



ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ БИЕНИЙ В ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

С. К. Моршнеv^{1,2}, В. П. Губин^{1,2}, Н. И. Старостин^{1,2},
Я. В. Пржиялковский^{1,2}, А. И. Сазонов^{1,2}

¹Фрязинский филиал Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
г. Фрязино, Московская обл.

²АО "Профотек", г. Москва

Двулучепреломляющие волоконные световоды (ВС) появились в 1978–1983 годах вместе с технологиями термоупругих вставок в заготовки для вытяжки оптических волокон. В статье рассмотрены два основных метода измерения встроенного ДЛП ВС: спектрального метода и метода упругого кручения. В качестве объектов исследования взяты три типа ВС, вытянутых из заготовок с встроенным линейным двулучепреломлением (ДЛП): HiBi или иначе PM- (polarization maintaining) волокна; волокна, вытянутые из таких же заготовок, но с вращением заготовки – spun-волокна; LoBi-волокна, которые по способу получения относят к spun-волокнам. Подробно описана методика измерений длины биений встроенного ДЛП.

1. ВВЕДЕНИЕ

Явление линейного двулучепреломления (ДЛП) проявляет себя в различных скоростях распространения двух линейно поляризованных волн: обыкновенной и необыкновенной. В оптическом волокне обе волны распространяются вдоль его оси. Симметрия упругих напряжений или геометрическая симметрия вставок различных материалов в конструкции двулучепреломляющих волокон позволяет выделить две ортогональные оси ДЛП – быструю и медленную. Волна с электрическим вектором, параллельным быстрой оси, будет распространяться быстрее волны с электрическим вектором, направленным вдоль медленной оси, то есть показатель преломления (ПП) первой волны будет меньше ПП второй волны. Оси линейного ДЛП обозначают x и y , а ПП волн с линейными поляризациями вдоль этих осей – соответственно n_x и n_y . Величину линейного ДЛП измеряют разностью $n_x - n_y$.

BEAT LENGTH MEASUREMENT IN BIREFRINGENCE OPTICAL FIBERS

S. K. Morshnev^{1,2}, V. P. Gubin^{1,2}, N. I. Starostin^{1,2},
Ya. V. Prshiyalkovsky^{1,2}, A. I. Sazonov^{1,2}

¹V. A. Kotelnikov's Institute RAS, Fryazino branch,
Moscow region, Fryazino

²Joint Stock Company Profotech, Moscow

Birefringence optical fibers (OF) appeared in 1978–1983 together with the technologies of thermoelastic inserts in the workpieces for drawing optical fibers. This article deals with two basic methods of measurement of embedded BOFs: spectral method and elastic twisting method. Three OFs types, drawn from the workpieces with embedded linear birefringence are taken as objects of study: HiBi or also PM- (polarization maintaining) fibers; fibers, drawn from the same workpieces, but with the rotation of the workpiece – spun-fiber; LoBi-fibers, which by the method are referred to as spun-fibers. The technique of measuring the beat length of the embedded BOFs is described in detail.

1. INTRODUCTION

The phenomenon of linear birefringence manifests itself at various propagation velocities of two linearly polarized waves: ordinary and extraordinary. In an optical fiber, both waves propagate along its axis. Symmetry of elastic stresses or geometric symmetry of inserts of various materials in the design of birefringence fibers allows us to distinguish two orthogonal axes of birefringence – fast and slow. A wave with an electric vector parallel to the fast axis will propagate faster than a wave with an electric vector directed along the slow axis, i. e., the refraction index (RI) of the first wave will be smaller than that of the second wave. The axes of the linear birefringence are x and y , and the RI of the waves with linear polarizations along these axes are respectively n_x and n_y . The linear BOFs value is measured by the difference $n_x - n_y$.

The birefringence optic fibers include fibers drawn from the workpieces with embedded linear birefringence: HiBi-fibers [1–7], and drawn from the same workpieces, but with the rotation of the workpiece: spun-fibers [11–13]. HiBi-fibers are also referred to as the PM- (polarization maintaining)



К двулучепреломляющим волоконным световодам относятся волокна, вытянутые из заготовок с встроенным линейным двулучепреломлением (ДЛП): HiBi-волокна [1-7], и вытянутые из таких же заготовок, но с вращением заготовки: spun-волокна [11-13]. HiBi-волокна иначе называют PM (polarization maintaining) волокнами, то есть волокнами, сохраняющими поляризацию. Несколько отдельно стоят так называемые LoBi-волокна [8-10], которые по способу изготовления (вращение заготовки) относят к spun-волокнам. Как нам кажется, эти волокна заслуживают отдельного рассмотрения, так как принципиально в этих волокнах было все сделано для ликвидации исходного встроенного линейного ДЛП [8].

Двулучепреломляющие волоконные световоды появились в 1978-1983 годах вместе с технологиями термоупругих вставок в заготовки для вытяжки оптических волокон. В настоящее время эти волокна широко применяются в различных датчиках физических величин.

