

**THE DIRECTIONAL OPTICAL COUPLER BASED
ON ANISOTROPIC OPTICAL FIBER**

Balieiev M.S.

*O. S. Popov Odesa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
baleev31@gmail.com*

**НАПРАВЛЕНИЙ ОПТИЧНИЙ ВІДГАЛУЖУВАЧ
НА БАЗІ АНІЗОТРОПНОГО ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА**

Балеев М.С.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, м. Одесса, ул. Кузнецкая, 1.
baleev31@gmail.com*

**НАПРАВЛЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ
НА БАЗЕ АНИЗОТРОПНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

Балеев Н.С.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнецкая, 1.
baleev31@gmail.com*

Abstract. The paper presents the results of the development of the design of a directional coupler of a fiber-optic transmission system of a new type, which provides spatial separation of optical signals with different working wavelengths or power separation of an optical signal of the same wavelength. The operation of this device is based on the features of the electromagnetic coupling between anisotropic optical fiber and isotropic stepped single-mode optical fiber. As an anisotropic optical fiber, a fiber with an ordered rotational microstructure of glass was selected. In the article equations were used that relate the chemical compositions of the cores and shells of the optical fiber, the parameters of the ordered rotational glass microstructure, the powers of the optical signals that pass from the anisotropic fiber to the isotropic optical fiber, and the working wavelengths of optical signals. The lengths of fiber sections are also determined, where it is necessary to arrange them in parallel, depending on the part of the power that needs to be transferred from anisotropic to isotropic optical fiber. Since there is an equality of phase wave propagation coefficients (achieved by selecting the required step of rotation of the microstructure of glass), the condition for the transition of an electromagnetic wave from an anisotropic fiber to an isotropic optical fiber one is satisfied. The resulting spectral analysis proves the possibility of realizing devices that can be used on a passive optical network to separate optical signals with different working wavelengths or to divide the power of an optical signal of the same wavelength.

Key words: optical fiber, anisotropic medium, double intercoupling, electromagnetic coupling.

Анотація. У статті надані результати розробки конструкції направлено відгалужувача волоконно-оптичної системи передачі нового типу, який забезпечує просторове розділення оптичних сигналів з різними довжинами робочих хвиль або розділення потужності сигналу однієї довжини хвилі. В основі роботи даного пристрою закладені особливості електромагнітного зв'язку між анізотропним оптичним волокном та ізотропним ступінчастим одномодовим оптичним волокном. В якості анізотропного оптичного волокна вибрано волокно з впорядкованою обертальною мікроструктурою скла. В статті використані рівняння, які пов'язують хімічні склади серцевин і оболонок оптичного волокна, параметри впорядкованої обертальної мікроструктури скла, величини потужностей оптичних сигналів, які переходять із анізотропного волокна в ізотропне оптичне волокно, довжини робочих хвиль оптичних сигналів. Також визначені довжини ділянок волокон, на яких необхідно їх розташувати паралельно в залежності від частини потужності, яку необхідно передати з анізотропного волокна в ізотропне оптичне волокно. Оскільки місце рівності фазових коефіцієнтів поширення хвиль (досягається шляхом підбору необхідного кроку обертання мікроструктури скла), виконується умова

переходу електромагнітної хвилі із анізотропного волокна в ізотропне оптичне волокно. Наданий в результаті досліджень спектральний аналіз доводить можливість реалізації пристрою, який може бути використаний на пасивній оптичній мережі, для розділення оптичних сигналів з різними довжинами робочих хвиль або розділення потужності оптичного сигналу однієї довжини хвилі.

Ключові слова: оптичне волокно, анізотропне середовище, подвійне променезаломлювання, електромагнітний зв'язок.

