в-третьих, сравнить эффективность различных конструктивных решений, позволяющих уменьшить взаимные влияния между сердцевинами:

1) увеличение расстояния между ближайшими друг к другу сердцевинами, путем уменьшения числа сердцевин или изменения их взаимного расположения внутри общей оболочки;

2) формирование вокруг каждой сердцевины изолирующей оболочки с показателем преломления ниже показателя преломления общей оболочки [2, 3, 8];

3) формирование между соседними сердцевинами защитного барьера из воздушных капилляров [2, 3, 9].

В первой части работы рассмотрены МСВ с сердцевинами без изолирующей оболочки и с изолирующими оболочками различной толщины.

2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ МЕЖДУ СЕРДЦЕВИНАМИ В МСВ

2.1. Затухание перекрестной помехи

Взаимные влияния между сердцевинами МСВ будем характеризовать затуханием перекрестной помехи:

$$A = 10 \lg \left(\frac{P_s}{P_n} \right), \quad (2)$$

где P_s – мощность сигнала в подверженной влиянию сердцевине; P_n – суммарная мощность перекрестных помех, созданных всеми остальными сердцевинами.

Будем считать, что МСВ содержит N_{core} одинаковых сердцевин. Мощность сигнала P_s в каждой из них можно рассчитать по выражению:

$$P_s = \int_{S_1} I \cdot ds, \quad (3)$$

где I – интенсивность излучения фундаментальной моды; S_1 – область сердцевин, по которой осуществляется интегрирование.

Для оценки помехи P_n будем использовать соотношения:

$$P_n = \sum_{i=1}^{N_{core}-1} P_{ni}, \quad P_{ni} = \int_{S_2} I_i \cdot ds, \quad (4)$$

где $N_{core} - 1$ – число влияющих сердцевин; P_{ni} – мощность помехи, созданной i -й влияющей сердцевиной в сердцевине, подверженной влиянию; I_i – интенсивность излучения фундаментальной моды в i -й влияющей сердцевине; S_2 – область сердцевин, подверженной влиянию, по которой осуществляется интегрирование.

Из (3) и (4) следует, что для расчета A необходимо рассчитать интенсивность I поля фундаментальной моды каждой сердцевин МСВ, которая связана с напряженностью поля соотношением:

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} \cdot E \cdot E^*, \quad (5)$$

где $\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$ и $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$ – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, в которой распространяется электромагнитная волна; ε и μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости этой среды; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – электрическая и магнитная постоянные; E^* – комплексно сопряженная к напряженности электрического поля величина.

2.2. Конструкция МСВ

Рассмотрим сначала простейшую конструкцию МСВ с двумя одинаковыми одномодовыми сердцевинами, расположенными на расстоянии h друг от друга. Каждая сердцевина имеет радиус r_1 и собственную изолирующую оболочку с радиусом r_2 (рисунок 1). Показатели преломления сердцевины и изолирующей оболочки обозначим n_1 и n_2 , соответственно. Сердцевины окружены общей оболочкой с радиусом r_3 и показателем преломления n_3 . Будем полагать, что показатели преломления в пределах сердцевин и оболочек не меняются.

Назначением изолирующей оболочки является уменьшение радиуса модового поля, и доли мощности фундаментальной моды, распространяющейся в общей оболочке, что должно снизить взаимные влияния.

Для достижения данного эффекта необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение между показателями преломления:

$$n_1 > n_3 \geq n_2. \quad (6)$$

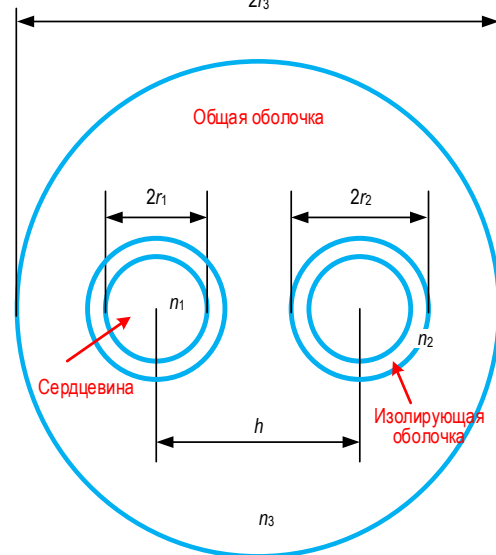


Рис. 1. Конструкция МСВ с двумя сердцевинами в изолирующих оболочках

Fig. 1. The Design of the MCF with Two Cores in Insulating Clads

Очевидно, что волновод, образованный сердцевиной и двумя оболочками – изолирующей и общей, имеет профиль показателя преломления (ППП), отличный от волновода, образованного сердцевиной и одной общей оболочкой. Поэтому их оптические характеристики будут отличаться. Это нужно учитывать при выборе параметров изолирующей оболочки (показателя преломления n_2 и радиуса r_2).

2.3. Поле в уединенной сердцевине. Расчет мощности сигнала P_s

Предположим сначала, что излучение вводится только в одну из сердцевин. Будем считать, что $r_3 \gg r_1$, $h \gg 2r_1$ и $h > 2r_2$. Тогда для расчета амплитуды напряженности электрического поля в самой влияющей сердцевине, в ее изолирующей оболочке и в общей оболочке можно использовать известную методику для слаборадиационного оптического волокна с осесимметричным ППП [10], согласно которой напряженность электрического поля в поперечном сечении может быть представлена в виде:

$$E(r, \varphi) = E_{\max} \cdot R(r) \cdot \exp(jl\varphi), \quad (7)$$

где r, φ – цилиндрические координаты; $E_{\max}$ – амплитуда напряженности электрического поля; $R(r) \cdot \exp(jl\varphi)$ – периодическая по координате φ функция, описывающая изменение напряженности электрического поля в поперечном сечении; l – целое число, представляющее собой азимутальный порядок моды; j – мнимая единица.

