

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ
В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ**

**ВИКОРИСТАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТРИЧНОЇ АНИЗОТРОПІЇ
ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ НАПРАВЛЕНИХ ВІДГАЛУЖУВАЧІВ
У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ**

**USAGE OF METRIC ANISOTROPY PROPERTIES
FOR DIRECTIONAL COUPLER IN FIBER OPTIC REALIZATION**

Аннотация. Проанализированы возможности реализации направленных ответвителей на основе двойного лучепреломления в анизотропных волоконных световодах, уложенных в спиральную линию при комнатной температуре. Приведены результаты расчетов для конкретных случаев.

Анотація. Проаналізовано можливість реалізації направлених відгалужувачів на підґрунті подвійного променезаломлювання в анізотропних волоконних світловодах, укладених у спіральну лінію за кімнатної температури. Подано результати обчислень для конкретних випадків.

Summary. Ability of directional coupler realization on the ground of double refraction in anisotropic spiral stowed fiber light conductor at room temperature was analyzed. Valuation results for specific examples are given.

Применение анизотропных компонентов для построения элементов волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) представляет большой научный интерес. На сегодня остро стоит проблема равномерности разделения мощности сигнала и минимизации потерь в направленных ответвителях. Использование особенностей анизотропных сред позволит улучшить данные характеристики. Одним из способов создания анизотропного оптического волокна (ОВ) является фотоупругость, вызванная укладкой ОВ при комнатной температуре в спиральную линию постоянного шага и радиуса скрутки. Двойное лучепреломление в анизотропной среде, вследствие которого обыкновенный и необыкновенный лучи (волны) отклоняются под разными углами по отношению к оси ОВ, может быть положено в основу разделения мощности сигнала. Для реализации направленных ответвителей, принцип работы которых основан на пространственном разведении равных по мощности основных волн в анизотропной среде, обусловленной фотоупругостью, необходимо располагать полным спектром следующей информации: характером поведения обыкновенного (HE_{11}^o) и необыкновенного (HE_{11}^e) лучей в анизотропной среде, значением элементов тензора диэлектрической проницаемости, особенностями перекачки мощностей между основными HE_{11}^o и HE_{11}^e волнами, влиянием фотоупругости на поляризационную дисперсию. Перечисленные особенности спиральноизогнутых одномодовых волоконных световодов (СОМВС) на сегодня всесторонне не исследованы и для анализа возможности внедрения в ВОСП устройств, принцип работы которых основан на использовании анизотропии для равномерного разделения мощности, необходимо провести работы, направленные на определение конкретных закономерностей изменений вышеперечисленных параметров при разных степенях влияния анизотропии.

Данному вопросу посвящен ряд научных работ как отечественных, так и зарубежных ученых.

В работах [1, 2] исследованы переходные затухания при обмене мощностями между обыкновенной и необыкновенной волнами, определены области значений параметра $A = \frac{\rho}{4\pi R}$ (ρ – шаг спирали, R – радиус спирали), при которых достигается необходимая величина данных потерь. В работе [3] проанализированы возможности использования свойства угловой дисперсии в анизотропной среде для достижения разделения мощности сигнала при помощи двойного лучепреломления. В работах [3, 4] произведены расчеты параметров анизотропного самофокусирующего оптического волокна. В работах [5, 6] проведены исследования поляризационной дисперсии ОВ, подверженных влиянию механических напряжений, получены

выражения для ее расчета. В работах [7, 8, 9] проведены измерения поляризационной модовой дисперсии в диапазоне длин волн 1510 ... 1645 нм, обусловленной изгибом ОВ, и определена зависимость величины дисперсии от радиуса изгиба ОВ.

Однако в вышеперечисленных литературных источниках не определено условие, при котором мощности связи между основными волнами в фотоупругом ОВ равны между собой.

Отсутствует четко выраженный метод определения конструктивных параметров анизотропных ВС для использования в разработках устройств на их основе, в частности направленных ответвителей.

Целью данной работы является определение конкретных параметров, которые могут быть взяты за основу при проектировании направленных ответвителей для равномерного разделения мощности оптического сигнала.

1. Равное разделение мощности между основными волнами в спиральном одномодовом волоконном световоде. Согласно закону Малюса, интенсивности обыкновенного I_o и необыкновенного I_e лучей связаны с углами между оптической осью и векторами напряженности \vec{E} данных лучей β_o и β_e соотношениями [3]

$$I_o = I \sin^2 \beta_o; \quad I_e = I \cos^2 \beta_e, \quad (1)$$

где I – интенсивность излучения до изгиба ОВ.