Аннотация. В статье представлены результаты разработки конструкции направленного ответвителя волоконно-оптической системы передачи нового типа, который обеспечивает пространственное разделение оптических сигналов с разными длинами рабочих волн либо разделение мощности оптического сигнала одной длины волны. В основе работы данного устройства заложены особенности электромагнитной связи между анизотропным оптическим волокном и изотропным ступенчатым одномодовым оптическим волокном. В качестве анизотропного оптического волокна выбрано волокно с упорядоченной вращательно микроструктурой стекла. В статье использованы уравнения, которые связывают химические составы сердцевин и оболочек оптического волокна, параметры упорядоченной вращательно микроструктуры стекла, величины мощностей оптических сигналов, которые переходят из анизотропного волокна в изотропное оптическое волокно, длины рабочих волн оптических сигналов. Так же определены длины участков волокон, на которых необходимо их расположить параллельно в зависимости от части мощности, которую необходимо передать из анизотропного волокна в изотропное оптическое волокно. Поскольку имеет место равенство фазовых коэффициентов распространения волн (достигается путем подбора требуемого шага вращения микроструктуры стекла), выполняется условие перехода электромагнитной волны из анизотропного волокна в изотропное оптическое волокно. Приведенный в результате исследований спектральный анализ доказывает возможность реализации устройства, которое может быть использовано на пассивной оптической сети для разделения оптических сигналов с разными длинами рабочих волн либо разделения мощности оптического сигнала одной длины волны.

Ключевые слова: оптическое волокно, анизотропная среда, двойное лучепреломление, электромагнитная связь.

Today, there is a significant increase in requirements for fiber-optic transmission systems (FOTS): the amount of information transmitted by fiber - optic transmission lines (FOL), transmission speed is growing. Under conditions of a gradual increase in the length of the FOL, there arises a need to optimize FOTS: it is necessary to make scientific decisions both on improving optical devices and minimizing the influence of negative phenomena in FOL that are the main limiting factors at high transmission speeds. Such factors are dispersion, attenuation, nonlinear effects.

The introduction of anisotropic components in optical FOTS devices is a promising method for improving the quality of operation of these elements. Such devices are OF, directional couplers, polaroid's, light modulators, prisms, etc.

Objectives of the study:

1. Analysis of the features of the electromagnetic coupling between an anisotropic optical fiber with an ordered rotational microstructure of glass (ORMG) and an isotropic optical fiber (IOF).

2. Determination of specific parameters under which the implementation of a new type of FOTS directional coupler is achieved.

The optical fiber (OF) accepted for the study of OF a and b are single-mode with the same values of the shell radii, the agent is anisotropic and homogeneous in the chemical composition of glass, and agent b is isotropic and stepped. At the input of the anisotropic OF with the ORMG receives a continuous signal of wavelength λ . The propagation of an electromagnetic wave in an OF with ORMG occurs along a spiral trajectory of a certain pitch and radius, which follows the law of the spiral line along which the axes of the molecules and glass microcrystals are oriented [1, 2, 3, 4]. To achieve a transmission of 100% of the optical signal power from the OF to the OF b, it is necessary to fulfill the condition [4]:

$$\begin{cases} C_{ab} = \frac{\pi}{2 \cdot Z_{zb}}; \\ \beta_a^e = \beta_b, \end{cases} \quad (1)$$

where C_{ab} – is the coefficient of electromagnetic coupling between OF a and b ; Z_{zb} – the length of the area in which there is an electromagnetic connection between OF a and b ; β_a^e – phase propagation coefficient of the unusual ORMG wave; β_b – phase distribution coefficient in the IOF b .

The final condition for the transfer of all the power of an unusual wave from an anisotropic OF to an isotropic OF b on the section Z_{zb} takes the form [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{\frac{\left(4R^2 + \frac{p^2}{4}\right) \left(2R \cdot d_{di} - d_{di}^2\right)}{R^2}} \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{p}{4R}\right)\right)} = \frac{2k_y^2 \cdot q_y \cdot e^{-q_y \cdot l}}{k_z \cdot m \cdot (q_y^2 + k_y^2)} \\ \varepsilon_a^e(r, \varphi) = \varepsilon_b(r), \end{array} \right. , \quad (2)$$

where R is the rotational speed of the ORMG, μm ; p is the radius of rotation of the ORMG, μm ; k_y – wave number along the y axis, $\text{rad}/\mu\text{m}$; k_z – wave number along the z axis, $\text{rad}/\mu\text{m}$; q_y – exponential decay of the field outside the core along the y axis; m is the channel width, μm ; l is the distance between the channels, μm ; $\varepsilon_a^e(r, \varphi)$ and $\varepsilon_b(r)$ is the total profile of the dielectric constant in the OF with the ORMG and the dielectric constant in the IOF, respectively, d_{di} is the depth of drawing the sheath of the OF, μm .