Полагаем, что сердцевина работает в одномодовом режиме, тогда можно считать, что $l = 0$, то есть:

$$E(r, \varphi) = E(r) = E_{\max} \cdot R(r). \quad (8)$$

Таким образом, для расчета E достаточно найти функцию $R(r)$, которая является решением скалярного волнового уравнения:

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + \left[k^2 n^2(r) - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right] R(r) = 0, \quad (9)$$

где $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число; λ – длина волны; $n(r)$ – осесимметричный ППП.

В нашем случае ППП $n(r)$ влияющей сердцевины имеет вид:

$$n(r, \lambda) = \begin{cases} n_1(\lambda), & r \leq r_1 \\ n_2(\lambda), & r_1 < r \leq r_2. \\ n_3(\lambda) & r > r_2 \end{cases} \quad (10)$$

Теперь для каждого из трех слоев (10) можно записать отдельное уравнение (9), которое будет иметь аналитическое решение вида:

$$R_i(r) = A_i Z_1(u_i r) + B_i Z_2(u_i r), \quad (11)$$

где A_i, B_i – постоянные интегрирования; i – номер слоя.

В (11) использованы следующие обозначения:

$$u_i = \begin{cases} \sqrt{k^2 n_i^2 - \beta^2}, & k^2 n_i^2 - \beta^2 \geq 0 \\ \sqrt{\beta^2 - k^2 n_i^2}, & k^2 n_i^2 - \beta^2 < 0 \end{cases}, \quad (12)$$

$$Z_1(u_i r) = \begin{cases} J_0(u_i r), & k^2 n_i^2 - \beta^2 \geq 0 \\ I_0(u_i r), & k^2 n_i^2 - \beta^2 < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$Z_2(u_i r) = \begin{cases} Y_0(u_i r), & k^2 n_i^2 - \beta^2 \geq 0 \\ K_0(u_i r), & k^2 n_i^2 - \beta^2 < 0 \end{cases} \quad (14)$$

где β – постоянная распространения; J_0 и Y_0 – функции Бесселя первого и второго рода нулевого по-

рядка; I_0 и K_0 – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка.

Поле в центральном слое не может описываться функциями Бесселя второго рода Y_0 и K_0 , так как они не определены при $r = 0$. Поля направляемых мод во внешнем слое спадают по экспоненте в радиальном направлении. Это поведение определяется только функцией Z_2 .

Поэтому общее решение уравнения (9) следует записать в виде:

$$R(r) = \begin{cases} A_1 Z_1(u_1 r), & r \leq r_1 \\ A_2 Z_1(u_2 r) + B_2 Z_2(u_2 r), & r_1 < r \leq r_2. \\ B_3 Z_2(u_3 r), & r > r_2 \end{cases} \quad (15)$$

Постоянная распространения фундаментальной моды β и постоянные интегрирования A_i и B_i могут быть найдены из граничных условий, которые заключаются в непрерывности $R(r)$ и ее производной $dR(r)/dr$ на границах между соседними слоями.

Для рассматриваемого случая граничные условия будут состоять из 4 уравнений:

$$\begin{cases} A_1 Z_1(u_1 r_1) - A_2 Z_1(u_2 r_1) - B_2 Z_2(u_2 r_1) = 0 \\ A_1 Z_1'(u_1 r_1) - A_2 Z_1'(u_2 r_1) - B_2 Z_2'(u_2 r_1) = 0 \\ A_2 Z_1(u_2 r_2) + B_2 Z_2(u_2 r_2) - B_3 Z_2(u_3 r_2) = 0 \\ A_2 Z_1'(u_2 r_2) + B_2 Z_2'(u_2 r_2) - B_3 Z_2'(u_3 r_2) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

Поскольку общее число неизвестных в (16) равно 5, одну из постоянных интегрирования, например, A_1 нужно задать. Система (16) является однородной системой линейных уравнений, то есть имеет нетривиальное решение только в случае, если ее определитель равен 0 (17).

Выражение (17) представляет собой характеристическое уравнение, из которого можно найти (18) постоянную распространения β (1/м). Вместо β часто приводят безразмерный эффективный показатель преломления n_{eff} .

$$\begin{vmatrix} Z_1(u_1 r_1) & -Z_1(u_2 r_1) & -Z_2(u_2 r_1) & 0 \\ Z_1'(u_1 r_1) & -Z_1'(u_2 r_1) & -Z_2'(u_2 r_1) & 0 \\ 0 & Z_1(u_2 r_2) & Z_2(u_2 r_2) & -Z_2(u_3 r_2) \\ 0 & Z_1'(u_2 r_2) & Z_2'(u_2 r_2) & -Z_2'(u_3 r_2) \end{vmatrix} = 0. \quad (17)$$

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k}. \quad (18)$$

Для постоянных интегрирования из (16) получаем:

$$A_2 = A_1 \frac{Z_1(u_1 r_1) \eta_1(u_1 r_1) - \eta_2(u_2 r_1)}{Z_1(u_2 r_1) \eta_1(u_2 r_1) - \eta_2(u_2 r_1)}, \quad (19)$$

$$B_2 = A_1 \frac{Z_1(u_1 r_1) \eta_1(u_1 r_1) - \eta_1(u_2 r_1)}{Z_2(u_2 r_1) \eta_2(u_2 r_1) - \eta_1(u_2 r_1)}, \quad (20)$$

$$B_3 = A_2 \frac{Z_1(u_2 r_2)}{Z_2(u_3 r_2)} + B_2 \frac{Z_2(u_2 r_2)}{Z_2(u_3 r_2)}, \quad (21)$$

$$\text{где } \eta_1(u_i r) = \frac{Z_1'(u_i r)}{Z_1(u_i r)}, \eta_2(u_i r) = \frac{Z_2'(u_i r)}{Z_2(u_i r)}. \quad (22)$$

Зависимости β и n_{eff} от длины волны позволяют рассчитать хроматическую дисперсию D_{chr} сердцевин МСВ [11]:

$$D_{chr} = -\frac{\lambda}{2\pi c} \left(2 \frac{d\beta}{d\lambda} + \lambda \frac{d^2\beta}{d\lambda^2} \right) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2}. \quad (23)$$

Используя (15), можно рассчитать радиус модового поля сердцевин МСВ по известному выражению Петермана [13]:

$$w = \sqrt{2 \frac{\int_0^\infty R^2(r) r dr}{\int_0^\infty \left(\frac{dR(r)}{dr} \right)^2 r dr}}. \quad (24)$$

Рассчитаем мощность P_s сигнала в сердцевине.