Различают Hi-Bi-волокна: 1) с эллиптической сердцевинной [1, 2]; 2) с эллиптической оболочкой [3, 4], 3) "Панда" с круглыми термоупругими вставками [5, 6]; 4) "Галстук бабочка" с трапецевидными вставками [7]; 5) возможны комбинации типов. Вытяжкой с вращением заготовки для любого HiBi-волокна получают spun-волокна [11-13]. Наконец, вытяжка с вращением заготовки, в которой отсутствуют искусственные ДЛП и приняты меры для получения круглой сердцевинной и расположения ее точно по центру волокна, дает LoBi-волокно [8-10].

Все эти волокна требуют измерений встроенного линейного ДЛП. У HiBi-волокон этот параметр является одним из основных: он связан со свойством сохранения поляризации излучения в этих волокнах. У spun-волокон спиральная структура осей встроенного линейного ДЛП обеспечивает сохранение направления вращения электрического вектора эллиптических состояний, необходимого для накопления эффекта Фарадея с длиной волокна, а также позволяет волокну сопротивляться вредному влиянию изгибов. У LoBi-волокон наличие линейного ДЛП в волокне является паразитным эффектом, также требующим измерения. Целью настоящей работы является рассмотрение и анализ двух основных методов измерения встроенного ДЛП вышеуказанных волоконных световодов (ВС) – спектрального метода и метода упругого кручения.

fibers, i.e., fibers that retain polarization. The so called LoBi-fibers [8-10] stand somewhat separately which by the manufacturing method (workpiece rotation) are referred to as spun-fibers. We believe, these fibers deserve a thorough consideration, since all possible for liquidation of the original embedded linear birefringence was done principally in these fibers [8].

Birefringence optical fibers appeared in 1978-1983 together with the technologies of thermoelastic inserts into the workpieces for drawing optical fibers. Currently, these fibers are widely used in various sensors of physical quantities.

There are Hi-Bi-fibers of the following types: 1) with an elliptical core [1, 2]; 2) with elliptical shell [3, 4], 3) "Panda" with round and thermoelastic inserts [5, 6]; 4) "Bow tie" with trapezoidal inserts [7]; 5) combinations of types are possible. Spun-fibers are obtained by drawing with rotation of the workpiece for any HiBi-fiber [11-13]. Finally, drawing with rotation of the workpiece without any artificial birefringence and measures are taken to obtain a round core and its position exactly in the fiber center gives a LoBi-fiber [8-10].

All these fibers require measurements of the embedded linear birefringence. This parameter of HiBi-fibers is one of the main – it is related to the property of maintaining the polarization of radiation in these fibers. The spiral structure of the axes of embedded linear birefringence of the spun-fiber ensures maintenance of the direction of rotation of the electric vector of elliptical states necessary to accumulate the Faraday effect with the fiber length, and also allows the fiber to resist the harmful influence of bends. The presence of linear birefringence in a fiber of the LoBi-fibers is a parasitic effect, which also requires measurement. The purpose of this paper is to consider and analyze two basic methods for measuring the embedded birefringence of the above optical fibers (OFs) – the spectral method and the elastic twisting method.

2. THE SPECTRAL METHOD

2.1. Experimental setting and methods of measurement

Light radiation propagates in birefringence fibers, as in uniaxial birefringence crystals along the direction of the perpendicular optical axis of the crystal. It is known that, in the most general form, a wave with an electric vector that does not coincide with any of the birefringence axes cannot excite a wave of the same polarization in the crystal. There are two waves: ordinary and extraordinary, generally

2. СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД

2.1. Экспериментальная установка и методика измерений

Световое излучение распространяется в двулучепреломляющих волокнах, как в одноосных двулучепреломляющих кристаллах вдоль направления перпендикулярного оптической оси кристалла. Известно, что в самом общем виде волна с электрическим вектором, не совпадающим ни с одной из осей ДЛП, не может возбудить в кристалле волну той же поляризации. Возникают две волны: обыкновенная и необыкновенная, в общем случае распространяющиеся вдоль различных направлений [14]. Однако при ориентации волнового вектора падающей волны вдоль направления перпендикулярного оптической оси кристалла направления распространения обыкновенной и необыкновенной волн совпадают, они отличаются ортогональными поляризациями (обыкновенная волна поляризована перпендикулярно оптической оси, необыкновенная – вдоль оптической оси) и соответственно скоростями распространения (показателями преломления n_x и n_y). В двулучепреломляющем волоконном световоде направление распространения совпадает с осью световода.