The left part of the first equation (2) determines the value of the coefficient C_{ab} at which the transfer of all the power of an unusual wave from the OF a to the OF b in the section Z_{zb} occurs, the right part - the real value of the C_{ab} at the selected parameters of the OF, the ORMG twist pitch and the depth of the compression d_{di} .

An expression for calculating the power transmission coefficient was obtained:

$$K_{ab} = \frac{4k_y^2 \cdot q_y \cdot e^{-q_y \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{\left(4R^2 + \frac{p^2}{4}\right) \left(2R \cdot d_{di} - d_{di}^2\right)}{R^2}} \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{p}{4R}\right)\right)}{k_z \cdot m \cdot (q_y^2 + k_y^2) \cdot \pi}. \quad (3)$$

The physical essence of this quantity lies in the fraction of power that flows due to the electromagnetic coupling with the OF a in the OF b over the length Z_{zb} with the phase propagation factor of the isotropic OF equal to the phase propagation coefficient of the unusual wave of the anisotropic OF.

The possibility of implementing frequency separation of optical signals based on three optical fibers is analyzed: the optical signal of the working wavelength λ is fed to the input of an anisotropic optical fiber from a ORMG. The length of this OF is $\frac{\pi}{2 \cdot C_{ab}} + \frac{\pi}{2 \cdot C_{ac}}$ (C_{ab} is the electromagnetic coupling coefficient between the OF a and b ; C_{ac} is the electromagnetic coupling coefficient between the OF a and c , $1/\mu\text{m}$).

Parallel to the OF a and along the distance $\frac{\pi}{2 \cdot C_{ab}} + \frac{\pi}{2 \cdot C_{ac}}$ there are two isotropic OFs b and c

(Fig. 1). The direction of further transmission of the optical signal depends on its wavelength: at $\lambda = \lambda_1$, the signal propagates only through the OF a , when $\lambda = \lambda_2$, the informative unusual wave is transferred due to electromagnetic coupling with the OF a into the OF b and the optical signal is recorded at the output of an isotropic OF (IOF) b , at $\lambda = \lambda_3$, the informative unusual wave is transferred due to the electromagnetic coupling with the OF a to the OF c and the optical signal is recorded at the output of the IOF c .

The chemical composition of glass for the manufacture of OF a was selected for the study: OF with ORMG – 100% SiO_2 , isotropic OF b – 13,5% GeO_2 core, 86,5% SiO_2 , shell – 13,3% B_2O_3 ,

86,7% SiO₂, isotropic OF *c* with core – 5,8% GeO₂, 94,2% SiO₂, shell – 1% F, 99% SiO₂.

The results of the study of power transfer coefficients and phase distribution factors are presented in Table 1 and 2 respectively.

According to the results of calculations, the graphs of the rotational step of the ORMG and the rotational step of the ORMG are plotted against the depth of cutting, shown in Fig. 2. Based on the results of the calculations, the dependence of the power transmission coefficients in the area on the depth of OF cutting is built. These dependences are shown in Fig. 3. From the presented graphs it can be seen that with an increase in the depth of cutting of the OF, the ORMG rotation step necessary for transmitting the unusual wave from the anisotropic to the isotropic OF is increasing.

At the same time, as shown by the dependences in Fig. 3, the power transmission coefficient increases, as a result of which the magnitude of the power of the optical signal transmitted from the OF *a* to OF *b* and *c* increases. The graphs of the dependence of the phase propagation coefficients OF *a* and *b* and *c* on the wavelength, illustrating the fulfillment of conditions (1) and (2), are constructed. These graphs are shown in Fig. 4.