Очевидно, что при равномерном распределении мощности ($I_o = I_e$) необходимо придать $\beta_o = \beta_e = 45^\circ$ при вводе оптического сигнала в анизотропное ОВ, т. е. угол между вектором напряженности необыкновенной волны \vec{E}_e и оптической осью $\vec{x}(\xi)$, нормально соединяющей ось цилиндра, на который осуществляется намотка с осью СОМВС, должен составлять 45° (рис. 1).

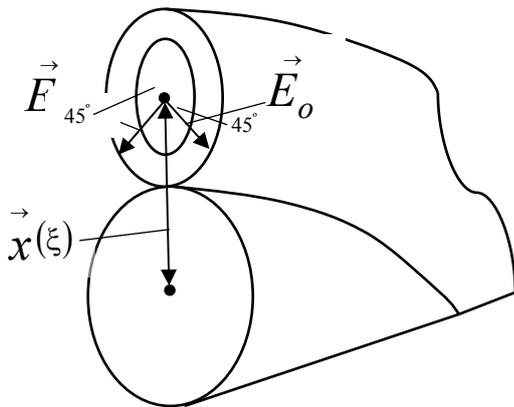


Рисунок 1 – Состояние поляризации основных волн при вводе сигнала в СОМВС для равномерного разделения мощности

Отношение мощностей связи между основными HE_{11}^e и HE_{11}^o волнами должно быть равным единице. При введении луча (волны) в анизотропную среду происходит двойное лучепреломление и в начальный момент времени при условии $\beta_o = \beta_e = 45^\circ$ мощность необыкновенной волны равна мощности обыкновенной. По мере прохождения по СОМВС между данными волнами происходит обмен мощностями и направление перекачки мощности изменяется на противоположное после прохождения длины СОМВС, равной полудлине биения ξ_1 . В зависимости от параметров спирали, величина мощности, перекачиваемой из необыкновенной волны в обыкновенную, может отличаться от мощности, которая, наоборот, перекачивается из обыкновенной волны в необыкновенную в большую или меньшую сторону. Задача сводится к тому, чтобы достичь равенства между

переходными затуханиями $\alpha_{n1}^{oe}(\xi_1)$ и $\alpha_{n1}^{eo}(\xi_1)$, т. е. оптическая мощность, “отдаваемая” одной из волн при прохождении полудлины биения ξ_1 , должна быть равна “принимаемой” оптической мощности при прохождении следующего участка ξ_1 . В таком случае при прохождении длины $2\xi_1$ мощность необыкновенной волны HE_{11}^e равна мощности обыкновенной волны HE_{11}^o .

Используем функцию влияния фотоупругости при перекачке мощности из необыкновенной волны в обыкновенную

$$f(A)^{eo} = \frac{A\sqrt{1+A^2}}{|A^2+A-1|} \cdot \{ \}^{eo} \quad (2)$$

и функцию влияния фотоупругости при перекачке мощности из обыкновенной волны в необыкновенную

$$f(A)^{oe} = \frac{A\sqrt{1+A^2}}{|A^2+A-1|} \cdot \{\}^{oe}, \quad (3)$$

где $\{\}^{eo}$ – выражение в фигурной скобке в формуле (29) работы [1]; $\{\}^{oe}$ – выражение в фигурной скобке в формуле (35) работы [2].

Данные функции являются произведениями функций зависимости от геометрии изгиба ОВ (дробные выражения) и от углов поляризации материала СОМВС (выражения в фигурных скобках).

Используя результаты исследований, проведенных в [1, 2], получим условие равномерного распределения мощности между основными HE_{11}^e и HE_{11}^o волнами:

$$\alpha_{n1}^{eo}(\xi_1) = \alpha_{n1}^{oe}(\xi_1). \quad (4)$$

Если применить выражения (2), (3), а также расчетные формулы для переходных затуханий, полученные в [1, 2], условие (4) сводится к виду

$$f(A)^{eo} = f(A)^{oe}. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены зависимости функций $f(A)^{eo}$ и $f(A)^{oe}$ от безразмерного параметра A .

