

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

Оптимальный дизайн одномодового однородного волокна с несколькими сердцевинами, окруженными областью с пониженным показателем преломления, обеспечивающий минимальный уровень перекрестных помех*

Д.Кумар, Р.Ранджан

С целью снижения уровня перекрестных помех предложена оптимальная конструкция пяти различных структур (C1–C5) волокна с семью сердцевинами, окруженными «траншеей» (областью пониженного показателя преломления), у которых радиус сердцевины и относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки Δ_1 оптимальны для одномодового режима распространения. Исследованы перекрестные помехи и их уменьшение (в дБ) в зависимости от конструктивных параметров волокна, таких как глубина траншеи Δ_2 , ее ширина W_1 , и показано, что эксплуатационные параметры волокна – радиус изгиба, рабочая длина волны и длина волокна – также оказывают влияние на уровень перекрестных помех. Отмечено, что перекрестные помехи и их уменьшение чрезвычайно сильно зависят от Δ_1 и Δ_2 . Для всех предложенных структур рассчитаны и дисперсионные характеристики сердцевины, при этом на рабочей длине волны 1550 нм наблюдаемая дисперсия составила около -6 пс·нм⁻¹·км⁻¹. Сверхнизкие перекрестные помехи (не более -100 дБ/100 км) могут быть достигнуты, главным образом, с помощью двух предложенных структур сердцевины (C4 и C5), имеющих большие значения Δ_1 и небольшой радиус сердцевины для одномодового режима распространения. С целью реализации высокой пропускной способности реализована конструкция волокна с большим (до 55) числом сердцевины.

Ключевые слова: многосердцевинное волокно, профиль показателя преломления, волокно с траншеей показателя преломления, перекрестные помехи, величина снижения помех, большое число сердцевины.

1. Введение

Пространственное мультиплексирование (разделение каналов) с помощью волокон с множеством сердцевины (multi-core fiber, MCF) – один из наиболее перспективных методов удовлетворения экспоненциально растущей потребности в увеличении пропускной способности волоконных линий связи, возрастающей в 100 раз каждые 10 лет. В обычном одномодовом волокне с одной сердцевиной пропускная способность, как правило, ограничена на уровне 100 Тбит/с [1]. Увеличение диаметра сердцевины делает возможным распространение большего числа мод, что увеличивает пропускную способность, но при этом растут и межмодовые помехи. Применение MCF не только улучшает отношение пропускной способности и ширины полосы волоконной линии связи [2–4], но и значительно сокращает межмодовые помехи. Для достижения высокой пропускной способности волокна до начала его производства следует рассмотреть и проанализировать особенности MCF, связанные с тем, что наличие нескольких сердцевины в одной оболочке может привести к перекрестным помехам между ними (inter-core crosstalk, ICXT) [5]. По степени связи между сердцевинами можно

выделить MCF с сильной и слабой связью [6]. Для MCF со слабой связью ICXT являются одним из главных факторов, препятствующих распространению оптического сигнала, и пропорционально увеличиваются с ростом дальности передачи. В связи с этим уменьшение перекрестных помех в MCF – одна из главных проблем дальней волоконной связи с высокой пропускной способностью. Посредством выбора подходящей конструкции можно ограничить ICXT в MCF на определенном уровне (например, менее -30 дБ/100 км) [7]. В типичном случае для обеспечения перекрестных помех, не превышающих -30 дБ, коэффициент связи мод между двумя соседними сердцевинами должен быть меньше 10^{-2} на 1 м [6] при дальности передачи 10 км и более. Этого можно достичь, уменьшив плотность упаковки сердцевины и увеличив расстояния между ними до 40 мкм и более.

В последние годы сокращение перекрестных помех в MCF стало одной из главных задач развития дальней оптической связи с высокой пропускной способностью. Предложено несколько методических подходов к сокращению перекрестных помех, например создание области с пониженным показателем преломления (траншеи) вокруг каждой из сердцевины (trench-assisted MCF, TA-MCF) [8, 9], неравномерное распределение сердцевины по сечению волокна [6], использование разнонаправленных сигналов в соседних сердцевинах [6, 10] и др. Над анализом перекрестных помех в волокнах с несколькими сердцевинами работает много исследователей по всему миру [5–8, 10–14]. Некоторые последние достижения в данной области описаны в работах [9, 15–24], а результаты работ по характеристике и приложениям MCF – в [25–34]. В работах [8, 10] сокращение перекрестных помех в однородных MCF рассмотрено приближенным методом. Полу-

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

D.Kumar, R.Ranjan. Optical Fiber Communication and Photonics Lab, Department of Electronics and Communication Engineering, National Institute of Technology (NIT) Patna, Patna-800005, India; e-mail: dablu.ecel15@nitp.ac.in, rr@nitp.ac.in

Поступила в редакцию 6 февраля 2019 г., после доработки – 3 августа 2019 г.

чено аналитическое выражение для уменьшения перекрестных помех (ΔXT) в ТА–MCF-структуре по сравнению с обычным ступенчатым профилем показателя преломления. Авторы работы [10] проанализировали сокращение перекрестных помех приближенным методом в зависимости от относительной ширины траншеи ($R_{tr} = W_t/x_1$) и отношения разностей показателей преломления ($m = |\Delta_2|/\Delta_1$) между двумя соседними сердцевинами MCF для параметров, приведенных в табл.1 (см. разд.2). Результаты работы [10] были воспроизведены и подтверждены с использованием как приближенного, так и полуаналитического метода, включающего в себя моделирование методом конечных элементов и аналитические расчеты.

В настоящей статье исследование в работе [10] расширены с целью изучения перекрестных помех и их подавления в зависимости от таких конструктивных и рабочих параметров волокна, как Δ_1 , Δ_2 , ширина траншеи W_t , длина волны, дальность передачи и радиус изгиба, с применением полуаналитического подхода к пяти предложенным структурам сердцевин. Авторы работы [10] рассматривали анализ перекрестных помех и ΔXT в зависимости от выбора диапазона длин волн и отношения разностей показателей преломления, тогда как другие значимые параметры остались без внимания. В связи с этим новый анализ проводился для точно такой же структуры сердцевин, как и в табл.1 из работы [10], с включением всех упомянутых выше параметров волокна, и вновь полученные результаты сравнивались с результатами моделирования для всех пяти предложенных структур сердцевин. Это сравнение позволяет найти оптимальную структуру сердцевин для достижения ультранизкого уровня перекрестных помех в MCF. Структура с параметрами из табл.1 [10] обозначена как C0 [10]. Все пять 7-сердцевинных структур, использованных для анализа перекрестных помех в MCF, проектировались с различными сочетаниями значений радиуса сердцевины x_1 и Δ_1 при строгом выполнении условий одномодового распространения излучения с длиной волны отсечки около 1520 нм [13]. Для оценки коэффициента связи [33] и, следовательно, ICXT в MCF с учетом эффектов изгиба [11, 27] были использованы теория связанных мод (coupled mode theory, CMT) и теория связанных мощностей (coupled power theory, CPT) [5, 12]. Установлено, что результаты полуаналитического подхода весьма близки к результатам приближенного аналитического метода. Обсуждено также влияние числа взаимодействующих сердцевин на средний уровень мощности ICXT. Проверка дисперсионных характеристик осуществлена путем варьирования длины волны с целью убедиться в том, что разработанные структуры сердцевин MCF обладают достаточно малой дисперсией (менее $-5 \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$) на рабочей длине волны 1550 нм для обеспечения одномодового режима распространения.