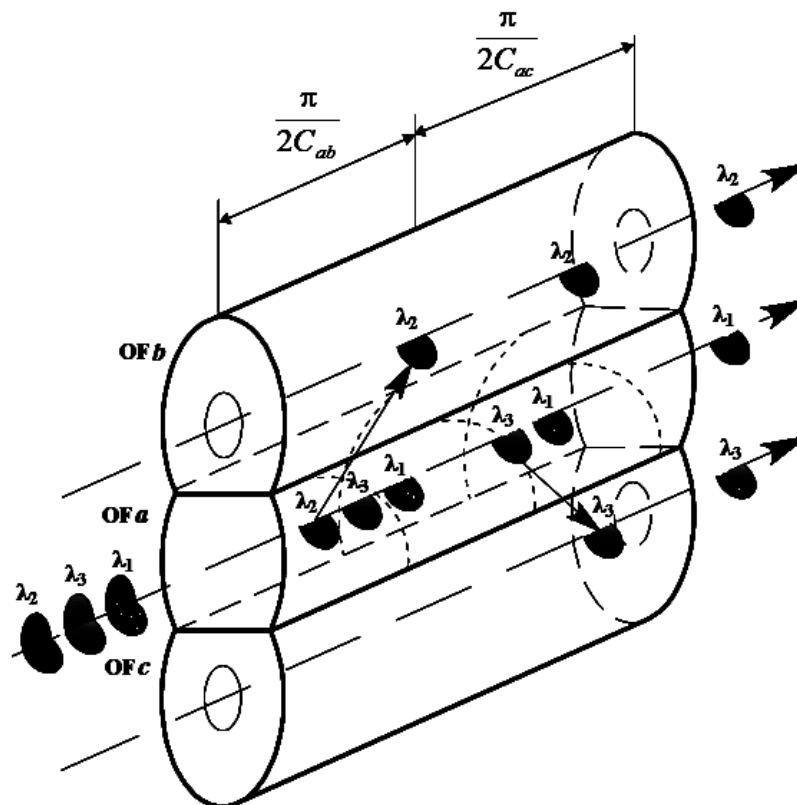


Figure 1 – The system of connected electromagnetic field OF

Based on the calculation method presented above, the computation of geometric parameters and electromagnetic coupling parameters of a new type of FOTS directional coupler. Drawings of this device are shown in Fig. 5. The function of the device is the spatial separation of signals 1300 nm, 1550 nm and 1625 nm. The signal of a working wavelength of 1300 nm is taken off of the wobble of an OF, and from the output of an OF, *b* – 1550 nm, and from an output of an OF with a wavelength of 1525 μ m. The parameters of the coupler are given in Table 3.

Table 1 – Electromagnetic coupling parameters calculations results between anisotropic OB (a) and two isotropic OB (b and c)

Depth of injection of OF, μm		Length of area Z_{zb} $a - b, \mu\text{m}$	Length of area Z_{zb} $a - c, \mu\text{m}$	The turn of the ORMG, MKM		Coefficient K_{ab} on the area $\frac{\pi}{2C_{ab}}$	Coefficient K_{ac} on the area $\frac{\pi}{2C_{ac}}$
on the area $\frac{\pi}{2C_{ab}}$	on the area $\frac{\pi}{2C_{ac}}$			on the area $\frac{\pi}{2C_{ab}}$	on the area $\frac{\pi}{2C_{ac}}$		
60	60	260,32	625,82	521,06	1252,65	60	60
60,25	60,25	233,7	561,83	467,71	1124,38	60,25	60,25
60,5	60,5	207,9	499,8	416,02	1000,12	60,5	60,5
60,75	60,75	182,09	437,75	364,33	875,85	60,75	60,75
61	61	156,27	375,69	312,64	751,59	61	61
61,25	61,25	129,61	311,6	259,28	623,32	61,25	61,25
61,5	61,5	103,78	247,5	207,59	499,05	61,5	61,5
61,75	61,75	77,95	187,38	155,9	374,79	61,75	61,75
62	62	52,1	125,26	104,21	250,53	62	62
62,25	62,25	25,43	61,13	50,85	122,26	62,25	62,25