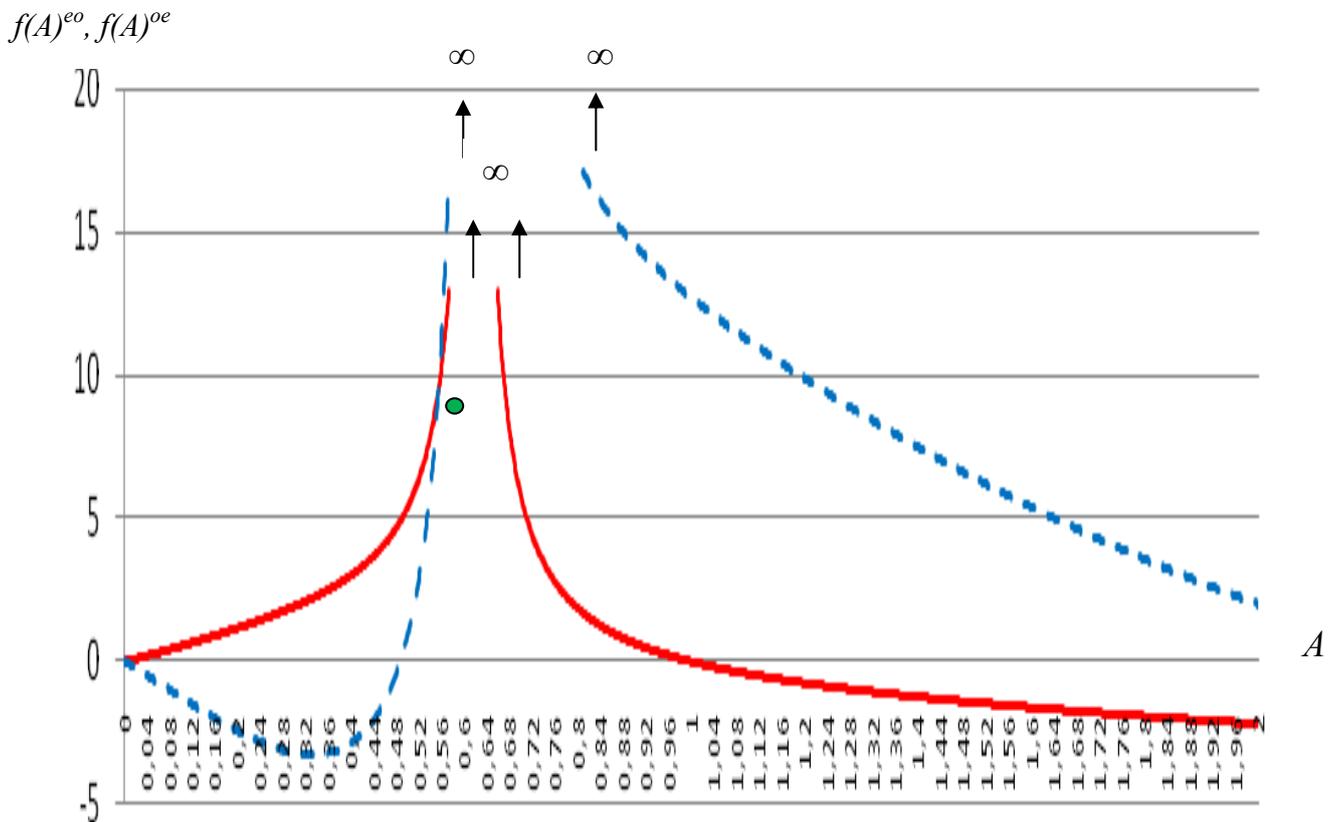


Рисунок 2 – Зависимости функций влияния фотоупругости $f(A)^{eo}$ (сплошная линия) и $f(A)^{oe}$ (штриховая линия) от параметра A

Графики функций $f(A)^{eo}$ и $f(A)^{oe}$ позволяют определить, при каких значениях параметра A будет иметь место переходное затухание: при положительном значении $f(A)^{eo}$ мощность волны HE_{11}^e будет перекачиваться в волну HE_{11}^o , при $f(A)^{eo} \leq 0$ практически не наблюдается перекачки мощности, аналогично и для $f(A)^{oe}$.

Как видно из графика рис. 2, условие (5) достигается для значений A (в диапазоне A от 0 до 2): $A = 0$ (согнутое по дуге окружности ОВ), $A = 0,553$, $A \gg 2$.