Структура статьи следующая. В разд.2 описана конструкция оптимальных структур сердцевин волокна (C1–C5) и приведены их эффективные параметры. В разд.3 представлена методология оценки перекрестных помех и их уменьшения; здесь же стандартным методом выведено новое выражение для перекрестных помех при изгибе и закручивании волокна. В разд.4 обсуждаются дисперсионные характеристики всех пяти предложенных структур. Результаты рассмотрения поведения перекрестных помех и их уменьшения в зависимости от конструкции волокна и его рабочих параметров представлены в разд.5. В разд.6 обсуждается вопрос о том, какие MCF

предпочтительны для передачи сигнала на короткое расстояние, а какие – для дальней волоконной связи, а также освещается проблема создания волокон с большим (до 55) числом сердцевин с целью улучшения пропускной способности. Заключение и выводы сделаны в разд.7.

2. Предлагаемые конструкции многосердцевинных волокон

На рис.1,*a* показана структура волокна с простым ступенчатым профилем показателя преломления; одна из семи несвязанных сердцевин волокна находится в центре, а остальные шесть равномерно расположены по окружности радиусом 40 мкм. На рис.1,*б* аналогичная структура дополнена траншеей ТА-MCF. Было предложено пять различных структур ТА-MCF, обеспечивающих одномодовый режим распространения, радиус сердцевины которых изменялся от 3 до 5 мкм с соответствующим изменением Δ_1 , как показано в табл.1. У каждой структуры значение Δ_1 подбиралось для каждого радиуса сердцевин путем многократного моделирования, исходя из требования одномодового распространения излучения по сердцевинам волокна, тогда как в работе [10] вместо оптимального значения рассматривалось обобщенное значение Δ_1 (0.35 %).

Главная цель настоящей работы – поиск оптимальной структуры сердцевин для ультранизкого уровня перекрестных помех при сохранении одномодового режима. Использование траншеи вокруг сердцевин MCF [6, 9] – один из важных методов уменьшения связи (и, следовательно, ICXT) между двумя соседними сердцевинами до существенно низкого уровня. Траншея представляет собой граничную структуру, у которой показатель преломления ниже, чем у сердцевины и оболочки.

Для одной из сердцевин MCF на рис.2 показаны простой ступенчатый профиль и профиль с траншеей показателя преломления. Здесь x_1 – радиус сердцевины, x_2 и x_3 – расстояния от центра сердцевины до внутреннего и внешнего краев траншеи, причем $x_2 = 2x_1$. Ширина траншеи W_t предполагалась равной 5 мкм для всех пяти предложенных структур, тогда как для C0 [10] она равнялась 4.5 мкм. Показатель преломления сердцевины n_1 одинаков для профилей с траншеей и без нее, n_2 – показатель преломления в траншее, а $n_0 = 1.45$ – в оболочке. Относительная разность показателей преломления сердцевина–оболочка обозначена через Δ_1 , а оболочка–траншея – через Δ_2 . Расстояние между любыми двумя соседними сердцевинами (шаг структуры Λ) должно быть таким, чтобы каждая сердцевина MCF вела себя как отдельный пространственный канал. Длина волокна L , шаг структу-

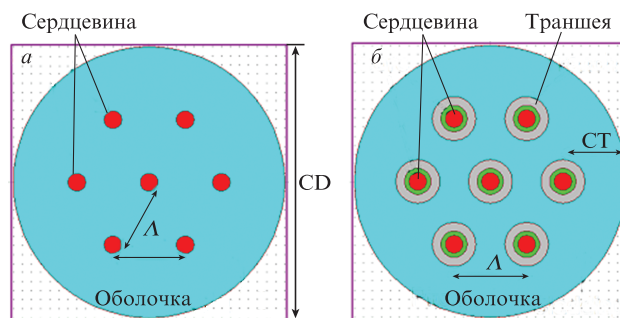


Рис.1. Структура MCF с семью несвязанными сердцевинами, равномерно распределенными с шагом $\Lambda = 40$ мкм (*a*); *б* – соответствующая ей структура ТА-MCF.

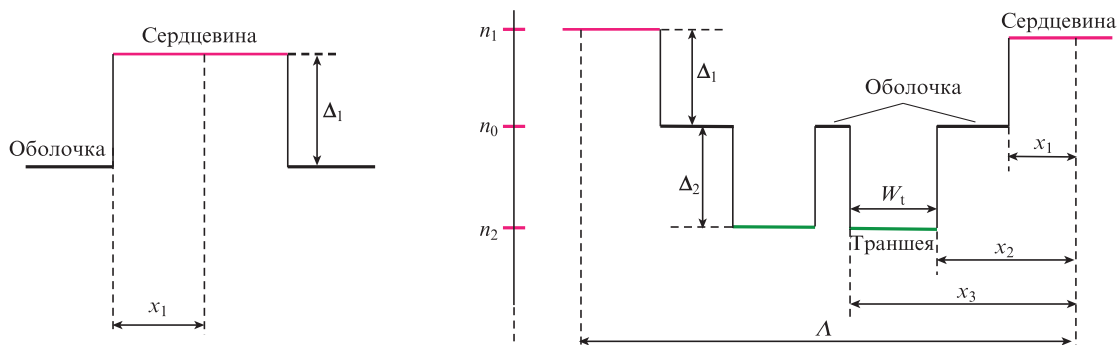


Рис.2. Простой ступенчатый профиль показателя преломления волокна (слева) и часть профиля волокна с траншеями показателя преломления (справа) [14].

Табл. 1. Конструктивные параметры волокна с однородным распределением нескольких сердцевин.

Параметр	C0 [10]	C1	C2	C3	C4	C5
Радиус сердцевины x_1 (мкм)	4.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0
Диаметр оболочки (CD) (мкм)	125	125	125	125	125	125
Показатель преломления сердцевины n_1	1.4551	1.4558	1.4559	1.4575	1.4598	1.4632
Показатель преломления оболочки n_0	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
Относительная разность показателей преломления сердцевина-оболочка Δ_1 (%)	0.35	0.33	0.40	0.51	0.67	0.90
Эффективный показатель преломления n_{eff}	1.452454	1.452451	1.453115	1.453921	1.455188	1.456957
Эффективная площадь моды A_{eff} (мкм ²)	93.6	75.8	59.7	45.6	34	
Длина волны отсечки λ_c (нм)	1517	1514	1517	1518	1511	
n_{eff} оболочки с траншеей при $\Delta_2 = -0.70\%$	1.452519	1.453089	1.453892	1.455157	1.456921	
n_{eff} оболочки с траншеей при $\Delta_2 = -1.40\%$	1.452512	1.453081	1.453882	1.455144	1.456904	

ры Λ и рабочая длина волны λ были взяты равными 100 км, 40 мкм и 1550 нм соответственно. Детальная спецификация конструкции и эффективных параметров моды приведена в табл. 1.

3. Анализ перекрестных помех между сердцевинами

Перекрестные помехи (crosstalk, ХТ) можно определить как помехи, обусловленные наложением магнитного/электрического поля сигнала на сигналы в соседних сердцевинах. Из-за присутствия многочисленных близко-расположенных сердцевин в одной оболочке перекрестные помехи между соседними сердцевинами являются ключевым фактором. Их можно численно характеризовать мощностью оптического сигнала, поскольку некоторая часть оптической мощности, распространяющейся по одной из сердцевин, попадает в соседние сердцевин в процессе передачи (рис.3). ICХТ между двумя соседними сердцевинами можно выразить как ХТ (дБ) = $10\lg(P'/P)$, где P и P' – оптическая мощность на выходе той сердцевины q , в которую вводился сигнал, и соседней сердцевины p соответственно [9].