Линейное двулучепреломление определяют разностью показателей преломления $n_x - n_y$ двух линейно поляризованных волн, электрические векторы которых ориентированы вдоль осей x и y указанного ДЛП. На длине z волокна разность фаз $\Delta\varphi$ между волнами ортогональных поляризаций достигает величины:

$$\Delta\varphi = k_0 \cdot (n_x - n_y) \cdot z = (2\pi / \lambda_0) \cdot (n_x - n_y) \cdot z,$$

где k_0 – волновой вектор, λ_0 – длина волны в вакууме. Характеристикой ДЛП чаще выступает длина биений L_b , т.е. длина волокна $z = L_b$, на которой разность фаз достигает $\Delta\varphi(z = L_b) = 2\pi$:

$$L_b = \lambda_0 / (n_x - n_y).$$

На фоне различных способов измерения длин биений L_b [15–19] можно выделить популярный из-за своей кажущейся простоты спектральный метод [20, 21]. На рис. 1 приведена схема установки для таких измерений. Излучение широкополосного (ширина $\Delta\lambda \sim 80$ нм по уровню -60 dbm) источника 1 (эрбиевый суперлюминесцентный источник) проходит волоконно-оптический поляризатор 2 и поступает через сварное соединение 3 в измеряемое волокно 4. Сварное соединение 3

propagating along different directions [14]. However, when the wave vector of the incident wave is oriented along the direction of the perpendicular optical axis of the crystal, the directions of propagation of ordinary and extraordinary waves coincide, they differ in orthogonal polarizations (the ordinary wave is polarized perpendicular to the optical axis, extraordinary – along the optical axis) and, respectively, in the propagation velocities (refraction indices n_x and n_y). In a birefringence fiber, the direction of propagation coincides with the fiber axis.

Linear birefringence is determined by the difference in refractive indices $n_x - n_y$ of two linearly polarized waves whose electric vectors are oriented along the x and y of the indicated birefringence. On the length z of the fiber, the phase difference $\Delta\varphi$ between the waves of orthogonal polarizations reaches the value:

$$\Delta\varphi = k_0 \cdot (n_x - n_y) \cdot z = (2\pi / \lambda_0) \cdot (n_x - n_y) \cdot z,$$

where k_0 is wave vector of the wave, λ_0 is wavelength in vacuo. The beat length L_b is more often characteristic of birefringence, i. e. fiber length $z = L_b$, at which the phase difference reaches $\Delta\varphi(z = L_b) = 2\pi$:

$$L_b = \lambda_0 / (n_x - n_y).$$

Against the background of various ways of measuring the beat lengths L_b [15–19], one can single out the spectral method popular because of

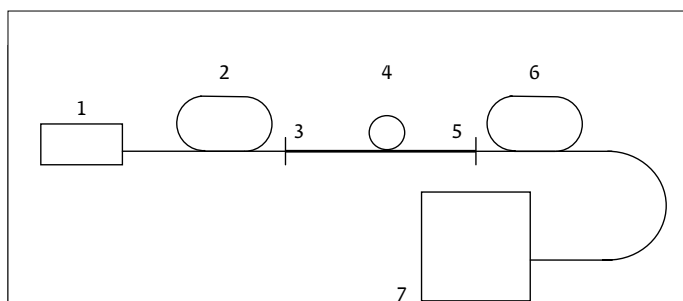


Рис. 1. Схема установки для измерения ДЛП, встроенного в волокно, спектральным методом: 1 – широкополосный источник оптического излучения, 2 – волоконный поляризатор, 3 и 5 – сварные соединения, 4 – исследуемое волоконное волокно, 6 – волоконный поляризатор (анализатор), 7 – спектроанализатор

Fig.1. Scheme of setting for measurement of birefringence embedded in a fiber by the spectral method: 1 – broadband optical radiation source, 2 – fiber polarizer, 3 and 5 – welded joints, 4 – studied optical fiber, 6 – fiber polariser (analyzer), 7 – spectroanalyzer



выполнено таким образом, что электрический вектор волны на выходе поляризатора 2 направлен под углом 45° к осям линейного ДЛП, встроенного в измеряемое волокно 4 (45° сварное соединение). В результате две линейно поляризованные волны, распространяющиеся в HiBi-волокне, имеют приблизительно равные интенсивности и ортогональные поляризации. Для наблюдения интерференции этих волн требуется еще волоконно-оптический поляризатор-анализатор 6, подключенный также через 45°, сварное соединение 5. Выход поляризатора 6 подключен к спектроанализатору 7. На рис. 2 показан типичный интерференционный спектр, наблюдаемый на экране спектроанализатора 7:

$$I = I_0 \cdot [1 + \cos(\Delta\varphi)] = I_0 \cdot [1 + \cos[(2\pi/\lambda_0) \cdot (n_x - n_y) \cdot z]].$$

По оси ординат отложен логарифм интенсивности I . Если не учитывать изменение ПП с длиной волны, то есть считать $n_x - n_y = \text{const}$, то длину биений рассчитывают по формуле [20]:

$$L_b = (\Delta\lambda/\lambda_0) \cdot z. \quad (1)$$

Длину биений HiBi-волокна таким образом можно определить, зная расстояние по спектру $\Delta\lambda$ между двумя соседними минимумами в спектре интерференционной картины, длину волны λ_0 одного из минимумов и длину измеряемого отрезка z волокна.