Полудлина участка биения рассчитывается [1] как

$$\xi_1 = \frac{\sqrt{2\lambda n_1 R} (1 + 4A^2) \sqrt{1 + A^2}}{w |A^2 + A - 1|} \quad (6)$$

Определив полудлину участка биения для определенного состава СОМВС при значении параметра A , которое соответствует равномерному распределению мощности сигнала, необходимо определить следующие параметры СОМВС: радиус спирали, шаг скрутки, количество витков, длину ОВ, длину спирали, в которую уложено ОВ, а также угол отклонения необыкновенного луча от обыкновенного (α).

Поскольку пространственное разведение лучей необходимо произвести после прохождения сигналом участка ОВ, кратного длине биений, длина ОВ и длина спирали составят

$$l = 2\xi_1 m, \quad s = kp, \quad (7)$$

где l – длина ОВ; m – целое число; s – длина спирали, в которую уложено ОВ; k – количество витков спирали.

Представив длину ОВ, потраченную на один виток, в виде гипотенузы прямоугольного треугольника, в котором один из катетов равен шагу скрутки, а другой – длине круга поперечного сечения цилиндра, на который осуществляется намотка ОВ, общая длина ОВ составит

$$l = k \sqrt{\rho^2 + (2\pi R)^2} \quad (8)$$

С использованием выражения (7), количество витков СОМВС составит

$$k = \frac{2\xi_1 \cdot m}{\sqrt{\rho^2 + (2\pi R)^2}} \quad (9)$$

На рис. 3 представлена конструкция СОМВС, необходимая для равномерного распределения мощности сигнала.

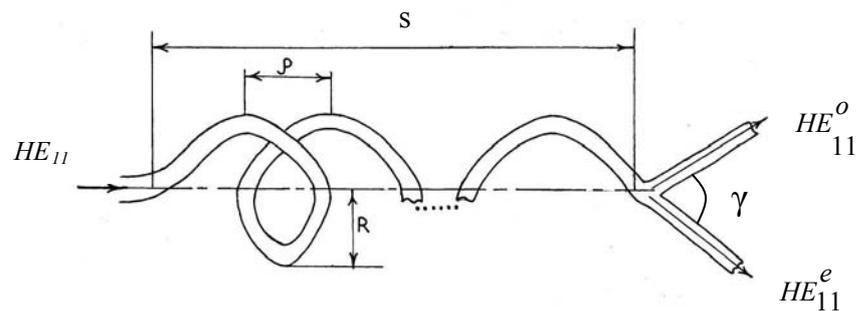


Рисунок 3 – Распределение мощности на основе фотопругости

В табл. 1 представлены результаты расчетов параметров, при которых будет равномерное разделение мощности для некоторых составов ОВ при радиусе сердцевины 4,5 мкм, $m = 1$, $A = 0,553$ и длине волны 1,565 мкм.

Таблица 1 – Параметры укладки оптических волокон в спиральную линию для равного разделения мощности сигнала

Состав ОВ	Количество витков	Длина биения $2\xi_1$, м	Параметр A	Шаг скрутки ρ , м	Радиус модового поля HE_{11} w , мкм
1	2	3	4	5	6
1. Сердцевина 100 % SiO_2 ; оболочка 1 % F, 99 % SiO_2	2,834152	0,132692	0,553	0,034728	4,333
2. Сердцевина 2,2 % GeO_2 , 3,3 % B_2O_3 , 94,5 % SiO_2 оболочка 1 % F, 99 % SiO_2	3,375232	0,158025	0,553	0,034728	3,644

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
3. Сердцевина 9,1 % P ₂ O ₅ , 90,9 % SiO ₂ ; оболочка 3,5 % B ₂ O ₃ , 96,5 % SiO ₂	4,810408	0,225218	0,553	0,034728	2,579
4. Сердцевина 16,9 % Na ₂ O, 32,5 % B ₂ O ₃ , 50,6 % SiO ₂ ; оболочка 1 % F, 99 % SiO ₂	7,591813	0,355441	0,553	0,034728	1,689
5. Сердцевина 9,1 % GeO ₂ , 7,7 % B ₂ O ₃ , 83,2 % Si O ₂ ; оболочка 2,2 % GeO ₂ , 3,3 % B ₂ O ₃ , 94,5 % SiO ₂	3,782487	0,177092	0,553	0,034728	3,272
6. Сердцевина 4,03 % GeO ₂ , 9,7 % B ₂ O ₃ , 86,27 % Si O ₂ ; оболочка 1 % F, 99 % SiO ₂	3,652326	0,170998	0,553	0,034728	3,371
7. Сердцевина 0,1 % GeO ₂ , 5,4 % B ₂ O ₃ , 94,5 % Si O ₂ ; оболочка 1 % F, 99 % SiO ₂	2,981806	0,139605	0,553	0,034728	4,12