С учетом (8) перепишем (5) в виде:

$$I(r) = \frac{|E_{\max}|^2}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \cdot R^2(r). \quad (25)$$

Используем соотношение $n = \sqrt{\mu \cdot \epsilon}$ и учтем, что для прозрачных диэлектриков и, в том числе для кварцевых стекол, $\mu = 1$.

Теперь из (3) и (25) можно получить:

$$P_s = 2\pi \cdot \frac{|E_{\max}|^2}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot n_1 \cdot \int_0^{r_1} r \cdot R^2(r) \cdot dr = 2\pi \cdot P_{\max} \cdot \int_0^{r_1} r \cdot R^2(r) \cdot dr. \quad (26)$$

В работе было проведено моделирование сердцевин МСВ с изолирующими оболочками различной толщины. Параметры, при которых проведены расчеты, представлены в таблице 1.

Для расчета приведенных в таблице 1 показателей преломления и их зависимости от длины волны использовалось известное уравнение Селлмейера [11]:

$$n^2(\lambda) = \sum_{i=1}^k \frac{S_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} + 1, \quad (27)$$

где λ_i – резонансные длины волн; S_i – безразмерные коэффициенты Селлмейера.

ТАБЛИЦА 1. Параметры сердцевин МСВ с изолирующими оболочками на длине волны 1550 нм

TABLE 1. Parameters of the Core with Insulating Shells in MCF at a Wavelength of 1550 nm

Параметр	Значение
Материал сердцевин	Кварцевое стекло, легированное GeO ₂ с концентрацией 4.1 молярных процентов
Показатель преломления n_1 сердцевин	1,45030996
Материал изолирующей оболочки	Кварцевое стекло, легированное F с концентрацией 2 молярных процента
Показатель преломления n_2 изолирующей оболочки	1,43942439
Материал общей оболочки	Кварцевое стекло
Показатель преломления n_3 общей оболочки	1,44402362
Радиус сердцевин r_1 , мкм	4,1
Длина волны, мкм	1,55

Для кварцевых стекол обычно учитывают три резонанса ($k = 3$). Значения λ_i и S_i для расчета показателей преломления материалов сердцевин и общей оболочки приведены в таблице 2.

Для расчета показателя преломления изолирующей оболочки n_2 использовалось выражение, предложенное в [12]:

$$n_2(\lambda) = n_1(\lambda) - \Delta n \cdot d_F, \quad (28)$$

где d_F – концентрация F в молярных процентах, $\Delta n = 0,0045992$.

ТАБЛИЦА 2. Резонансные длины волн и коэффициенты Селлмейера [11]

TABLE 2. Resonant Wavelengths and Sellmeier Coefficients [11]

Материал	S_1	S_2	S_3	λ_1 , мкм	λ_2 , мкм	λ_3 , мкм
Кварцевое стекло	0,6961663	0,4079426	0,8974794	0,0684043	0,1162414	9,896161
Кварцевое стекло, легированное GeO ₂ с концентрацией 4.1 молярных процентов	0,68671749	0,43481505	0,89656582	0,072675189	0,11514351	10,002398

На рисунке 2 представлены результаты моделирования распределения полей фундаментальной моды в сердцевинах без изолирующей оболочки и с изолирующей оболочкой толщиной 1 мкм. Разные цвета на рисунке соответствуют разным значениям напряженности электрического поля в соответствии с приведенной цветовой шкалой. Черными сплошными линиями на рисунках показаны границы сердцевин и изолирующей оболочки.

На рисунке 3 представлены нормированные распределения полей фундаментальной моды (рисунок 3а), дисперсионные характеристики сердцевин (рисунок 3б) без изолирующей оболочки и с изолирующими оболочками разной толщины $t_2 = r_2 - r_1$ и радиус модового поля (рисунок 3с), рассчитанные по выражениям (10–24).

Из рисунков 2, 3а и 3с видно, что изолирующая оболочка значительно уменьшает диаметр модо-

вого поля с 4,6 до 4,1 мкм при толщине оболочки 1 мкм и 3,8 мкм при толщине оболочки 2 мкм. Это способствует большей концентрации излучения в сердцевине. Дальнейшее увеличение толщины обо-

лочки не дает большого эффекта. Наличие изолирующей оболочки значительно изменяет дисперсионную характеристику сердцевины от 20 до 12 пс/(нм·км) на длине волны 1550 нм (рисунок 3б).