2.2. HiBi-волокна

Изложенный метод измерения ДЛП [20] был подвергнут критике в работе [21] на том основании, что он не учитывает дисперсию показателей преломления, по крайней мере, в диапазоне длин волн $\sim \Delta\lambda$. Действительно, с учетом дисперсии ПП получаем [21]:

$$(\Delta\lambda/\lambda) \cdot z = \lambda \{ (n_x - n_y) - [d(n_x - n_y)/d\lambda] \cdot \lambda \}^{-1} = L_b^{gr}. \quad (2)$$

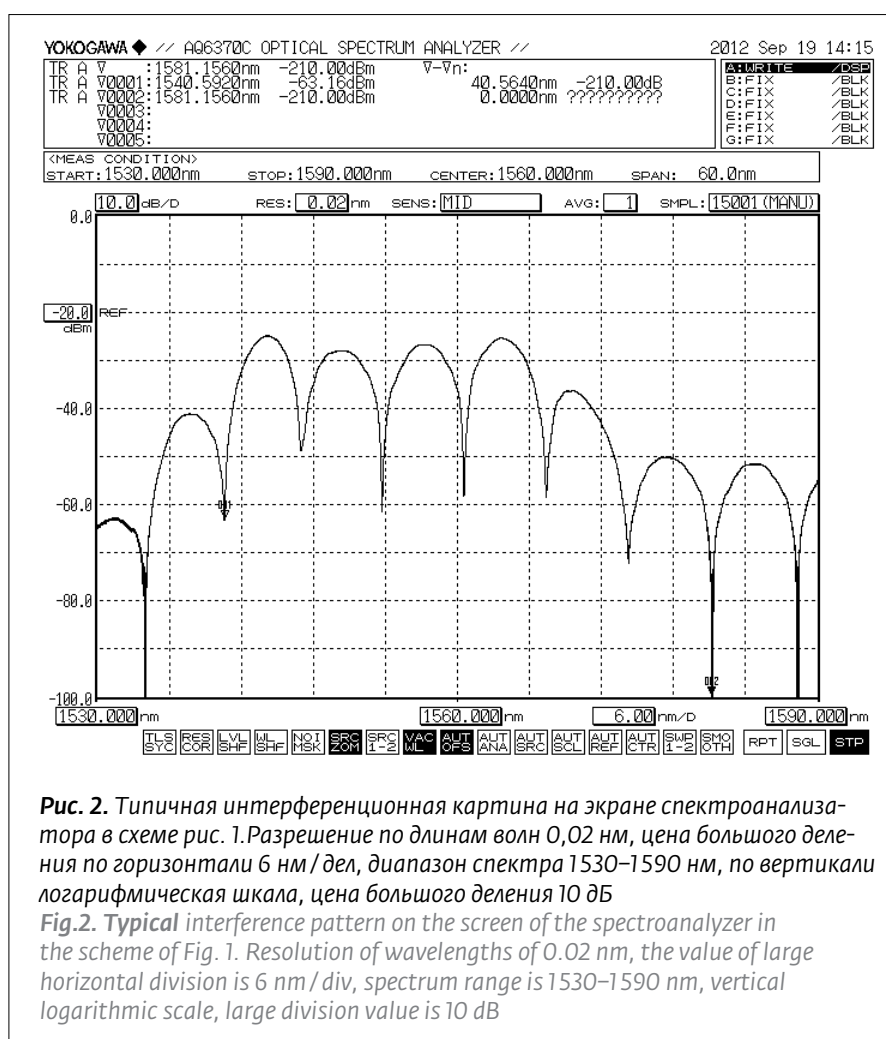


Рис. 2. Типичная интерференционная картина на экране спектроанализатора в схеме рис. 1. Разрешение по длинам волн 0,02 нм, цена большого деления по горизонтали 6 нм/дел, диапазон спектра 1530–1590 нм, по вертикали логарифмическая шкала, цена большого деления 10 дБ
Fig.2. Typical interference pattern on the screen of the spectroanalyzer in the scheme of Fig. 1. Resolution of wavelengths of 0.02 nm, the value of large horizontal division is 6 nm/div, spectrum range is 1530–1590 nm, vertical logarithmic scale, large division value is 10 dB

its apparent simplicity [20, 21]. Figure 1 shows a scheme of the arrangement for such measurements. The broadband radiation (width $\Delta\lambda \sim 80$ nm at the level of -60 dbm) of source 1 (erbium superluminescent source) passes fiber optic polarizer 2 and passes through welded joint 3 to measured fiber 4. Welded connection 3 is designed in such a way that the electric wave vector at the output of polarizer 2 at an angle of 45° to the axes of the linear birefringence embedded in measured fiber 4 (45° welded connection). As a result, two linearly polarized waves propagating in the HiBi-fiber have approximately equal intensities and orthogonal polarizations. To observe the interference of these waves, we also need a fiber-optic polarizer-analyzer 6 also connected through 45° welded connection 5. Polarizer 6 output is connected to the spectrum analyzer 7. Figure 2 shows a typical interference spectrum observed on the screen of spectroanalyser 7:

$$I = I_0 \cdot [1 + \cos(\Delta\varphi)] = I_0 \cdot [1 + \cos[(2\pi/\lambda_0) \cdot (n_x - n_y) \cdot z]].$$