2. Разделение мощности оптического сигнала в волоконном световоде с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла. Частным случаем СОМВС является волоконный световод с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла (УВМС) (при этом $A \rightarrow \infty$, отсутствует обмен мощностями между HE_{11}^e и HE_{11}^o волнами) [6]. Существенным преимуществом данного вида анизотропного ОВ является возможность придать шагу скрутки ρ величины одного порядка с радиусом модового поля, что, как показали исследования, проведенные в [6], в значительной степени влияет на формы поперечного сечения пучков обыкновенного и необыкновенного лучей. Выражения для расчетов формы и размера пучков обыкновенного S_o^o и необыкновенного S_o^e лучей для цилиндрической системы координат получены в [6]:

$$S_o^o = S_0 \left(1 + \frac{\nu r_1}{2} \sin \varphi \right) = S_0 \left(1 + \frac{\pi r_1}{\rho} \sin \varphi \right);$$

$$S_o^e = S_0 \left(1 + \frac{\nu r_1}{2} \cos \varphi \right) = S_0 \left(1 + \frac{\pi r_1}{\rho} \cos \varphi \right), \quad (10)$$

где S_o – поперечное сечение круглого пучка лучей радиуса r_1 в изотропном ОВ.

Проведенные расчеты свидетельствуют о расширении пучков лучей в УВМС в сторону увеличения диэлектрической проницаемости. Из форм S_o^o , S_o^e , представленных на рис. 4 для шага скрутки $\rho = \pi r_1$, видно смещение необыкновенного луча в сторону координаты $\varphi = 90^\circ$ и обыкновенного луча в сторону координаты $\varphi = 0^\circ$. Полученное расхождение лучей может быть использовано для пространственного разведения HE_{11}^e и HE_{11}^o волн на выходе анизотропного ОВ с УВМС.

С точки зрения простоты реализации равномерного разделения мощности на основе анизотропного СОМВС, оптимальным является случай $A = 0$ (согнутый по дуге окружности ВС) и $A \gg 2$, поскольку обыкновенный и необыкновенный лучи при этом распространяются автономно без обмена мощностями [1, 2], а следовательно отсутствуют строгие требования при определении длины участка СОМВС, после которого необходимо развести оба луча. При соблюдении условия $\beta_o = \beta_e = 45^\circ$, согласно (1), мощность волны HE_{11}^e равна мощности волны HE_{11}^o .