Table 2 – Phase distribution coefficients calculations results a, b and c

Optical fiber	The value of dielectric permeability $\varepsilon(\lambda)$ at			The value of the spread ratio $\beta(\lambda)$, rad/ μm at		
	$\lambda_1 = 1,3 \mu\text{m}$	$\lambda_2 = 1,55 \mu\text{m}$	$\lambda_3 = 1,625 \mu\text{m}$	$\lambda_1 = 1,3 \mu\text{m}$	$\lambda_2 = 1,55 \mu\text{m}$	$\lambda_3 = 1,625 \mu\text{m}$
<i>a</i>	2,119265	2,149096	2,108268	7,032486	5,9389	5,6113
<i>b</i>	2,156180	2,149096	2,146948	6,147674	5,9389	5,6626
<i>c</i>	2,119354	2,110913	2,108268	7,0327	5,8865	5,6113

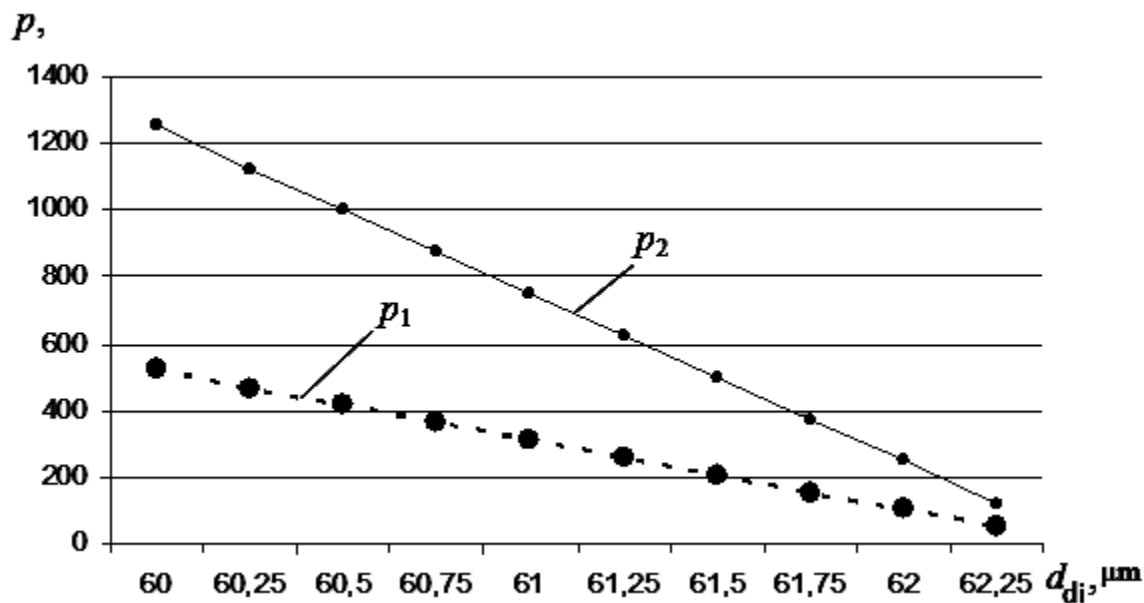


Figure 2 – Dependency of FOTS rotation step from OF's cutting depth

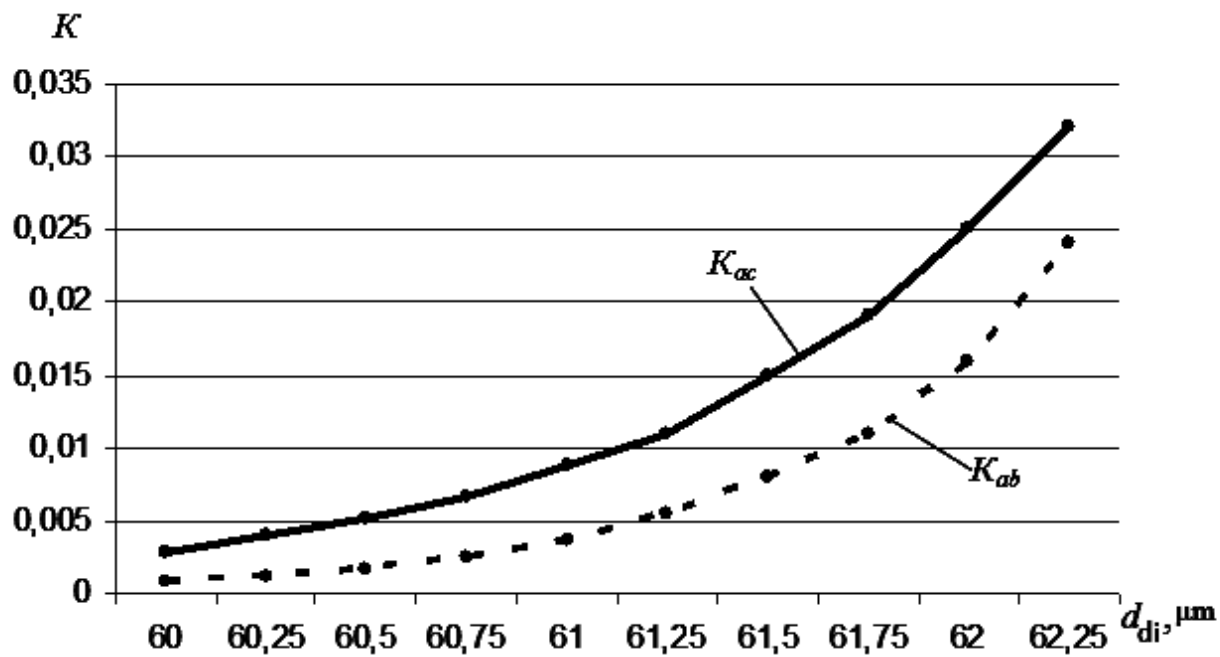


Figure 3 – Dependence of the coefficients of K_{ab} and K_{ac} from the depth of propagation OF

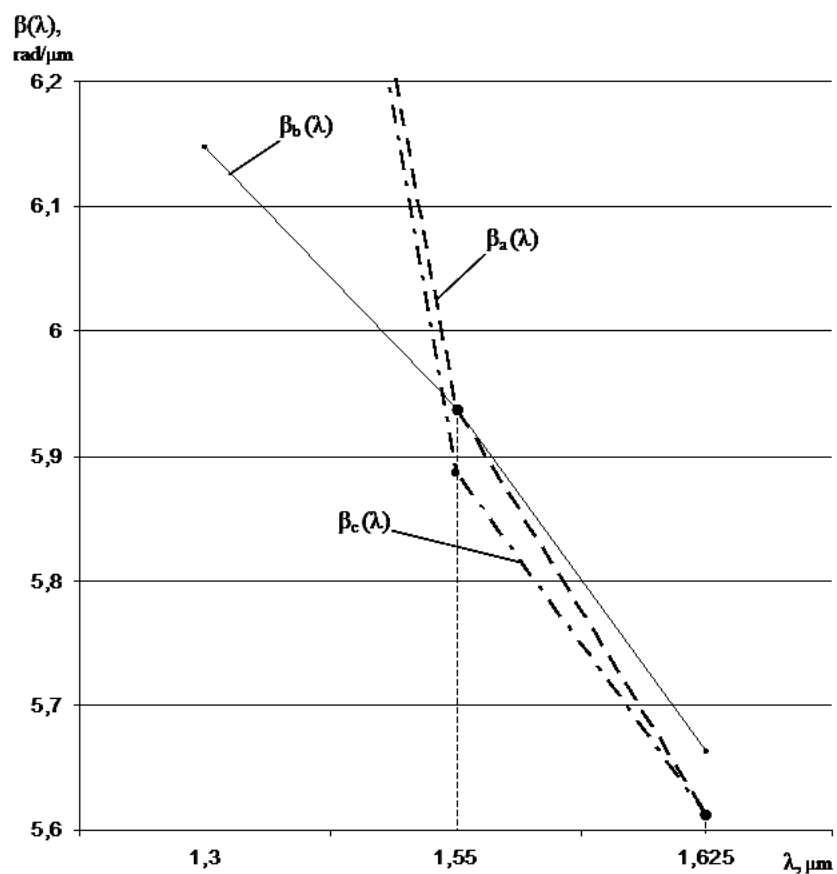


Figure 4 – Dependences of the phase distribution coefficients OF *a*, *b* and *c* on the wavelength of the optical signal