Величина, стоящая в фигурных скобках, есть по определению групповое ДЛП (с длиной биений L_b^{gr}). Таким образом, формула (1) и предложенный спектральный метод позволяет определить длину биений в HiBi-волокнах только группового линейного ДЛП. Для определения длины биений фазового ДЛП требуются дополнительные исследования дисперсии ПП n_x и n_y в спектральном диапазоне $\lambda \pm \Delta\lambda$.

Например, отрезок HiBi-волокна $z=1,0$ м помещен в измерительную схему рис. 1. Рабочая длина волны $\lambda_0=1550$ нм, экспериментальный спектральный интервал между двумя минимумами $\Delta\lambda=14$ нм. Групповая длина биений согласно формуле (1) $L_b^{gr}=9,0$ мм. Дисперсии ПП n_x и n_y следует измерять отдельно, чтобы получить "фазовое" ДЛП. Погрешность в определении $\Delta\lambda$ у спектроанализатора составляет $\pm 0,02$ нм, что позволяет измерять длины биений вплоть до $L_b^{gr} \sim 0,1$ мм. Ограничением слабых двулучепреломлений в схеме рис. 1 является ширина спектра источника и длина волокна. В нашем случае максимальный интервал между двумя минимумами $\Delta\lambda_{max} \sim 40$ нм, максимальная длина HiBi-волокна, ограниченная длиной когерентности излучения источника, $z \sim 6$ м. Действительно, однородная ширина спектра источника составляет $\delta\lambda \sim 2$ нм $\approx 10\%$ от неоднородной ширины, обусловленной различными переходами между уровнями Er^{+3} . Длина когерентности (длина цуга) в этом случае составляет $\sim 1,2$ мм: $l_{коз} = \lambda^2 / \delta\lambda \approx 1,2$ мм, а максимально возможная длина волокна z_{max} при $n_x - n_y \sim 2 \cdot 10^{-4}$:

$$z_{max} = l_{коз} / (n_x - n_y) \approx 6 \text{ м.}$$

Принимая вышеприведенные значения: $z_{max} \sim 6$ м, $\Delta\lambda \sim 40$ нм, для рабочей длины волны $\lambda_0=1550$ нм из формулы (1) получаем $L_b^{gr}=150$ мм. Итак, по нашим оценкам, спектральным методом с суперлюминесцентным эрбиевым источником можно измерять "групповые" длины биений линейных ДЛП в HiBi-волокнах в диапазоне $150 \text{ мм} \leq L_b^{gr} \leq 0,1 \text{ мм}$.

2.3. Spon-волокна

Спектральные измерения встроенного линейного ДЛП в spon-волокнах проводят аналогично измерениям HiBi-волокон на установке, приведенной на рис. 1, однако обработку полученных результатов следует проводить по другим формулам. Действительно, характер распространения света в spon-волокнах существенно отличается от рассмотренного выше. У исходно линейно поляризо-

The logarithm of the intensity I is plotted along the ordinate axis. If we do not take into account the change in the RI with the wavelength, i. e., $n_x - n_y = \text{const}$, then the beat length is calculated by the formula [20]:

$$L_b = (\Delta\lambda / \lambda_0) \cdot z. \quad (1)$$

The beat length of the HiBi-fiber can thus be determined by knowing the distance from the spectrum $\Delta\lambda$ between two adjacent minima in the spectrum of the interference pattern, the wavelength λ_0 of one of the minima, and the length of the measured segment z of the fiber:

2.2. HiBi-fibers.

The above birefringence measurement method [20] was criticized in [21] on the grounds that it does not take into account the dispersion of the refractive indices, at least in the wavelength range $\sim \Delta\lambda$. Indeed, taking into account the dispersion of the RI, we obtain [21]:

$$(\Delta\lambda / \lambda) \cdot z = \lambda \{ (n_x - n_y) - [d(n_x - n_y) / d\lambda] \cdot \lambda \}^{-1} = L_b^{gr}. \quad (2)$$

The quantity in curly brackets, by definition, is a group birefringence (with a beat length L_b^{gr}). Thus, the formula (1) and the proposed spectral method allows to determine beat length in Hibi-fibers only of the group linear birefringence. To determine the beat length of the phase birefringence, additional studies of the dispersion of the RI n_x and n_y in the spectral range $\lambda \pm \Delta\lambda$ are required.