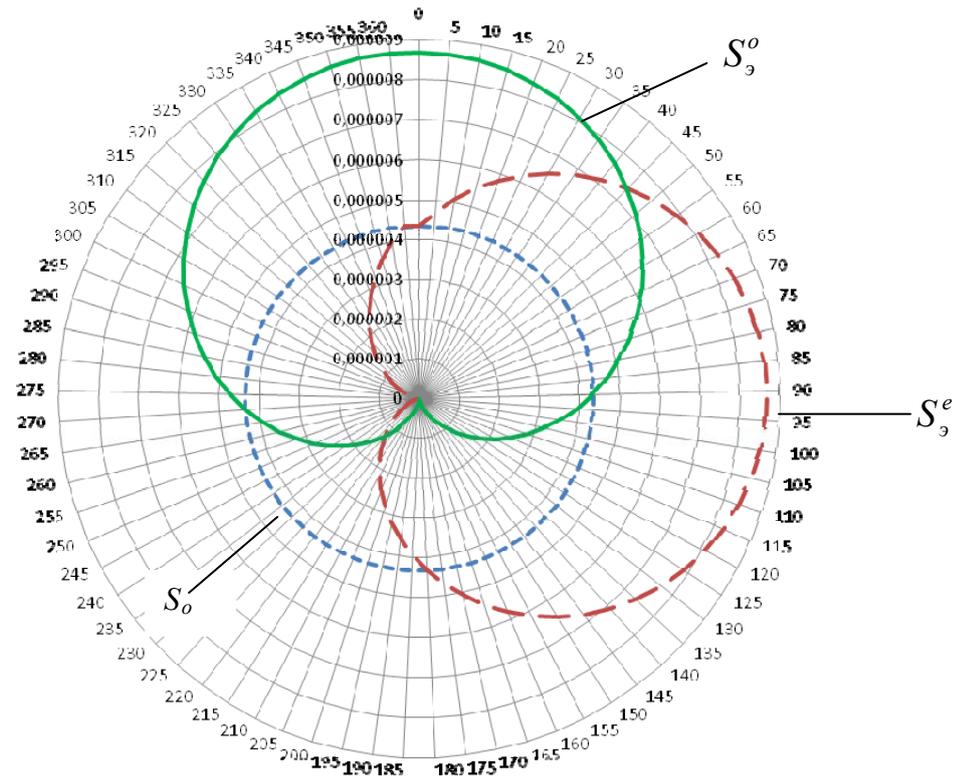


Рисунок 4 – Формы поперечных сечений пучков лучей: моды HE_{11} в изотропном ОВ (S_0), HE_{11}^o (S_9^o) и HE_{11}^e (S_9^e) – в анизотропном УВМС

3. Ответвитель оптического сигнала на основе электромагнитной связи между оптическими волокнами. Для осуществления равного разделения мощности оптического сигнала предлагается использовать электромагнитную связь между двумя параллельно расположенными на участке z оптическими волокнами (ОВ), одно из которых анизотропно за счет упорядоченной вращающейся микроструктуры стекла (УВМС), второе – изотропно (ИВС): на рис. 5, a и b соответственно.

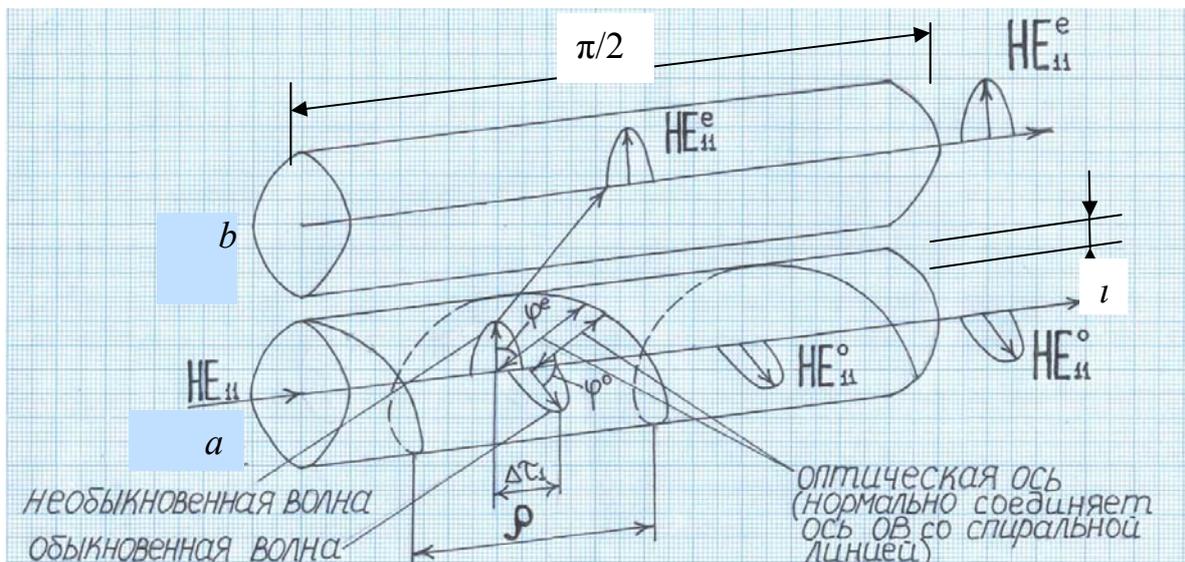


Рисунок 5 – Разделение оптического сигнала на основе электромагнитной связи между УВМС и ИВС.

Цель исследований: определить условия, при которых мощность оптического сигнала, вводимая в волокно a , поровну разделялась за счет электромагнитной связи вдоль участка z , в результате чего на выходах ОВ a и b снимались равные по мощности оптические сигналы с взаимортогональными углами поляризаций.