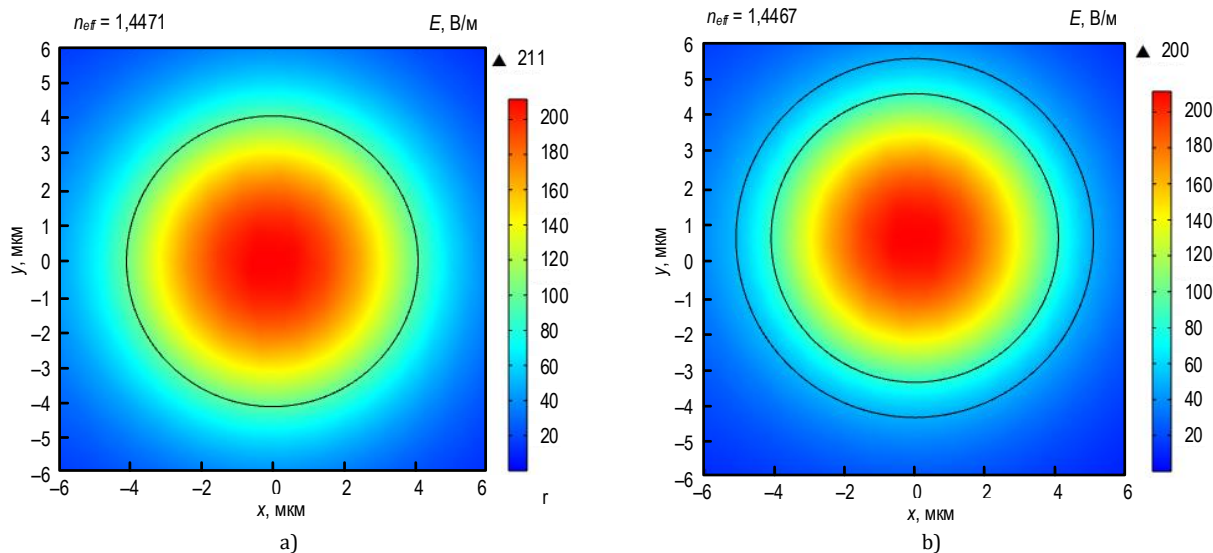


Рис. 2. Распределение поля фундаментальной моды в сердцевине (результат моделирования в COMSOL Multiphysics [14]): без изолирующей оболочки (а) и с изолирующей оболочкой (б) толщиной 1 мкм

Fig. 2. Distribution of the Fundamental Mode Field in the Core (the Result of Modeling in COMSOL Multiphysics [14]): without an insulating clad (a) and with an insulating clad 1 microns thick (b)

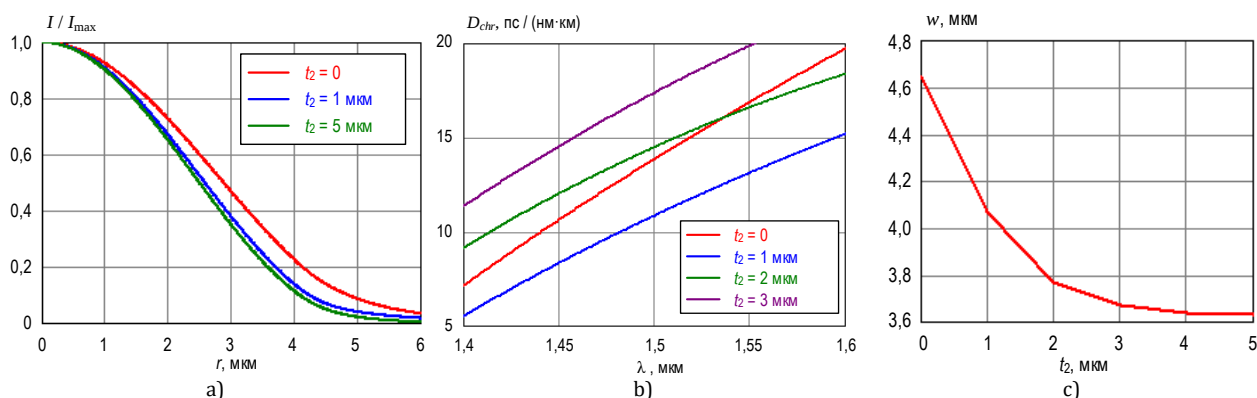


Рис. 3. Характеристики сердцевин без изолирующей оболочки и с изолирующими оболочками разной толщины: а) нормированное распределение интенсивности фундаментальной моды на длине волны 1550 нм; б) зависимость хроматической дисперсии от длины волны; в) зависимость радиуса модового поля от толщины изолирующей оболочки на длине волны 1550 нм

Fig. 3. Characteristics of Cores without Insulating Clads and with Insulating Clads of Different Thicknesses: a) Normalized Distribution of the Intensity of the Fundamental Mode at 1550 nm; b) Dependence of the Chromatic Dispersion on the Wavelength; c) Dependence of the Mode Field Radius on the Insulating Clad Thickness at 1550 nm

2.4. Поле в МСВ с двумя сердцевинами.

Расчет мощности P_n и затухания A перекрестной помехи

В МСВ с двумя сердцевинами одну из них условно будем считать влияющей, а вторую подверженной влиянию. На рисунке 4 представлена часть поперечного сечения МСВ, содержащая влияющую и подверженную влиянию сердцевину. Для расчета по

выражению (4) введем полярную систему координат с началом в центре влияющей сердцевины. Пунктирной окружностью показан контур одного из сечений распределения интенсивности $I(r)$ электромагнитного поля влияющей сердцевины, пересекающий область S_2 сердцевины, подверженной влиянию. Из рисунка видно, что интегрирование по координате r следует производить в пределах от $h - r_1$ до $h + r_1$, а по координате φ – от $-\Phi$ до $+\Phi$.

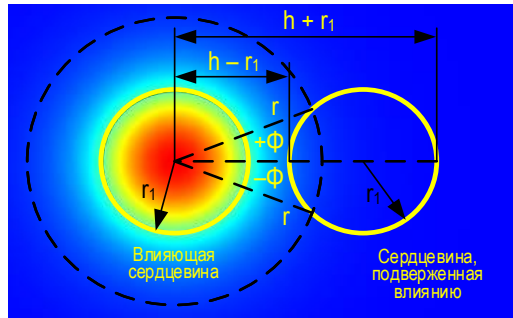


Рис. 4. К расчету мощности помехи P_n
Fig. 4. To Calculate the Interference Power P_n

Перепишем (4) в виде:

$$P_n = \int_{h-r_1}^{h+r_1} \int_{-\Phi}^{\Phi} r \cdot I(r) \cdot dr \cdot d\varphi. \quad (29)$$

Для угла Φ из геометрических соображений получим:

$$\Phi(r) = \arccos\left(\frac{r^2 - r_1^2 + h^2}{2 \cdot h \cdot r}\right). \quad (30)$$

Учитывая, что $I(r)$ не зависит от φ , а также используя (30) и соотношения, примененные при выводе (25), перепишем (29) в виде:

$$\begin{aligned} P_n &= 2 \cdot \frac{|E_{\max}|^2}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot n_1 \times \\ &\times \int_{h-r_1}^{h+r_1} r \cdot R^2(r) \cdot \arccos\left(\frac{r^2 - r_1^2 + h^2}{2 \cdot h \cdot r}\right) \cdot dr = \\ &= 2 \cdot P_{\max} \cdot \int_{h-r_1}^{h+r_1} r \cdot R^2(r) \times \\ &\times \arccos\left(\frac{r^2 - r_1^2 + h^2}{2 \cdot h \cdot r}\right) \cdot dr. \end{aligned} \quad (31)$$

3. МИНИМАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ СЕРДЦЕВИНАМИ В МСВ. МАКСИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО СЕРДЦЕВИН

3.1. Минимальное расстояние между сердцевинами в двухсердцевинном МСВ

На рисунке 5 представлены зависимости затухания перекрестной помехи в сердцевине от расстояния между сердцевинами h в двухсердцевинном МСВ. Расчет проведен по выражениям (2), (26) и (31) для сердцевин без изолирующей оболочки и с изолирующими оболочками разной толщины t_2 на длине волны 1550 нм. Из рисунка 5 видно, что затухание перекрестной помехи A возрастает при увеличении расстояния между сердцевинами. Поэтому, задавшись допустимым уровнем A , диаметром сердцевин $2r_1$ и толщиной изолирующей оболочки t_2 , можно определить минимальное допустимое расстояние $h_{\min}$ между сердцевинами.

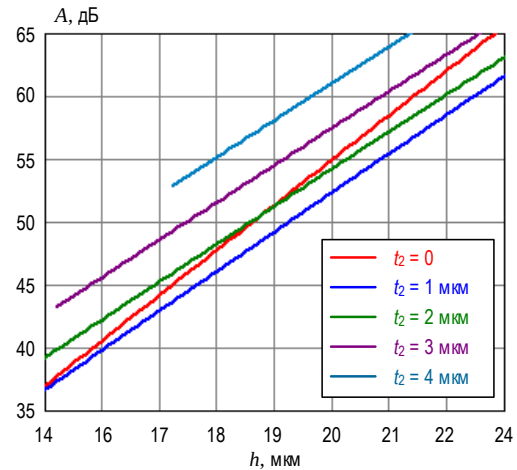


Рис. 5. Затухание перекрестной помехи в МСВ с двумя одинаковыми сердцевинами в изолирующих оболочках разной толщины

Fig. 5. Attenuation of Crosstalk in MCF with Two Identical Cores in Insulating Clads of Different Thickness

На рисунке 6 представлена зависимость $h_{\min}$ от толщины изолирующей оболочки при $A = 60$ дБ. Видно, что без дополнительной изолирующей оболочки $h_{\min} = 20,5$ мкм. Расчеты показывают, что использование тонких изолирующих оболочек даже увеличивает $h_{\min}$ до 21,5 мкм. Однако увеличение толщины оболочки свыше 2,5 мкм позволяет уменьшить $h_{\min}$. При толщине оболочки 4,5 мкм $h_{\min} = 18$ мкм.

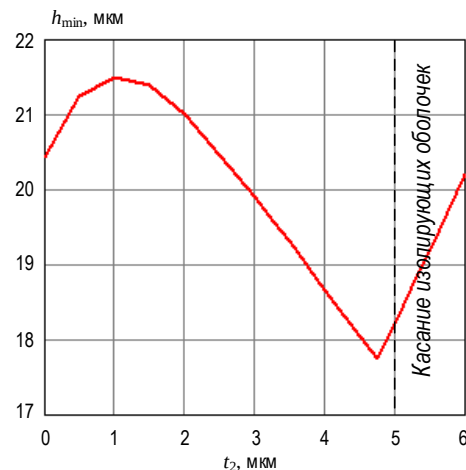


Рис. 6. Минимальное расстояние $h_{\min}$ между сердцевинами в двухсердцевинном волокне (здесь и далее – при котором на длине волны 1550 нм обеспечивается A не менее 60 дБ)

Fig. 6. Minimum Distance $h_{\min}$ between Cores in a Double-Core Fiber (Here and Further – at which A at Least 60 dB is Provided at 1550 nm)

Проведенные расчеты доказывают эффективность изолирующей оболочки, однако наибольшее уменьшение расстояния между сердцевинами достигается практически при касании оболочек, что равносильно отказу от них и уменьшению показателя преломления общей оболочки. При этом конструкция МСВ даже упрощается.

3.2. Максимальное число сердцевин в МСВ

Рассмотрим МСВ с несколькими одинаковыми сердцевинами. Установленное в п. 3.1 расстояние $h_{\min}$ можно считать эквивалентным диаметром сердцевины, являющимся основным параметром при определении максимального количества сердцевин, которые можно расположить в общей оболочке МСВ. Определим максимально возможное количество одинаковых сердцевин N_{core} в МСВ при заданном значении $h \geq h_{\min}$. Для этого нужно решить задачу упаковки кругов с меньшим диаметром $d = h_{\min}$ в круг с большим диаметром $D = 2r_3$ [15]. В нашем случае выбираем $D = 125$ мкм. Результатом решения этой задачи будет число сердцевин N_{core} и диаграмма их размещения в поперечном сечении МСВ. Методика оптимальной упаковки для различных отношений d / D приведена в [16].

На рисунке 7 показан пример размещения 19 сердцевин в МСВ на равных расстояниях h друг от друга. В этом случае перекрестные помехи в каждой сердцевине будут создавать $(N_{\text{core}} - 1) = 18$ влияющих сердцевин.