For example, a segment of HiBi-fiber $z=1,0$ м is placed in the measurement scheme of Fig.1. Working wavelength $\lambda_0=1550$ нм, experimental spectral interval between two minima $\Delta\lambda=14$ нм. The group beat length according to formula (1) $L_b^{gr}=9,0$ мм. Dispersions of the RI n_x and n_y should be measured separately to obtain a "phase" birefringence. The error in the determination of $\Delta\lambda$ in the spectroanalyzer is $\pm 0,02$ нм, which makes it possible to measure the beat length up to $L_b^{gr} \sim 0,1$ мм. The limitation of weak birefringence in the circuit in Fig. 1 is the width of the source spectrum and the length of the fiber. In our case, the maximum interval between two minima $\Delta\lambda_{max} \sim 40$ нм, the maximum length of HiBi-fiber, limited coherence length of the radiation source, $z \sim 6$ м. Indeed, the homogeneous width of the source spectrum is $\delta\lambda \sim 2$ нм $\approx 10\%$ of the inhomogeneous width due to various transitions between Er^{+3} levels. The length of the coherence (train length) in this case is $\sim 1,2$ мм: $l_{коз} = \lambda^2 / \delta\lambda \approx 1,2$ мм,

ванного света в процессе распространения в spun-волокне поворачивается плоскость поляризации, и наблюдаются периодические изменения угла эллиптичности. Иллюстрацию такого поворота может дать рис. 3, где приведена эволюция поляризационных состояний по мере распространения света в spun-волокне. На рис. 3 приведены сферы Пуанкаре, на которых долготы места есть удвоенный азимутальный угол (изменение азимутального угла – поворот плоскости поляризации), а широта – удвоенный угол эллиптичности светового излучения. Из сравнения рис. 3а и рис. 3б видно, что величина поворота плоскости поляризации зависит от величины встроенного линейного ДЛП [22]. Максимумы и минимумы наблюдаемой картины (типа рис. 2) теперь зависят от ориентации электрического вектора волны относительно ориентации плоскости пропускающего анализатора. Если не учитывать дисперсию ПП, то получаем формулу для определения длины биений встроенного ДЛП из эксперимента [23]:

$$L_{bexp}^2 = (\Delta\lambda / 2\lambda) \cdot L_{tw} \cdot z. \quad (3)$$

Длину биений встроенного линейного ДЛП spun-волокна таким образом можно определить, зная расстояние по спектру $\Delta\lambda$ между двумя соседними минимумами в спектре, длину волны λ_0 одного из минимумов, шаг спиральной структуры L_{tw} осей линейного ДЛП, встроенного в spun-волокно, и длину измеряемого отрезка z spun-волокна.

Как показано в работе [22], экспериментальное значение длины биений L_{bexp} есть среднее геометрическое групповой L_b^{gr} и фазовой L_b^{ph} длин биений:

$$L_{bexp}^2 = L_b^{gr} \cdot L_b^{ph} = (\Delta\lambda / 2\lambda_0) \cdot L_{tw} \cdot z. \quad (4)$$

Spun-волокно вытягивают из заготовки с достаточно сильным линейным ДЛП, подвергая заготовку быстрому вращению, чтобы обеспечить один оборот заготовки на длине вытяжки, равной шагу спиральной структуры L_{tw} . В принципе можно вытянуть из этой же заготовки и HiBi-волокно, если не

and the maximum possible fiber length z_{max} at $n_x - n_y \sim 2 \cdot 10^{-4}$:

$$z_{max} = l_{kog} / (n_x - n_y) \approx 6 \text{ m}.$$

Assuming the above values: $z_{max} \sim 6 \text{ m}$, $\Delta\lambda \sim 40 \text{ nm}$, for the working wavelength $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ from the formula (1) we obtain $L_b^{gr} = 150 \text{ mm}$. Thus, according to our estimates, the spectral method with the erbium superluminescent source can be measured by "group" beat length linear birefringence in HiBi-fibers in the range of $150 \text{ mm} \leq L_b^{gr} \leq 0.1 \text{ mm}$.

2.3. Spun-fibers.

Spectral measurements of embedded linear birefringence in the spun-fibers is carried out similar to measurements of HiBi-fibers with the setup shown in Figure 1, but the processing of the results should be carried out by other formulas. Indeed, the nature of light propagation in the spun-fibers is substantially different from that considered above. The initially linearly polarized light during propagation in the spun-fiber has a plane of polarization is rotatable, and periodic changes of ellipticity angle are observed. An illustration of this rotation can be given in Fig.3, which shows the evolution of polarization states as the light propagates in the spun-fiber. Figure 3 shows