Для анализа развития перекрестных помех принято использовать полуаналитический метод, в котором сначала численно определяют значение постоянной распространения моды β в отдельно взятой сердцевине с помощью метода конечных элементов, а затем это значение β

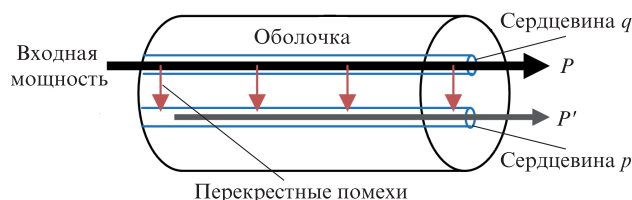


Рис.3. Передача введенной в сердцевину мощности сигнала в соседнюю сердцевину [9].

используют в методе СМТ/СРТ для оценки перекрестных помех. Теория связанных мод (СМТ) – мощный пертурбативный метод анализа эффектов связи между соседними сердцевинами в оптическом волокне. Если две сердцевинны расположены достаточно близко друг к другу, то распространяющиеся в каждой сердцевине моды оказываются связанными друг с другом и могут интерферировать. Если же распределение электромагнитного поля в этих сердцевинах в результате такого взаимодействия изменяется мало, то связанные сердцевинны можно описывать с помощью СМТ-подхода. Обычно уравнения для связанных мод записывают следующим образом [12]:

$$\frac{dA_p}{dz} = -j \sum_{p \neq q} k_{pq} A_q(z) \exp(j\Delta\beta_{pq}z) f(z), \tag{1}$$

где A_p и A_q – амплитуды моды в сердцевинах p и q ; $\Delta\beta_{pq} = \beta_p - \beta_q = -\Delta\beta_{qp}$ – разность постоянных распространения

между сердцевинами p и q ; z – координата в направлении распространения;

$$f(z) = \exp[j(\Phi_p - \Phi_q)]\delta f(z) \tag{2}$$

– случайная фазовая функция, отвечающая за эффекты скручивания и изгиба оптического волокна, которые меняют оптическую длину. Здесь первая часть, $\exp[j(\Phi_p - \Phi_q)]$, существенно детерминистическая, а вторая часть, $\delta f(z)$, – стационарный случайный процесс; Φ_p и Φ_q – фазы полей в сердцевинах p и q вследствие изгиба и скручивания. Коэффициент связи мод k_{pq} можно выразить в виде [35]

$$k_{pq} = \frac{\sqrt{\Delta_1}}{x_1} \frac{U_1^2}{V_1^3 K_1^2(W_1)} \sqrt{\frac{\pi x_1}{W_1 \Lambda}} \exp\left(-\frac{W_1 \Lambda}{x_1}\right), \tag{3}$$

где $W_1 = x_1(\beta^2 - k^2 n_0^2)^{1/2}$; $U_1 = x_1(k^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}$; $\beta = kn_{\text{эфф}}$ – постоянная распространения моды; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны света в вакууме; $V_1 = 2\pi x_1 n_1 \times (2|\Delta_1|)^{1/2}/\lambda$ – нормированная частота; $K_1(W_1)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка.

Другой подход – теория связанных мощностей (СРТ) – полностью основан на принципе измерения мощности сигнала, когда мощность, введенная в одну сердцевину на входе волокна, переносится в соседние сердцевин и выходит из них. По сравнению с СМТ, СРТ позволяет точнее и быстрее оценить средний уровень перекрестных помех в MCF [12] с учетом усредненного вклада эффектов изгиба и кручения [11]. Уравнения связанных мощностей можно записать в виде [12]

$$\frac{dP_p}{dz} = \sum_{p \neq q} h_{pq}(z)[P_q(z) - P_p(z)], \tag{4}$$

где P_p и P_q – средние мощности сигналов в сердцевинах p и q ; h_{pq} – коэффициент связи по мощности между сердцевинами p и q . При простейшем решении уравнений связи можно получить выражение для коэффициента связи по мощности [6]

$$h_{pq} = \frac{2k_{pq}^2 R_b}{\beta \Lambda}, \tag{5}$$

где R_b – радиус изгиба. Следовательно, окончательное выражение для среднего уровня перекрестных помех X_{T_μ} между двумя соседними сердцевинами в MCF можно записать как [5]

$$X_{T_\mu} \simeq h_{pq} L \simeq \frac{2k_{pq}^2 R_b}{\beta \Lambda} L. \tag{6}$$

Уравнение (6) описывает прямую зависимость среднего уровня перекрестных помех от коэффициента связи мод, радиуса изгиба волокна, длины волокна и шага структуры наряду с непрямой зависимостью от длины волны и эффективного показателя преломления. Главное, что оно учитывает влияние условий изгиба волокна. Более того, для учета влияния закручивания вместе с изгибом было выведено новое выражение для h_{pq} с использованием коэффициента дискретных изменений K_{pq} [5], который обусловлен связью сердцевин q с сердцевинной p :

$$K_{pq} \simeq \sqrt{\frac{k_{pq}^2 R_b}{\beta \Lambda}} \frac{2\pi}{\gamma} \exp\left[-j\left(\frac{\beta \Lambda}{\gamma R_b} - \frac{\pi}{4}\right)\right], \tag{7}$$

где γ – коэффициент закручивания волокна [24]. При анализе результатов моделирования было установлено, что

$h_{pq} \simeq |K_{pq}|^2$. Поэтому упрощенное выражение для перекрестных помех в условиях изгиба и кручения имеет следующий вид [34]:

$$X_{T_\mu} \simeq h_{pq} L \simeq \frac{2k_{pq}^2 R_b}{\beta \Lambda} \frac{\pi}{\gamma} \exp\left[-j\left(\frac{2\beta \Lambda}{\gamma R_b} - \frac{\pi}{2}\right)\right] L. \tag{8}$$

Существенно, что уравнение (6) – это частный случай уравнения (8) при коэффициенте закручивания $\gamma = \pi$ рад/м, где экспоненциальный член оказывает пренебрежимо малое влияние на величину перекрестных помех. В ТА-MCF коэффициент связи мод для двух соседних сердцевин [8, 10]

$$k'_{pq} = \frac{\sqrt{\Gamma} \sqrt{\Delta_1}}{x_1} x_1 \frac{U_1^2}{V_1^3 K_1^2(W_1)} \sqrt{\frac{\pi x_1}{W_1 \Lambda}} \times \exp\left(-\frac{W_1 \Lambda + 2(W_2 - W_1)W_1}{x_1}\right), \tag{9}$$

где $W_2 = (V_2^2 + W_1^2)^{1/2}$; $V_2 = 2\pi x_1 n_0 (2|\Delta_2|)^{1/2}$; $\Gamma = W_1/[W_1 + (W_2 - W_1)W_1/\Lambda]$. Остальные параметры те же, что и раньше. При наличии более чем одной соседней сердцевин средний уровень перекрестных помех численно оценивался для выбранной сердцевин как сумма ICXT от всех соседних сердцевин.