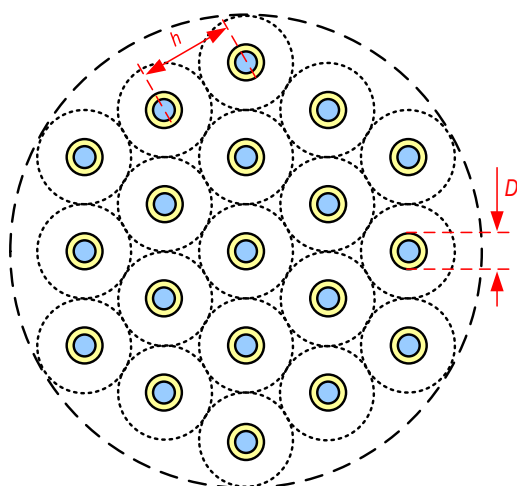


Рис. 7. Размещение сердцевин в МСВ на равных расстояниях h друг от друга

Fig. 7. Placement of Cores in MCF at Equal Distances h from Each Other

Из рисунка 5 видно, что увеличение расстояния между влияющей и подверженной влиянию сердцевинами в 1,7 раза приводит к возрастанию затухания перекрестной помехи более чем на 30 дБ. Поэтому при расчете перекрестных помех можно учитывать только влияние сердцевин, расположенных в непосредственной близости от сердцевины, подверженной влиянию. Из рисунка 7 видно, что их количество в зависимости от расположения подверженной влиянию сердцевины составляет от 3 до 6. Таким образом, максимальная перекрестная помеха в первом приближении составит $P_{n \max} = 6P_n$.

На рисунке 8 показана зависимость минимального допустимого расстояния $h_{\min}$ между соседними сердцевинами, при условии:

$$A_{\min} = 10 \lg \left(\frac{P_s}{P_{n \max}} \right) \geq 60 \text{ дБ.}$$

Расстояние $h_{\min}$ для сердцевин без изолирующей оболочки составляет 22,65 мкм (см. рисунок 8), то есть при $2r_3 = 125$ мкм получаем $h_{\min} / 2r_3 = 0,181$. Для этого отношения существует решение с размещением $N_{\text{core}} = 19$ сердцевин по схеме с одинаковыми расстояниями между соседними сердцевинами, что представлено на рисунке 7, или $N_{\text{core}} = 22$ сердцевин, если расстояния между соседними сердцевинами могут отличаться (рисунок 9) [16].

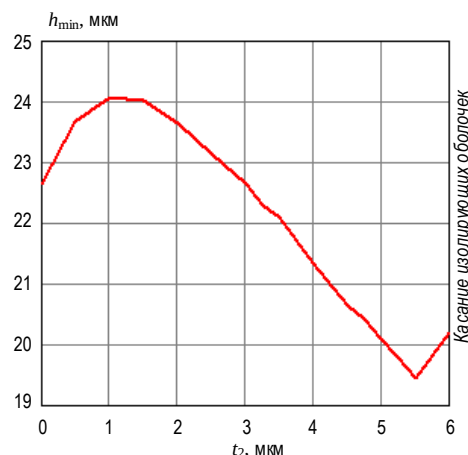


Рис. 8. Минимальное расстояние $h_{\min}$ между сердцевинами в МСВ, концентрация F в изолирующих оболочках 2 %

Fig. 8. The Minimum Distance $h_{\min}$ between the Cores in MCF, Concentration of F in Insulating Clads 2 %

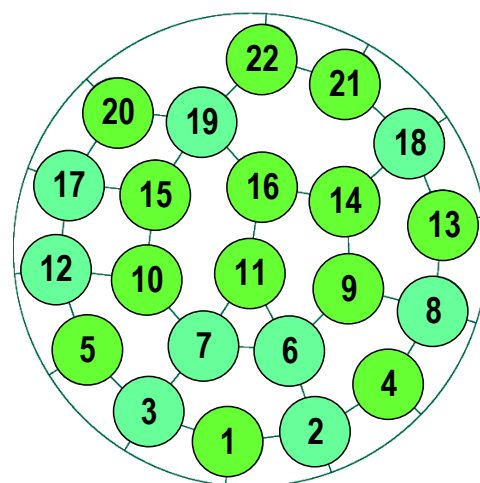


Рис. 9. Размещение максимально возможного числа сердцевин без изолирующей оболочки в МСВ с общей оболочкой диаметром 125 мкм при $h_{\min} = 22,65$ мкм

Fig. 9. Placement of the Maximum Possible Number of Cores without an Insulating Clad in MCF with a Common Clad with a Diameter of 125 microns at $h_{\min} = 22,65$ microns

Минимальное значение $h_{\min}$ на рисунке 8 достигается при использовании изолирующей оболочки толщиной 5,5 мкм и составляет 19,44 мкм. При $2r_3 = 125$ мкм получаем $h_{\min} / 2r_3 = 0,156$. Для этого отношения существует решение с расположением

$N_{core} = 31$ сердцевин по схеме с одинаковыми расстояниями между соседними сердцевинами. Диаграмма размещения сердцевин приведена на рисунке 10а. При касании изолирующих оболочек соседних сердцевин (изолирующая оболочка толщиной 6 мкм) получаем $h_{min} = 20.2$ мкм, $h_{min} / 2r_3 =$

$= 0,162$ и $N_{core} = 29$ (рисунок 10б). Этот случай равносителен отказу от изолирующих оболочек и уменьшению показателя преломления общей оболочки, например, с помощью повышения концентрации F в общей оболочке.

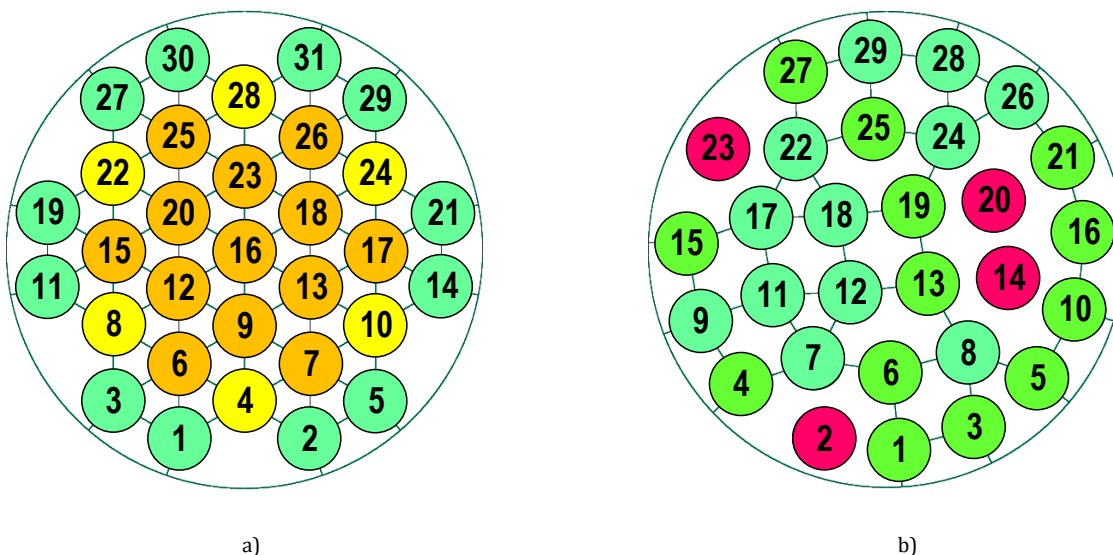


Рис. 10. Размещение сердцевин в МСВ с общей оболочкой диаметром 125 мкм при $h_{min} = 19,44$ мкм (а) и $h_{min} = 20,2$ мкм (б)