Согласно [3], при поступлении в ОВ a волны мощностью $P(a) = |A_a(0)|^2 = 1$, где A_a – амплитуда волны в ОВ a , изменение мощности вдоль ОВ a будет осуществляться по закону

$$P_a(z) = \cos^2\left(z\sqrt{C_{ab}^2 + \Delta\beta^2}\right) + \frac{\Delta\beta^2}{C_{ab}^2 + \Delta\beta^2} \sin^2\left(z\sqrt{C_{ab}^2 + \Delta\beta^2}\right), \quad (11)$$

где C_{ab} – коэффициент электромагнитной связи ОВ a и b ; z – длина участка параллельно расположенных ОВ, на котором имеет место электромагнитная связь, $\Delta\beta = \frac{\beta_a - \beta_b}{2}$ (β_a и β_b – фазовые коэффициенты распространения вдоль ОВ a и b соответственно). При этом мощность, передаваемая в ОВ b , будет изменяться по закону [3]

$$P_b(z) = \frac{C_{ab}^2}{C_{ab}^2 + \Delta\beta^2} \sin^2\left(z\sqrt{C_{ab}^2 + \Delta\beta^2}\right). \quad (12)$$

В случае равенства фазовых коэффициентов $\beta_a = \beta_b$, изменения мощностей сигналов в ОВ a и b будут осуществляться по закону [3]

$$P_a(z) = \cos^2(zC_{ab}), \quad P_b(z) = \sin^2(zC_{ab}). \quad (13)$$

При одинаковых фазовых коэффициентах передачи вся мощность оптического сигнала будет периодически переходить из световода a в световод b .

Различие профилей суммарных диэлектрических проницаемостей в УВМС $\varepsilon^e(r, \varphi)$ и $\varepsilon^o(r, \varphi)$ для необыкновенной (HE_{11}^e) и обыкновенной (HE_{11}^o) волн соответственно, и, как следствие, разность фазовых коэффициентов $\Delta\beta^{e-o}$ дают основание предполагать о возможности «вывода» волны HE_{11}^e из ОВ с УВМС a в ИВС b при следующих условиях: 1) равенности фазового коэффициента распространения необыкновенной волны HE_{11}^e β_1^e фазовому коэффициенту распространения волокна b β_b ; 2) существенного различия между фазовым коэффициентом распространения обыкновенной волны HE_{11}^o β_1^o и фазовым коэффициентом распространения волокна b β_b .

Согласно [6], разность фазовых коэффициентов между необыкновенной и обыкновенной волнами в ОВ с УВМС $\Delta\beta^{e-o}$ рассчитывается по формуле

$$\Delta\beta^{e-o} = \beta_1^e - \beta_1^o = \frac{\beta_{10}}{2\varepsilon(r)} v r (\sin \varphi + \cos \varphi), \quad (14)$$

где β_{10} – фазовый коэффициент распространения в волокне a без упорядоченной вращающейся микроструктуры стекла (изотропного); $\varepsilon(r)$ – диэлектрическая проницаемость материала волокна a без упорядоченной вращающейся микроструктуры; $v = \frac{2\pi}{\rho}$ – кручение волокна a (ρ – шаг скрутки УВМС); r и φ – координаты цилиндрической системы.

Как видно из выражения (14), существенного различия между фазовыми коэффициентами распространения необыкновенной и обыкновенной волн можно достичь путем уменьшения шага вращения микроструктуры УВМС a (ρ), который можно изменять в больших пределах: $0 \leq \rho \leq \infty$.

Условие равенства фазового коэффициента распространения необыкновенной волны HE_{11}^e β_1^e фазовому коэффициенту распространения волокна b β_b сводится к условию равенства между диэлектрической проницаемостью сердцевины волокна b и профилем суммарной диэлектрической проницаемостью необыкновенной волны $\varepsilon^e(r, \varphi)$ в волокне a .

Профили суммарных диэлектрических проницаемостей для необыкновенной и обыкновенной волн в УВМС рассчитываются [6] как

$$\varepsilon_{\{v\}}^{\{e\}}(r, \varphi) = \varepsilon_{zz} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{Bmatrix} = \varepsilon(r) + v^2 r^2 \pm vr \begin{Bmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{Bmatrix}. \quad (15)$$

Рассмотрим случай, когда ОВ a и b – ступенчатые с одинаковыми радиусами сердцевинки и оболочки без защитного покрытия расположены на участке $\pi/2$ рядом друг с другом ($l = 0$). При этом для расчета профилей суммарных диэлектрических проницаемостей необходимо выбирать координату r равной длине нормали, соединяющей оси ОВ a и b , т.е. $r = 2a + 2b$, где a – радиус сердцевинки ОВ, b – радиус оболочки ОВ.