Величину уменьшения перекрестных помех ΔX_T (в дБ) за счет использования волокна с траншеями вокруг сердцевин вместо волокна с простым ступенчатым профилем показателя преломления можно выразить следующим образом [8]:

$$\Delta X_T \simeq 17.4(W_2 - W_1) \frac{W_1}{x_1} - 10 \lg \Gamma, \tag{10}$$

где приближенно $W_1 = 1.1428V_1 - 0.996$ при $0 < \Gamma < 1$.

4. Анализ дисперсии

Наряду с перекрестными помехами, серьезным препятствием является дисперсия – расплывание импульса при распространении сигнала по MCF. При конструировании сердцевин, удовлетворяющей условиям одномодового распространения, дисперсия должна находиться в допустимых пределах (менее $21 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$) [20]. Результаты проведенного обобщенного анализа дисперсии показаны на рис.4 для частного случая распространения основной моды LP₀₁. Дисперсия $D(\lambda)$ пропорциональна второй производной эффективного показателя преломления $n_{\text{эфф}}$ по длине волны [9, 23], и обычно

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re} n_{\text{эфф}}}{d\lambda^2} \text{ (пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}), \tag{11}$$

где c – скорость света в вакууме; $\text{Re} n_{\text{эфф}}$ – действительная часть $n_{\text{эфф}}$. Из рис.4 видно, что влияние дисперсии, которая не превышает $-6 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ на $\lambda = 1550 \text{ нм}$, очень мало для всех предложенных структур.

5. Результаты численного моделирования

Поведение ICXT анализировалось для всех пяти предложенных структур ТА-MCF относительно конструктивных (Δ_1, Δ_2, W_1) и рабочих (R_b, λ, L) параметров волокна. Путем численного моделирования с применением метода конечных элементов был рассчитан эффективный показате-

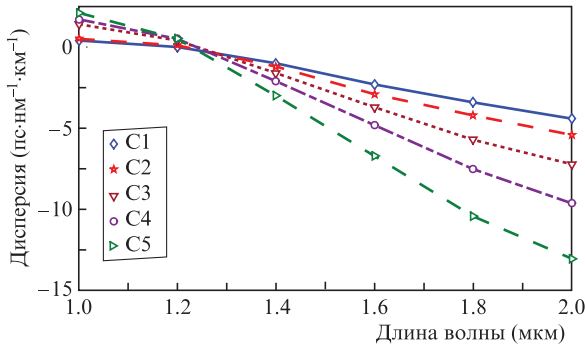


Рис.4. Зависимости дисперсии от длины волны для пяти предложенных структур на примере моды LP₀₁.

тель преломления, использованный далее при аналитическом вычислении перекрестных помех в условиях различных ограничений, накладываемых на волокно как с обычным ступенчатым, так и с траншейным профилем показателя преломления. Далее результаты, полученные для предложенных структур волокна, сравнивались по упомянутым выше конструктивным и рабочим параметрам с результатами заново проделанного моделирования для C0 [10] с $x_1 = 4.5$ мкм и $\Delta_1 = 0.35\%$.

5.1. Зависимость перекрестных помех от разности показателей преломления Δ_1

Обычно диаметр сердцевины волокна для одномодового распространения составляет 6–10 мкм. На рис.5 проиллюстрирована связь между $Re n_{eff}$ и Δ_1 в этом диапазоне диаметров сердцевины. Видно, что $Re n_{eff}$ постепенно растет с увеличением Δ_1 , тогда как мнимая часть n_{eff} примерно равна нулю. Изменение диаметра сердцевины значительно увеличивает n_{eff} , что, в свою очередь, существенно снижает перекрестные помехи. Рассчитанные значения n_{eff} затем используются для определения фактического уровня перекрестных помех и их уменьшения (в дБ) в ТА-MCF (рис.6 и 7). Видно, что уровень перекрестных помех сильно зависит от Δ_1 , его снижение весьма значительно, но в то же время уменьшается и степень локализации моды в сердцевине [15], что способствует повышению уровня перекрестных помех. Поэтому величину

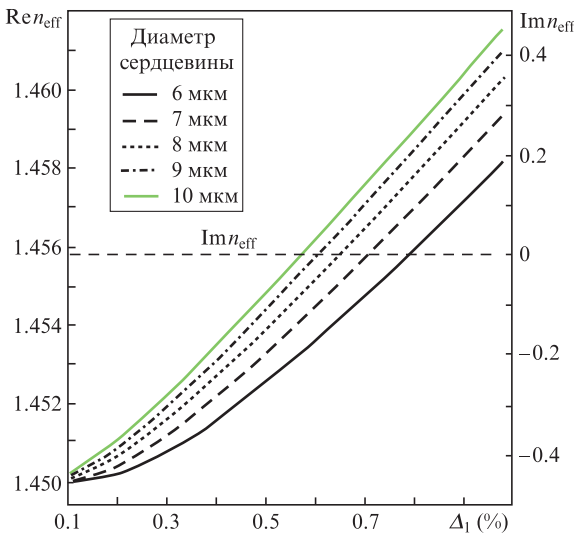


Рис.5. Связь между $Re n_{eff}$ и Δ_1 при различных диаметрах сердцевины.

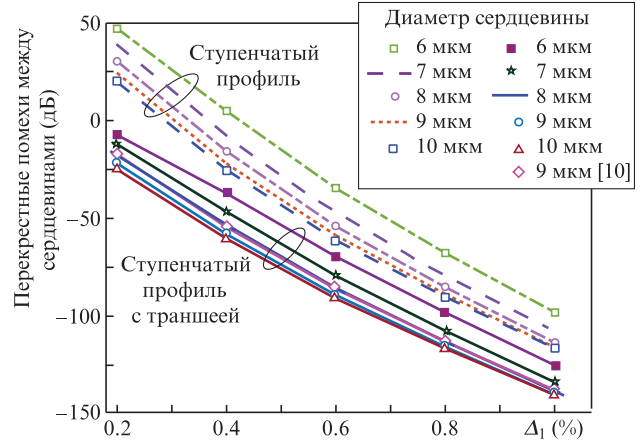


Рис.6. Зависимости перекрестных помех от Δ_1 при шаге структуры $\Lambda = 40$ мкм и $W_1 = 5$ мкм.

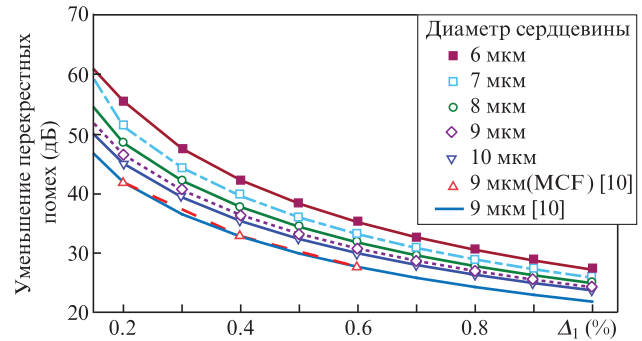


Рис.7. Зависимости уменьшения перекрестных помех ΔXT от Δ_1 при $\Lambda = 40$ мкм и $W_1 = 5$ мкм.

Δ_1 следует выбирать очень точно с учетом баланса факторов перекрестных помех и локализации моды. Так, при диаметре сердцевины $2x_1 = 9$ мкм и $\Delta_1 > 0.40\%$ происходит распространение высших мод по сердцевинам MCF, что ухудшает свойства волокна по отношению к перекрестным помехам. Следовательно, $\Delta_1 = 0.40\%$ – оптимальное значение при диаметре сердцевины 9 мкм. Оптимальные значения Δ_1 для всех других рассмотренных диаметров сердцевины, приведенные в табл.1, были определены аналогично, исходя из требования, чтобы в сердцевинах распространялась только одна основная мода и отсутствовали моды высших порядков.