Fig. 10. Placement of Cores in MCF with a Common Clad with a Diameter of 125 microns at: a) $h_{min} = 19,44$ microns; b) $h_{min} = 20,2$ microns

На рисунке 11 представлены зависимости h_{min} от t_2 для изолирующей оболочки из кварцевого стекла, легированного 3 % F.

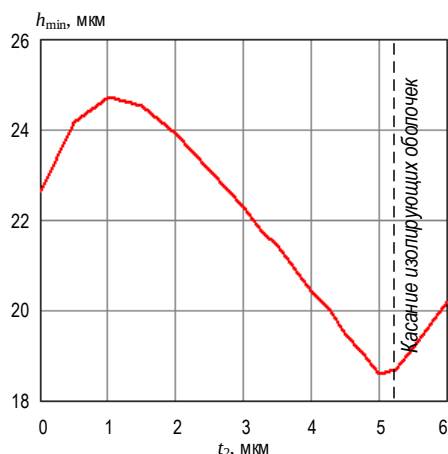


Рис. 11. Минимальное расстояние h_{min} между сердцевинами в МСВ, концентрация F в изолирующих оболочках 3 %

Fig. 11. The Minimum Distance h_{min} between the Cores in MCF, Concentration of F in Insulating Clads 3 %

Видно, что в этом случае наибольшее число сердцевин можно разместить на расстоянии 18,59 мкм при толщине изолирующей оболочки 5 мкм ($h_{min} / (2r_3) = 0,149$). МСВ в этом случае может иметь до 35 сердцевин [16]. Однако практически такой же результат (34 сердцевин) получается при касании изолирующих оболочек соседних сердцевин ($t_2 = 5,25$ мкм).

При изменении показателей преломления общей и изолирующих оболочек нужно следить за изменением дисперсионных характеристик и диаметров модовых полей сердцевин. В рассмотренных выше примерах материал и радиусы изолирующей оболочки выбирались так, чтобы характеристики сердцевин оставались близкими к характеристикам стандартного одномодового волокна G.652.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ЧАСТИ 1

Проведенные в работе исследования доказывают возможность создания кварцевых МСВ, имеющих общую оболочку стандартного для телекоммуникационных волокон диаметра 125 мкм, с несколькими одномодовыми сердцевинами. Величиной возникающих перекрестных помех можно управлять, изменяя расстояние между отдельными сердцевинами, а также с помощью изолирующих элементов различной конструкции.

Анализ параметров МСВ с сердцевинами в изолирующих оболочках из фторсиликатного стекла и МСВ с сердцевинами без изолирующих оболочек выявил преимущество первой конструкции. Расчеты показали, что в МСВ диаметром 125 мкм в общей оболочке можно разместить 22 одномодовых сердцевин диаметром 8,2 мкм без изолирующих оболочек. Использование изолирующей оболочки с пониженным по отношению к общей оболочке показателем преломления из фторсиликатного

стекла позволяет увеличить количество сердцевин до 31 при концентрации 2 %F и до 35 при концентрации 3 %F. Однако достигаются эти результаты при относительно большой толщине изолирующей оболочки, когда оболочки соседних сердцевин почти касаются друг друга.

В некоторых случаях размещение в общей оболочке максимально возможного числа сердцевин возможно только при условии отказа от их симметричного расположения, что усложняет технологию производства и работу с готовым МСВ.

Отказ от изолирующих оболочек и, следовательно, упрощение конструкции МСВ практически эквивалентен использованию общей оболочки с

пониженным показателем преломления. Такая конструкция позволяет разместить 29 сердцевин при концентрации 2 %F и 34 – при концентрации 3 %F в общей оболочке.

Таким образом, эффективность применения изолирующих оболочек можно считать доказанной, но вопрос о целесообразности их использования должен решаться в каждом конкретном случае с учетом технологических и экономических факторов.

Во второй части работы будут рассмотрены МСВ с сердцевинами, изолированными друг от друга защитными барьерами из воздушных капилляров.

Продолжение следует...