Проведя необходимые математические операции с использованием выражений (11) ... (15), получим выражение для определения ρ :

$$\rho = -\frac{8\pi(a+b)}{1 - \sqrt{1 + 4(\varepsilon(r)_b - \varepsilon(r)_a)}}, \quad (16)$$

где $\varepsilon(r)_a$ – диэлектрическая проницаемость материала сердцевинки волокна a без учета УВМС (изотропного), $\varepsilon(r)_b$ – диэлектрическая проницаемость материала сердцевинки волокна b (ИВС). При этом разность между фазовым коэффициентом распространения обыкновенной волны β_1^o и фазовым коэффициентом ИВС b составит:

$$\beta_b - \beta_1^o = \Delta\beta^{e-o} = \beta_1^e - \beta_1^o = \frac{4\pi^2(a+b)}{n_1\lambda_0\rho}, \quad (17)$$

где n_1 – показатель преломления сердцевинки волокна a без учета УВМС (изотропного); λ_0 – длина волны света в вакууме.

В заключение отметим следующее. Результаты исследований свидетельствуют о возможности реализации направленных ответвителей на основе свойств анизотропии, обусловленной фотоупругостью ОВ. Определен метод расчета параметров СОМВС для использования их в ВОСП. Определены условия равного разделения мощности оптического сигнала путем использования электромагнитной связи между двумя ОВ, одно из которых изотропное, второе – с УВМС. Полученные данные могут быть использованы в качестве справочного материала для конструирования разветвителей на основе угловой дисперсии, частотноизбирательных фильтров, принцип работы которых основан на использовании свойств фотоупругих ОВ.

Литература

1. Макаров Т. В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах. Ч.1 / Т. В. Макаров // Праці УНДІРТ. – 2004. – Вип. 2 (38). – С. 23-28.
2. Макаров Т. В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах. Ч. 2 / Т. В. Макаров // Праці УНДІРТ. – 2004. – Вип. 2 (38). – С. 29-34.
3. Корнейчук В.И. Оптические системы передачи / Корнейчук В. И., Макаров Т. В., Панфилов И. П. – К.: Техніка, 1994. – 388 с.
4. Заяц А. П. Использование анизотропии в компонентах волоконно-оптических линий передачи / А. П. Заяц // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2002. – Вип. 2 – С. 40-43.
5. Макаров Т. В. Передаточные характеристики изогнутых волоконных световодов / Т. В. Макаров // Праці УНДІРТ. – 1998. – № 1 (13). – С. 13-23.
6. Макаров Т. В. Волоконный световод с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла / Т. В. Макаров // Праці УНДІРТ. – 1999. – № 2(18).
7. Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования // Труды Всероссийской научной конференции, (Санкт-Петербург, 22 – 24 апреля 2008 г.). Т. 6 под общ. ред. В.С. Шварцфельда. – СПб: Санкт-Петербургский гос. ун-т информ. технологий, механики и оптики, 2008. – С. 51 – 55.
8. Инновационные технологии – транспорту и промышленности // Труды 45-й Междунар. науч.-практ. конференции ученых трансп. узлов, инж. работников и представителей академической науки, (Санкт-Петербург, 7 – 9 ноября 2007 г.). Т. 2; под ред. Ю. А. Давыдова. – СПб: Санкт-Петербургский гос. ун-т информ. технологий, механики и оптики, 2007. – С. 146 – 148.
9. Влияние изгиба оптического волокна на значение поляризационной модовой дисперсии: Международный оптический конгресс «Оптика XXI век» (Санкт-Петербург, 20 – 24 октября, 2008 г.) / М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. ун-т информ. технологий, механики и оптики. – СПб: Санкт-Петербургский гос. ун-т информ. технологий, механики и оптики, 2008. – 349 с.
10. Одинцов Н. Н. Исследование поляризационной дисперсии волоконных световодов, изогнутых по спирали / Н. Н. Одинцов, О. М. Стащук // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – Одеса, 2009.

11. *Одинцов Н. Н.* Исследование анизотропии волоконных световодов изогнутых по спиральной линии / Н. Н. Одинцов, О. М. Стацук // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – Одеса, 2008. – Вип. 1. – С. 63 – 66.