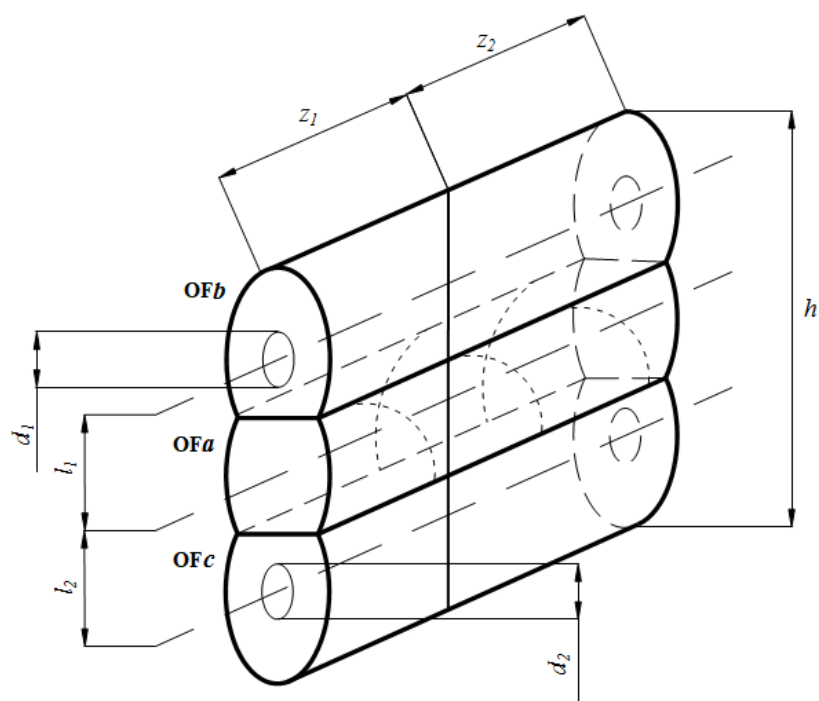


Figure 5 – The design of a directional coupler FOTS with spatial breeding of signals of wavelengths 1300 nm, 1550 nm, 1625 nm

Table 3 – Constructive dimensions of a directed coupler on the basis of electromagnetic coupling between anisotropic and isotropic OF

Diameter of core OF		Size			Size z_1 , mm at transmission			Size z_2 , mm at transmission		
a (size d_1), μm	b (size d_2), μm	l_1 , μm	l_2 , μm	h , μm	25%	50%	100%	25%	50%	100%
9	9	5	5	135	81,35	162,70	325,40	53,95	107,90	215,80
9	9	4,5	4,5	134	53,11	106,23	212,45	36,01	72,03	144,06
9	9	4	4	133	30,57	61,15	122,29	24,50	49,00	98,00
9	9	3,5	3,5	132	18,21	36,42	72,84	16,33	32,67	65,34
9	9	3	3	131	10,56	21,12	42,24	10,67	21,35	42,69
9	9	2,5	2,5	130	6,00	12,00	24,00	7,08	14,16	28,33
9	9	2	2	129	3,24	6,49	12,97	4,13	8,25	16,50
9	9	1,5	1,5	128	1,77	3,54	7,09	2,47	4,93	9,86
9	9	1	1	127	0,81	1,63	3,26	1,25	2,51	5,01
9	9	0,5	0,5	126	0,26	0,53	1,06	0,48	0,96	1,91

As a result of this work, a design of a directional coupler of a new type has been developed, which provides for the separation of optical signals with different working wavelengths. This effect is achieved by performing an equality between the phase distribution coefficient of an isotropic OF and anisotropic OF with ORMG. Setting the required value of the phase transfer coefficient is performed by selecting the required step of rotation of the glass microstructure (molecules, microcrystal's).

The results of this work are as follows:

1. The lengths of the segments on which it is necessary to arrange parallel OF are determined, depending on how much of the energy must be transferred from the anisotropic OF to the isotropic one.