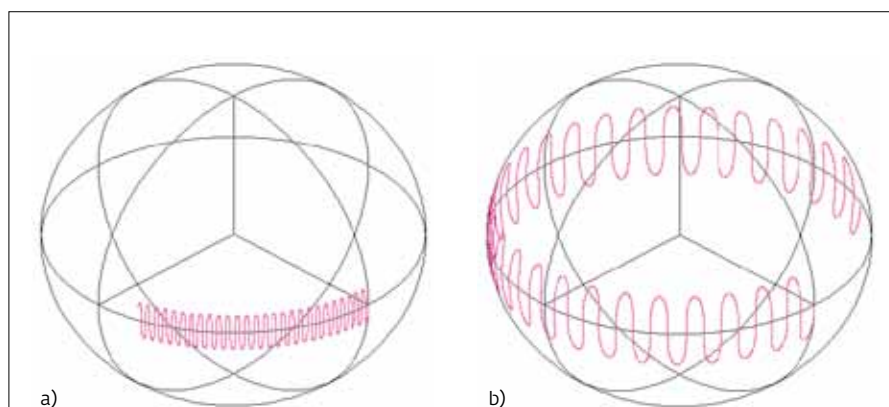


Рис. 3. Эволюция поляризационных состояний на сфере Пуанкаре. Поворот плоскости поляризации света при его распространении в spun-волокне проявляется в траектории движения вдоль экватора сферы Пуанкаре. Эволюция на длине волокна $L = 40 \text{ мм}$, параметры волокна: а) $L_{tw} = 3 \text{ мм}$; $L_b = 12 \text{ мм}$; б) $L_{tw} = 3 \text{ мм}$; $L_b = 6 \text{ мм}$. Чем сильнее встроенное линейное двойное лучепреломление (чем меньше L_b), тем больше угол поворота плоскости поляризации
Fig. 3. Evolution of polarization states on the Poincaré sphere. The rotation of the plane of polarization of light as it propagates in the spun-fiber is manifested in the trajectory of motion along the equator of the Poincaré sphere. Evolution on fiber length $L = 40 \text{ mm}$, fiber parameters: а) $L_{tw} = 3 \text{ mm}$; $L_b = 12 \text{ mm}$; б) $L_{tw} = 3 \text{ mm}$; $L_b = 6 \text{ mm}$. The stronger the embedded linear birefringence (the smaller L_b), the greater the angle of rotation of the plane of polarization



вращать заготовку. В этом случае, как показано выше, можно спектральным методом определить групповую длину биений HiBi-волокна L_b^{gr} , экспериментальную длину биений spun-волокна L_{bexp} и, считая, что при вытяжке длина биений встроенного в волокно линейного ДЛП не меняется, по формуле (4) можно определить фазовую длину биений L_b^{ph} .

Например, отрезок spun-волокна $z=10$ м помещен в измерительную схему рис. 1. Рабочая длина волны $\lambda_0=1550$ нм, экспериментальный спектральный интервал между двумя минимумами $\Delta\lambda_{exp}=10$ нм, шаг спиральной структуры осей линейного ДЛП $L_{tw}=3$ мм. Экспериментальная длина биений согласно формуле (3) $L_{bexp}=10,3$ мм. Пусть исследование HiBi-волокна, вытянутого из той же заготовки, но без вращения, тем же спектральным методом дало значение групповой длины биений $L_b^{gr}=9,6$ мм, тогда фазовая длина биений встроенного линейного ДЛП spun-волокна согласно формуле (4) будет $L_b^{ph}=11$ мм. Как показано в работе [22], у температурных зависимостей $L_b^{gr}(T)$ и $L_b^{ph}(T)$ одинаковые температурные коэффициенты (наклоны графиков), это позволяет надеяться на то, что в процессе вытяжки встроенные ДЛП не меняются.

Поворот плоскости поляризации обусловлен запаздыванием одной циркулярно поляризованной моды относительно другой по мере распространения света вдоль spun-волокна. Эта задержка $\varphi_L - \varphi_R$ приводит к повороту плоскости поляризации суммарной моды на выходе волокна на угол $\delta\theta$ равный половине фазовой задержки $\delta\theta = (\varphi_L - \varphi_R) / 2$. Разность показателей преломления $n_L - n_R$ левополяризованной и правополяризованной мод определяют по формуле [25]:

$$n_L - n_R = \lambda \cdot L_{tw} / (2L_b)^2.$$

Для spun-волокна с параметрами $L_{tw}=3$ мм; $L_b=10$ мм разность $n_L - n_R \sim 10^{-5}$, что на порядок меньше величины линейного ДЛП $n_x - n_y \sim 2 \cdot 10^{-4}$ при тех же параметрах. Следовательно, при той же длине когерентности источника $l_{коз}=1,2$ мм, что и в п. 2.2 максимально возможная длина волокна z_{max} :

$$z_{max} = l_{коз} / (n_L - n_R) \approx 120 \text{ м.}$$

Принимая значения: $z_{max} \sim 120$ м, $\Delta\lambda \sim 40$ нм, для рабочей длины волны $\lambda_0=1550$ нм из формулы (4) получаем ограничение сверху $L_{bexp}=70$ мм. Минимальное значение L_{bexp} , как и в п. 2.2, определяется