Результаты, полученные для пяти предложенных структур волокна, сравнивались с результатами моделирования структуры с параметрами C0 [10] ($W_1 = x_1$) при тех же значениях таких параметров волокна, как радиус изгиба, длина волокна, расстояние между сердцевинами, длина волны и т.д. для определения ICXT отдельной сердцевины. Из рис.6 видно, что C1 ($2x_1 = 10$ мкм) и C2 ($2x_1 = 9$ мкм) по подавлению перекрестных помех превосходят структуру C0 [10], тогда как C3 – C5 имеют относительно худшие характеристики, главным образом из-за меньшего радиуса сердцевины при фиксированном значении Δ_1 . Как обсуждалось в работе [10] и подтверждается на рис.7, результаты полуаналитического подхода с использованием метода конечных элементов весьма близки к результатам приближенного метода. В связи с этим в настоящей работе перекрестные помехи для всех предложенных структур волокна анализировались только с применением полуаналитического подхода.

5.2. Зависимость перекрестных помех от глубины траншеи Δ_2

Результаты аналогичного анализа зависимости перекрестных помех и их уменьшения от глубины траншеи Δ_2 для всех представленных структур на длине волны 1550 нм при радиусе изгиба 140 мм и шаге структуры 40 мкм показаны на рис.8 и 9. Из рис.9 следует, что большего уменьшения перекрестных помех можно достичь при больших диаметрах сердцевин и больших значениях Δ_2 , что, в основном, обусловлено более сильной локализацией мод и, следовательно, меньшим перекрытием мод соседних сердцевин при большей глубине траншеи. В то же время выбор меньшего значения Δ_1 (как у C1) может повысить уровень перекрестных помех (рис.8). Следовательно, при подходящем выборе более высоких значений Δ_1 и Δ_2 можно достичь сверхнизкого уровня перекрестных помех между соседними сердцевинами MCF. Из рис.8 видно, что все пять предложенных структур волокна с оптимальной конструкцией по подавлению перекрестных помех значительно превосходят C0 [10] при тех же рабочих параметрах.

5.3. Зависимость перекрестных помех от ширины траншеи W_t

Ширина траншеи W_t играет заметную роль в снижении уровня перекрестных помех в MCF. Изменение ширины траншеи и его влияние на уровень перекрестных помех и его понижение показаны на рис.10 и 11. Для всех рассмотренных структур волокна понижение уровня перекрестных помех становится больше с ростом W_t при прочих неизменных его параметрах. Из рис.10 видно, что уровень перекрестных помех в MCF можно значительно понизить путем выбора существенно больших значений

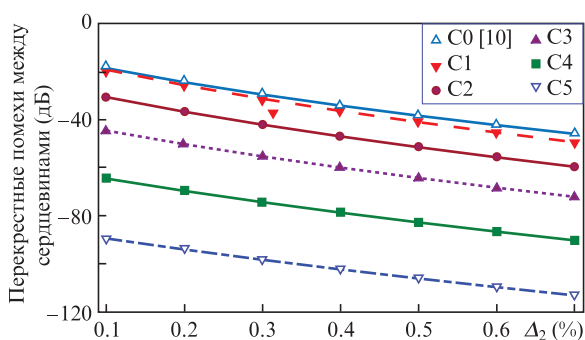


Рис.8. Зависимости перекрестных помех от относительной разности показателей преломления оболочка–траншея Δ_2 при $\Lambda = 40$ мкм и $W_t = 5$ мкм.

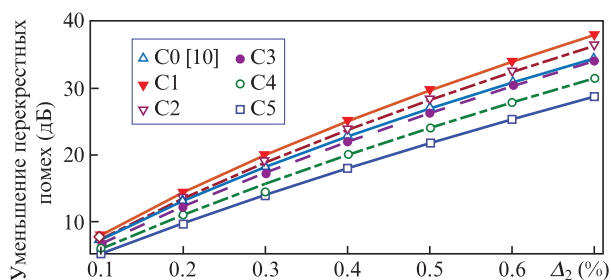


Рис.9. Зависимости уменьшения перекрестных помех от Δ_2 при $\Lambda = 40$ мкм и $W_t = 5$ мкм.

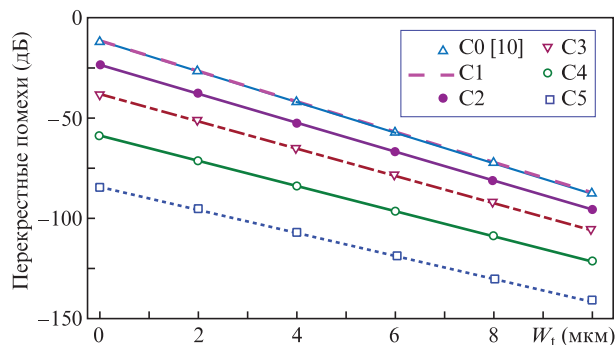


Рис.10. Зависимости перекрестных помех от W_t при $\Lambda = 40$ мкм.

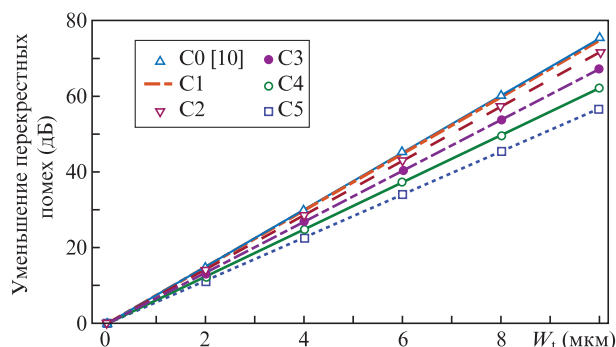


Рис.11. Зависимости уменьшения перекрестных помех от W_t при $\Lambda = 40$ мкм и $\lambda = 1550$ нм.

Δ_1 и Δ_2 . Например, ультранизкий уровень перекрестных помех (менее -100 дБ/100 км) может быть достигнут в случае $\Delta_2 = -0.70\%$ при ширине траншеи более 3 и 6 мкм для C5 и C4 соответственно. Кроме того видно, что C2–C5 дают существенно лучшие результаты по уровням ICXT, чем C0 [10] (тогда как C1 мало отличается от C0 [10]).

Различие в n_{eff} между сердцевиной с обычным ступенчатым профилем и сердцевиной с траншеей составляет $\sim 10^{-5}$ (см. табл.1), что слабо влияет на изменение длины волны отсечки. Теоретическая длина волны отсечки вне кабеля больше, чем практическая длина волны отсечки в кабеле (она может быть меньше 1500 нм). Следовательно, все структуры с траншеей работают только на основной моде LP_{01} за длиной волны отсечки первой моды высшего порядка LP_{11} .

В пп.5.1–5.3 анализировались и обсуждались конструктивные параметров волокна, которые требуют тщательного выбора до начала изготовления волокна, поэтому проведенный анализ весьма полезен, т.к. позволяет достичь существенного снижения перекрестных помех между сердцевинами MCF при условии одномодового режима распространения. Анализ (см. ниже) касается, в основном, рабочих параметров волокна, таких как радиус изгиба, длина волны и дальность передачи. После изготовления волокна влиять на его конструктивные параметры нельзя, поэтому можно исследовать влияние только на перекрестные помехи рабочих параметров. Более того, в разд.6 указано, какие структуры волокна предпочтительны для ближней и дальней оптической связи с точки зрения перекрестных помех, дисперсии и эффективной площади моды.