Список источников

1. Семенов А.Б. Параллельная волоконно-оптическая передача в ЛВС и СКС. Подходы к реализации физического и канального уровней. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 272 с.
2. Hayashi T. Multi-core optical fibers realizing high-density/-capacity transmissions // Proceedings of the IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ, Kyoto, Japan, 07–09 November 2016). IEEE, 2016. DOI:10.1109/ICSJ.2016.7801252
3. Былина М.С., Гуляева Л.А. Новые типы многосерцевинных волокон для центров обработки данных // Всероссийская научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики ПКМ» ПКМ-2021, Санкт-Петербург, Россия, 30 ноября–02 декабря 2021). Сборник лучших докладов конференции. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. С. 175–179.
4. Ortiz A.M., Sáez R.L. Multi-Core Optical Fibers: Theory, Applications and Opportunities // In: Xu F., Mou C. (eds.) Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications. Rijeka: InTech, 2018. PP. 63–102. DOI:10.5772/intechopen.72458
5. Kaminow I.P., Li T., Willner A.E. Optical Fiber Telecommunications Volume VIA: Components and Subsystems. Oxford: Academic Press, 2013. 794 p.
6. Фокин В.Г., Ибрагимов Р.З. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи: учебное пособие. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. 156 с.
7. Портнов Э.Л. Новые типы оптических волокон в телекоммуникациях и их применение // T-Comm. 2013. Т. 7. № 8. С. 96–98.
8. Дианов Е.М., Семёнов С.Л., Буфетов И.А. Новое поколение волоконных световодов // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 1. С. 1–10.
9. Ziolkowicz A., Szymanski M., Szostkiewicz L., Tenderenda T., Napierala M., Murawski M., et al. Hole-assisted multicore optical fiber for next generation telecom transmission systems // Applied Physics Letters. 2014. Vol. 105. Iss. 8. P. 081106. DOI:10.1063/1.4894178
10. Былина М.С., Глаголев С.Ф. Методика и результаты расчетов параметров оптических волокон с осесимметричным профилем показателя преломления // Фотон-экспресс. 2017. Т. 6(142). С. 159–160.
11. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984.
12. Brückner V. To the use of Sellmeier formula. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/262294649_To_the_use_of_Sellmeier_formula (дата обращения 21.11.2022)
13. Бурдин А.В., Жуков А.Е., Прапорщиков Д.Е. Расчет вносимых потерь на стыке слабонаправляющих волоконных световодов с произвольным профилем показателя преломления в маломодовом режиме передачи оптических сигналов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 4. С. 60–66.
14. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics®. Понимание, прогнозирование, оптимизация реалистичных физических процессов и устройств с помощью численного моделирования // COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics> (дата обращения 07.08.2022)
15. Reis G.E. Dense Packing of Equal Circles Within a Circle // Mathematics Magazine. 1975. Vol. 48. Iss. 1. PP. 33–37. DOI:10.1080/0025570X.1975.11976434
16. The best known packings of equal circles in a circle (complete up to N = 2600) // E. Specht. URL: <http://hydra.nat.uni-magdeburg.de/packing/cci/cci.html> (дата обращения 21.11.2022)

References

1. Semenov A.B. *Parallel Fiber-Optic Transmission in LAN and SCS. Approaches to the Implementation of the Physical and Channel Layers*. Moscow: Goriachaia liniia – Telekom Publ.; 2018. 272 p. (in Russ.)
2. Hayashi T. Multi-core optical fibers realizing high-density/-capacity transmissions. *Proceedings of the IEEE CPMT Symposium Japan, ICSJ, 07–09 November 2016, Kyoto, Japan*. IEEE; 2016. DOI:10.1109/ICSJ.2016.7801252
3. Bylina M.S., Gulyaeva L.A. New Types of Multi-Core Fibers for Data Centers. *Collection of the best reports of the All-Russian Scientific and Methodological Conference of Undergraduates and Their Leaders on Training of Professional Staff in the Master's*

Program for the Digital Economy of the PKM, PKM-2021, 30 November–02 December 2021, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2021. p.175–179. (in Russ.)

4. Ortiz A.M., Sáez R.L. Multi-Core Optical Fibers: Theory, Applications and Opportunities. In: Xu F., Mou C. (eds.) *Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications*. Rijeka: InTech; 2018. p.63–102. DOI:10.5772/intechopen.72458

5. Kaminow I.P., Li T., Willner A.E. *Optical Fiber Telecommunications Volume VIA: Components and Subsystems*. Oxford: Academic Press; 2013. 794 p.

6. Fokin V.G., Ibragimov R.Z. *Optical Systems with Terabit and Petabit Transmission Rates*. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences Publ.; 2016. 156 p. (in Russ.)

7. Portnov E.L. New types of optical fibers in telecommunications and their application. *T-Comm*. 2013; 7(8):96–98. (in Russ.)

8. Dianov E.M., Semenov S.L., Bufetov I.A. New Generation of Optical Fibres. *Quantum Electronics*. 2016;46(1):1–10. DOI:10.1070/QE2016v046n01ABEH015963

9. Ziolkowicz A., Szymanski M., Szostkiewicz L., Tenderenda T., Napierala M., Murawski M., et al. Hole-assisted multicore optical fiber for next generation telecom transmission systems. *Applied Physics Letters*. 2014;105(8):081106. DOI:10.1063/1.4894178

10. Bylina M.S., Glagolev S.F. Methods and results of calculations of parameters of optical fibers with an axisymmetric refractive index profile. *Foton-ekspress*. 2017;6(142):159–160. (in Russ.)

11. Adams M. *Introduction to the Theory of Optical Waveguides*. Moscow: Mir Publ.; 1984. (in Russ.)

12. Brückner V. *To the use of Sellmeier formula*. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/262294649_To_the_use_of_Sellmeier_formula [Accessed 21st November 2022]

13. Burdin A.V., Zhukov A.E., Praporshchikov D.E. Method for estimation the insertion loss at splice of weakly guiding optical fibers with arbitrary refractive index profile under a few-mode regime of signal transmission. *T-Comm*. 2015;9(4):60–66. (in Russ.)

14. COMSOL. Software COMSOL Multiphysics®. Understanding, forecasting, optimization of realistic physical processes and devices using numerical modeling. (in Russ.) URL: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics> [Accessed 7th August 2022]

15. Reis G.E. Dense Packing of Equal Circles Within a Circle. *Mathematics Magazine*. 1975;48(1):33–37. DOI:10.1080/0025570X.1975.11976434

16. E. Specht. The best known packings of equal circles in a circle (complete up to N = 2600). URL: <http://hydra.nat.uni-magdeburg.de/packing/cci/cci.html> [Accessed 21st November 2022]

Статья поступила в редакцию 02.09.2022; одобрена после рецензирования 18.11.2022; принята к публикации 21.11.2022.

The article was submitted 02.09.2022; approved after reviewing 18.11.2022; accepted for publication 21.11.2022.

Информация об авторах:

БЫЛИНА
Мария Сергеевна

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой фотоники и линий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

 <https://orcid.org/0000-0001-9818-4060>

ГУЛЬТЯЕВА
Людмила Александровна

ассистент кафедры фотоники и линий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

 <https://orcid.org/0000-0002-6064-9691>