2. Based on the performed calculations, the possibility of realizing the proposed device is proved, since the equality of the phase distribution coefficients of wavelengths, which are transferred due to the electromagnetic coupling from anisotropic optical fiber to isotropic one, is observed.

REFERENCES:

1. Odintsov N.N., Stashchuk O.M. "Investigation of the Anisotropy of Fiber Lightguides Curved on a Spiral Line." Odess: Scientific Works of ONAS them O.S. Popov № 1 (2008): 63-66.
2. Stashchuk O.M. "Frequency - selective filters and directed bifurcation taps in anisotropic medium." Odessa: Sensor: Sciences. pract. conf. (2009): 61-62.
3. Stashchuk O.M. "Uniform distribution of the power of an optical signal based on double refraction in a photoluminescent anisotropic medium." Vinnytsya: Modern Problems in Radio Electronics, Telecommunications and Instrumentation: IV International. sci.-tech. conf. (2009): 25.
4. Stashchuk O.M., Lisovyi I.P. "Frequency - selective separation of an optical signal based on the properties of anisotropic medium." Lviv: Modern Problems of Telecommunications - 2010: Sciences. pract. conf. theses of additional (2010): 101-103.

5. Bondarenko O.V., Vlasov O. M., Stashchuk O.M., Cherkashina Y.S. "Electromagnetic connection between anisotropic and isotropic optical fibers." Khmelnytsky: Bulletin of the Khmelnytsky National University № 2 (2011): 207-212.
6. Makarov T.V. "Non - reciprocal effects of waves and signals in spiral single - mode optical fibers. Part I." Works of UNDIRT № 2 (2004): 23–29.
7. Makarov T.V. "Non - reciprocal effects of waves and signals in spiral single - mode optical fibers. Part II." Works of UNDIRT № 2 (2004): 29–34.
8. Belov A.V., Kurkov A.S. "Waveguide properties of single - mode optical fibers." Tr. Institute of General Physics. Fiber Optics (1990): 49–66.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Одинцов Н.Н. Исследование анизотропии волоконных световодов изогнутых по спиральной линии / Н.Н. Одинцов, О.М. Стащук // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2008. – Вип. 1. – С. 63–66.
2. Стащук О.М. Частотно-избирательные фильтры и направленные ответвители на основе двойного лучепреломления в анизотропной среде / О.М. Стащук // Наук.-практ. конф. ["Сенсор – 2009"] (Одеса, 01 - 04 черв., 2009 г.). – Одеса, 2009. – С. 61–62.
3. Рівномірне розподілення потужності оптичного сигналу на основі подвійного променезаломлювання в фотопружному анізотропному середовищі / О.М. Стащук // IV Міжнар. наук.-техн. конф., ["Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування"] (Вінниця, 08 – 10 жовтня, 2009 р.). – Вінниця, 2009. – С. 25.
4. Стащук О.М. Частотно-селективне розділення оптичного сигналу на основі властивостей анізотропного середовища / О.М. Стащук, І.П. Лісовий // Сучасні проблеми телекомунікацій - 2010: наук.-практ. конф., 28 – 30 жовтня 2010 р.: тези доп. – Львів, 2010. – С. 101–103.
5. Бондаренко О.В. Электромагнитный зв'язок між анізотропним та ізотропним оптичними волокнами / О.М. Власов, О.М. Стащук, Ю.С. Черкашина // Вісник Хмельницького Національного Університету. – Хмельницький, 2011. – Вип. 2. – С. 207–212.
6. Макаров Т.В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах. Часть I / Т.В. Макаров // Праці УНДІРТ. – Одеса, 2004. – Вип. 2 (38). – С. 23–29.
7. Макаров Т.В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах. Часть II / Т.В. Макаров // Праці УНДІРТ. – Одесса, 2004. – Вип. 2 (38). – С. 29–34.
8. Белов А.В. Волноводные свойства одномодовых волоконных световодов / А.В. Белов, А.С. Курков // Тр. института общей физики. «Волоконная оптика». – Москва, 1990. – Т.23. – С. 49–66.

DOI 10.33243/2518-7139-2018-1-2-145-153