5.4. Зависимость перекрестных помех от изгиба

Результаты исследования влияния изгиба волокна на характеристики перекрестных помех представлены на

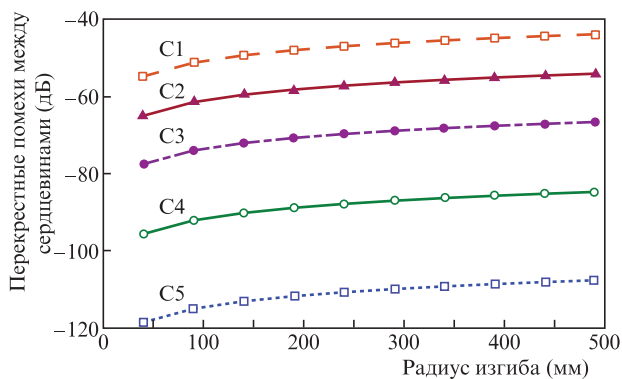


Рис.12. Зависимости перекрестных помех от радиуса изгиба волокна при $\Delta_2 = -0.70\%$ и $\Lambda = 40$ мкм.

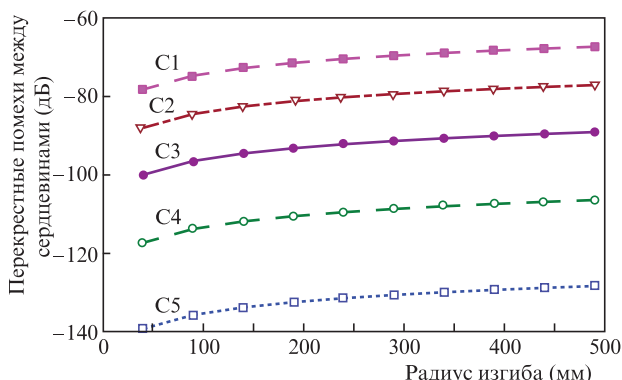


Рис.13. Зависимости перекрестных помех от радиуса изгиба волокна при $\Delta_2 = -1.40\%$ и $\Lambda = 40$ мкм.

рис.12 и 13 для глубин траншеи -0.70% и -1.40% для всех предложенных структур волокна. Перекрестные помехи медленно растут с увеличением радиуса изгиба волокна. Снижение уровня перекрестных помех наблюдается при глубине траншеи -1.40% (см. п.5.2). Видно, что при радиусе изгиба волокна 140 мм C3–C5 имеют ультранизкий (менее -70 дБ) уровень перекрестных помех, который обусловлен, главным образом, сильной локализацией мод и, следовательно, меньшей связью между соседними сердцевинами, поскольку для этих структур характерны большие значения Δ_1 и малые значения x_1 .

5.5. Зависимость перекрестных помех от длины волны

Анализ перекрестных помех в зависимости от длины волны весьма важен с точки зрения распространения сигнала, особенно в оптических системах и в сетях с разделением каналов по длине волны. [22]. Для анализа перекрестных помех при разных длинах волн рассматривался широкий диапазон рабочих длин волн – от 1530 до 1620 нм, поскольку потери на ослабление сигнала в этом диапазоне не превышают 0.2 дБ/км [20]. В процессе анализа результатов моделирования было обнаружено, что с увеличением длины волны действительная часть n_{eff} уменьшается незначительно (рис.14). Зависимости уровня перекрестных помех от длины волны для всех рассматриваемых структур показаны на рис.15 и 16 при глубинах траншеи $\Delta_2 = -0.70\%$ и -1.40% . В широком диапазоне длин волн углубление траншеи приводит к подавлению перекрестных помех (рис.16). Понижение n_{eff} приводит к повышению уровня перекрестных помех MCF (рис.15 и 16).

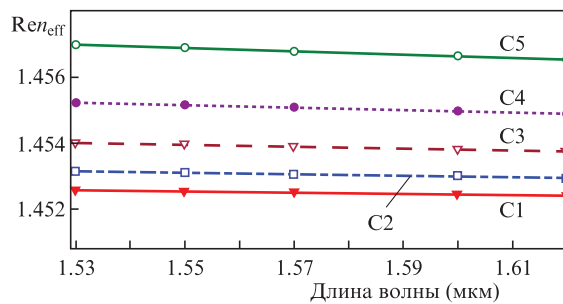


Рис.14. Зависимости Ren_{eff} от длины волны для пяти различных структур волокна

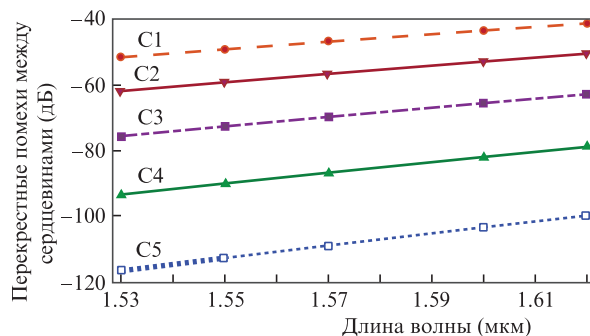


Рис.15. Зависимости перекрестных помех от длины волны при $\Delta_2 = -0.70\%$ и $\Lambda = 40$ мкм.

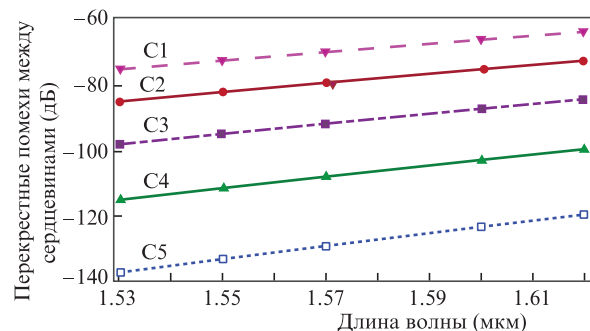


Рис.16. Зависимости перекрестных помех от длины волны при $\Delta_2 = -1.40\%$ и $\Lambda = 40$ мкм.

5.6. Зависимость перекрестных помех от длины волокна

Оптоволоконные кабели предпочтительны для каналов дальней связи с высокой пропускной способностью. Как видно из формулы (6), перекрестные помехи в MCF непосредственно зависят от длины волокна. Результаты расчета перекрестных помех при изменении дальности передачи до 10000 км [5, 9] для всех пяти предложенных структур волокна при распространении основной моды LP_{01} показаны на рис.17 и 18 для относительных глубин траншеи $\Delta_2 = -0.70\%$ и -1.40% . Рабочая длина волны, шаг структуры и радиус изгиба волокна предполагались равными 1550 нм, 40 мкм и 140 мм соответственно. Результаты полуаналитического расчета с использованием метода конечных элементов показывают, что повышение уровня перекрестных помех между сердцевинами достигает 10 дБ при увеличении дальности в 10 раз для всех пяти различных структур волокна. При дальности передачи 100 км ультранизкий уровень перекрестных помех (не более -70 дБ) достигается для C3–C5.

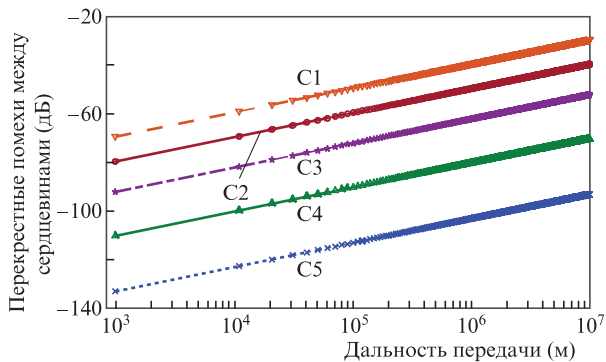


Рис.17. Зависимости перекрестных помех от длины волокна при $\Delta_2 = -0.70\%$ и $\Lambda = 40$ мкм.

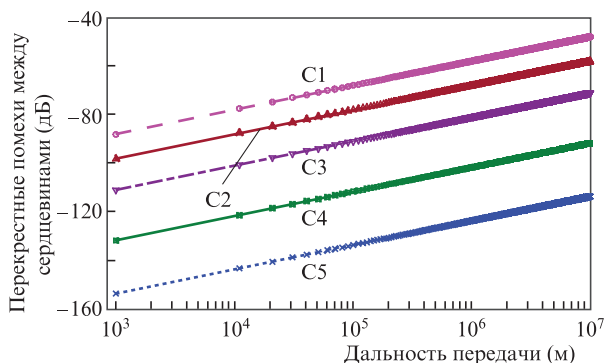


Рис.18. Зависимости перекрестных помех от длины волокна при $\Delta_2 = -1.40\%$ и $\Lambda = 40$ мкм.

6. Обсуждение результатов

Наихудший уровень перекрестных помех в отдельно взятой сердцевине получается при учете вклада от всех соседних сердцевин. Рост среднего уровня мощности ICXT при наличии многих соседних волокон, вносящих помехи, и одинаковом расстоянии между всеми сердцевинами составляет $10\lg N_i$ (дБ) по сравнению со случаем единственной соседней сердцевин; здесь N_i – число сердцевин, вносящих помехи. В структуре MCF с семью сердцевинами, имеющими гексагональную плотную упаковку, центральная сердцевина получает помехи от шести, а периферийная – от трех соседей. В результате средний уровень перекрестных помех увеличивается на 7.8 и 4.8 дБ соответственно по сравнению со случаем одной соседней сердцевин, вносящей помехи.

В табл.2 представлены уровни помех ХТ и величины их уменьшения $\Delta\text{ХТ}$ для всех рассмотренных структур при наличии траншеи и фиксированных параметрах волокна $R_b = 140$ мм, $\lambda = 1550$ нм, $\Lambda = 40$ мкм, $W_1 = 5$ мкм и

$L = 100$ км. Видно значительное улучшение характеристик перекрестных помех волокна от С1 к С5, главным образом из-за соответствующего увеличения Δ_1 и уменьшения χ_1 . В С4 и С5 при распространении моды LP_{01} достигнут ультранизкий уровень перекрестных помех (менее -100 дБ/100 км), рекордный для MCF с семью сердцевинами, что намного лучше результатов работ [5, 13, 17]. Однако С4 и С5 имеют малую эффективную площадь моды, что не подходит для дальней связи, поэтому их целесообразно использовать на малых расстояниях в таких приложениях, как оптические внутренние разъемы [30], MCF-сенсоры и др. Для дальней связи вполне приемлемы структуры С2 и С3, поскольку у них низкий уровень перекрестных помех между сердцевинами (менее -30 дБ/100 км), а эффективная площадь моды составляет $60-90$ мкм², что соответствует стандартам, используемым в телекоммуникационных службах.

Более того, для повышения пропускной способности волокна с большим числом сердцевин диаметр оболочки должен быть большим [16, 21], что создает проблемы при изгибе волокна [6, 18, 19]. Структура MCF с числом гексагонально упакованных сердцевин 55 (рис. 19) может быть реализована в оболочке диаметром $CD = 302$ мкм при $\Lambda = 32$ мкм и расстоянии от центра крайних сердцевин до границы оболочки $CT = 35$ мкм (см. рис. 1), согласно формуле $CD = 7\Lambda/\cos 15^\circ + (2CT)$ мкм.

Реализация 55-сердцевинного MCF возможна с предложенной С5 с нормальным ступенчатым профилем показателя преломления при целевом значении ICXT не более -30 дБ/100 км. Этот тип сердцевинной структуры может упростить конструкцию за счет отказа от траншейного профиля и замены его обычным. Численно было установлено, что С5 с простым ступенчатым профилем имеет уровень перекрестных помех -42 дБ, что лучше, чем при наличии траншеи в С0 [10], где уровень перекрестных помех составляет около -20 дБ при глубине траншеи -0.70% и -41 дБ при увеличении глубины траншеи до -1.40% . Анализ также показал, что можно ожидать создания 55-

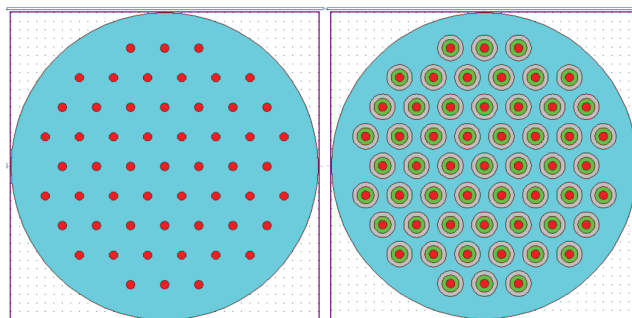


Рис.19. Волокно с 55 сердцевинами с простым ступенчатым профилем (слева) и с траншеями показателя преломления (справа).

Табл.2. Уровень перекрестных помех ХТ и величина его уменьшения $\Delta\text{ХТ}$.

Структура	ХТ без траншеи (дБ)	Траншея, $\Delta_2 = -0.70\%$		Траншея, $\Delta_2 = -1.40\%$	
		ХТ (дБ)	$\Delta\text{ХТ}$ (дБ)	ХТ (дБ)	$\Delta\text{ХТ}$ (дБ)
С0 [10]	-11.49	-45.91	34.42	-67.04	55.55
С1	-11.44	-49.37	37.94	-72.79	61.35
С2	-23.48	-59.58	36.01	-82.57	59.08
С3	-38.06	-72.08	34.02	-94.55	56.49
С4	-58.75	-90.18	31.43	-111.88	53.13
С5	-84.36	-113.05	28.69	-133.81	49.45

сердцевинного MCF со всеми предложенными структурами сердцевин с траншейным профилем и наихудшим ожидаемым уровнем перекрестных помех (до -38 дБ/100 км). Тем не менее траншейная технология представляет собой замечательный подход к подавлению перекрестных помех в MCF, особенно при меньшем числе сердцевин, например 7, 12 и т. д. В то же время для достижения высокой пропускной способности предпочтительнее волокна с большим числом сердцевин, что усложняет конструкцию, особенно в случае TA-MCF. Следовательно, как сообщалось в работах [6, 10], в сравнении с TA-MCF структуры C4 и C5 с простыми ступенчатыми профилями показателя преломления при условии одномодового распространения более эффективны для упрощения конструкции и снижения стоимости.

7. Заключение

С целью достижения сверхнизкого уровня перекрестных помех в многосердцевинных волокнах предложено пять вариантов структуры сердцевин с диаметрами 6–10 мкм и соответствующими значениями относительной разности показателей преломления между сердцевиной и оболочкой Δ_1 , обеспечивающими одномодовый режим распространения с длиной волны отсечки около 1520 нм. Расчеты перекрестных помех проводились полуаналитическим методом для 7-сердцевинного однородного волокна с траншеями показателя преломления вокруг сердцевин. Исследованы уровень перекрестных потерь и его изменение при изменении таких конструктивных параметров волокна, как относительная разность показателей преломления сердцевина–оболочка Δ_1 , оболочка–траншея Δ_2 (т. е. глубина траншеи) и ширина траншеи. Из результатов моделирования видно, что уровень перекрестных помех и его изменение существенно зависят от указанных параметров. Оптимальным подбором значений Δ_1 и Δ_2 можно добиться ультранизкого уровня перекрестных помех при значительно меньших радиусах сердцевин. Более того, было продемонстрировано влияние на перекрестные помехи ряда рабочих параметров волокна – радиуса изгиба, рабочей длины волны и длины волокна – для основной моды LP₀₁. Для каждого из перечисленных параметров волокна перекрестные помехи у всех пяти предложенных структур сердцевин сравнивались с таковыми для C0 [10], и было обнаружено, что предложенные структуры значительно превосходят последнюю. Результаты моделирования всех предложенных структур продемонстрировали существенно более низкую дисперсию (примерно -6 пс·нм⁻¹·км⁻¹ на длине волны 1550 нм). Ультранизкий уровень перекрестных помех (не более -100 дБ/100 км) можно реализовать с использованием C4 и C5 при подходящем выборе Δ_1 и радиуса сердцевин. Предложено MCF с числом сердцевин 55 и простым ступенчатым профилем показателя преломления по схеме C5 в оболочке диаметром 302 мкм, чтобы уменьшить вероятность отказа волокна при его изгибе и упростить конструкцию по сравнению со случаем использования сердцевин, окруженных траншеями. Структуры C2 и C3 (с оптимальными радиусами сердцевин 4.5, 4 мкм и $\Delta_1 \approx 0.4\%$, 0.5% соответственно) вполне приемлемы для дальних телекоммуникаций, т. к. они имеют низкие перекрестные помехи (менее -30 дБ/100 км) и солидную эффективную площадь моды (от 60 до 90 мкм²), которая соответ-

ствует стандартам телекоммуникационных служб. Радиус сердцевин меньше 4 мкм с оптимальным для него значением Δ_1 соответствует стандартам ITU-T G.653. Эффективная площадь моды при этом немного меньше, чем у систем, используемых в стандартах ITU-T G.652 для служб связи. Это практически не ухудшает свойств одноканальной системы и, напротив, может создавать ограничения для системы с пространственным разделением каналов. Проведенный анализ, предшествующий процессу изготовления, весьма полезен для проектирования и характеристики многосердцевинных волокон с ультранизкими перекрестными помехами, низкой дисперсией и приемлемой эффективной площадью моды.

Данная работа является частью проекта Early Career Research Award (ECR/2017/000735), финансируемого Комиссией по научным и техническим исследованиям Департамента науки и технологии Правительства Индии. Авторы благодарны Национальному технологическому институту Патна за поддержку, значение которой трудно переоценить.

- Desurvire E.B. *J. Lightwave Technol.*, **24** (12), 4697 (2006).
- Essiambre R.J., Ryf R., et al. *IEEE Phot. J.*, **5** (2), 0701307 (2013).
- Richardson D.J., Fini J.M., et al. *Nature Photon.*, **7**, 354 (2013).
- Puttnam B.J., Luís R.S., et al., in *Proc. Europ. Conf. Netw. Opt. Comm.* (Portugal, 2016, pp 1–3).
- Hayashi T., Taru T., et al. *Opt. Express*, **19** (17), 16576 (2011).
- Saitoh K., Matsuo S. *J. Lightwave Technol.*, **34** (1), 55 (2016).
- Yao B., Ohsono K., et al., in *Proc. Opt. Fib. Comm. Conf. Exp., Nat. Fiber Opt. Eng. Conf.* (Los Angeles, USA, 2012, pp 1–3).
- Ye F., Tu J., et al. *Opt. Express*, **22** (19), 23007 (2014).
- Kumar D., Ranjan R. *Opt. Fib. Techn.*, **41**, 95 (2018).
- Ye F., Tu J., et al. *J. Lightwave Technol.*, **34** (18), 4406 (2016).
- Fini J.M., Zhu B., et al. *Opt. Express*, **18** (14), 15122 (2010).
- Koshiha M., Saitoh K., et al. *Opt. Express*, **19** (26), B102 (2011).
- Saitoh K., Koshiha M., et al. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **24** (21), 1898 (2012).
- Kumar D., Ranjan R., in *Proc. IEEE TENCON Conf. 2017* (Malaysia, 2017, pp 2405–2408).
- Xia C., Bai N., et al. *Opt. Express*, **19** (17), 16653 (2011).
- Matsuo S., Takenaga K., et al. *Opt. Lett.*, **36** (23), 4626 (2011).
- Hayashi T., Taru T., et al. *J. Lightwave Technol.*, **30** (4), 583 (2012).
- Goto Y., Nakajima K., et al. *J. Lightwave Technol.*, **33** (23), 4942 (2015).
- Sasaki Y., Takenaga K., et al. *Opt. Fib. Techn.*, **35**, 19 (2017).
- Hayashi T., Tamura Y., et al. *J. Lightwave Technol.*, **35** (3), 450 (2017).
- Sakaguchi J., Klaus W., et al. *J. Lightwave Technol.*, **34** (1), 93 (2016).
- Ye F., Tu J., et al. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **28** (1), 27 (2016).
- Gao J., Zhanga X., et al., in *Proc. Comm. Phot. Conf. and Exhib.* (Shanghai, China, 2011, 8307, pp 1–7).
- Aozasa S., Tsujikawa K., et al., in *Proc. Europ. Conf. Opt. Comm.* (Rome, Italy, 2018).
- Елкин Н.Н., Напартович А.П. и др. *Квантовая электроника*, **32** (3), 264 (2002) [*Quantum Electron.*, **32** (3), 264 (2002)].
- Высоцкий Д.В., Елкин Н.Н. и др. *Квантовая электроника*, **32** (3), 271 (2002) [*Quantum Electron.*, **32** (3), 271 (2002)].
- Егорова О.Н., Астапович М.С. и др. *Квантовая электроника*, **46** (3), 262 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (3), 262 (2016)].
- Егорова О.Н., Астапович М.С. и др. *Квантовая электроника*, **46** (12), 1134 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (12), 1134 (2016)].
- Дианов Е.М., Семенов С.Л. и др. *Квантовая электроника*, **46** (1), 1 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (1), 1 (2016)].
- Hayashi T., Nakanishi T., et al. *J. Lightwave Technol.*, **34** (1), 85 (2016).
- Вольф А.А., Достовалов А.В. и др. *Квантовая электроника*, **48** (12), 1128 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (12), 1128 (2018)].
- Чеховской И.С., Сорокина М.А. и др. *Квантовая электроника*, **47** (12), 1150 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (12), 1150 (2017)].
- Калинин Н.А., Андрианов А.В. и др. *Квантовая электроника*, **48** (4), 384 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (4), 384 (2018)].
- Kumar D., Ranjan R. *Opt. Eng.*, **58** (5), 056109 (2019).
- Okamoto K. *Fundamentals of Optical Waveguides* (San Diego, USA: Acad. Press, 2006, pp 183–187).