the Poincare spheres, where the longitude of the place is a doubled azimuth angle (the change in the azimuth angle is the rotation of the plane of polarization), and the latitude is a doubled ellipticity angle of the light radiation. Comparing Fig. 3a and Fig. 3b, it's clear that the magnitude of rotation of the plane of polarization depends on the value of the embedded linear birefringence [22]. The maxima and minima observed pattern (such as Figure 2) are now dependent on the orientation of the electric vector of the wave with respect to the orientation of the analyzer transmittance plane. If we do not take into account the variance of the RI, we obtain a formula for determining the beat length of the embedded birefringence from the experiment [23]:

$$L_{bexp}^2 = (\Delta\lambda / 2\lambda) \cdot L_{tw} \cdot z. \tag{3}$$

Beat length of the embedded linear birefringence of the spun-fiber can thus be determined by knowing the distance from the spectrum $\Delta\lambda$ between two adjacent minima in the spectrum, the wavelength λ_0 of one of the minima, the pitch of the spiral structure L_{tw} of the axes of linear birefringence embedded into spun-fiber, and the length of the measured interval z of the spun-fiber.

As shown in [22], the experimental value of the beat length L_{bexp} is the geometric mean of the group L_b^{gr} and phase L_b^{ph} the beat length:

$$L_{bexp}^2 = L_b^{gr} \cdot L_b^{ph} = (\Delta\lambda / 2\lambda_0) \cdot L_{tw} \cdot z. \tag{4}$$

Spun-fiber is drawn from the workpiece with a sufficiently strong linear birefringence, exposing the workpiece to a rapid rotation to provide one turn of the workpiece on the drawing length equal to the pitch of the helical structure L_{tw} . In principle, you can draw HiBi-fiber from the same workpiece, if you do not rotate the workpiece. In this case, as shown above, the spectral method can determine the group of the beat length of HiBi-fiber L_b^{gr} , experimental beat length of spun-fiber L_{bexp} and, assuming that when drawing, the beat length of the linear birefringence embedded into the fiber does not change, according to the formula (4), it is possible to determine the phase beat length L_b^{ph} .

For example, the segment of spun-fiber $z=10$ м is placed in the measurement scheme shown in Fig. The working wavelength $\lambda_0 = 1550$ нм, the experimental spectral interval between two minima $\Delta\lambda_{exp} = 10$ нм, the pitch of the spiral structure of the axes of the linear birefringence $L_{tw} = 3$ мм. The experimental beat length according to formula (3) $L_{bexp} = 10,3$ мм.

разрешающей способностью спектроанализатора $\pm 0,02$ нм, что дает при длине волокна $z=1$ м по формуле (4) ограничение снизу $L_{b\text{exp}}=0,02$ мм. Итак, спектральным методом с суперлюминесцентным эрбиевым источником можно измерять "смешанные" длины биений линейных ДЛП в spun-волокнах в диапазоне $70 \text{ мм} \leq L_{b\text{exp}} \leq 0,02$ мм.

2.4. LoBi-волокна

В заготовках для вытяжки LoBi-волокон старательно убирают все возможные причины, вызывающие ДЛП: трубки для заготовки "идеально" круглые, осаждение веществ, формирующих сердцевину, и схлопывание заготовки производят при однородном нагреве по азимуту заготовки, сердцевину формируют точно по центру заготовки, ось вращения при вытяжке LoBi-волокна проходит точно по центру заготовки и т. п. Наши исследования [24], однако, показали, что изготовленные из наших заготовок и заготовок иностранных фирм LoBi-волокна имели слабые ДЛП с длиной биений до $L_b \sim 80$ мм. У доступных нам LoBi-волокон иностранного производства встроенное линейное ДЛП было такого же порядка. Мы считаем, что оно связано с очень небольшим несопадением оси вращения при вытяжке с центром сердцевин в заготовке. В этом смысле реальные LoBi-волокна можно отнести к spun-волокнам с очень слабым встроенным линейным ДЛП. Это позволяет применять спектральный метод к LoBi-волокнам с расчетами по формуле (4) и приведенными в п. 2.3 ограничениями: $70 \text{ мм} \leq L_{b\text{exp}} \leq 0,02$ мм.

Слабое ДЛП создает дополнительные трудности в использовании спектрального метода. Для измерения больших длин биений требуются большие длины отрезков измеряемых LoBi-волокон ~ 100 м. Намотка таких отрезков даже по сравнительно большим радиусам приведет к дополнительному, индуцированному изгибом, линейному ДЛП, которое и будет измерено как встроенное линейное ДЛП, поскольку само встроенное ДЛП – мало.

3. МЕТОД УПРУГОГО КРУЧЕНИЯ ВОЛОКНА ВОКРУГ ОСИ

3.1. Экспериментальная установка упругого кручения и методика измерений

Метод упругого кручения вокруг оси волокна позволяет измерять фазовую длину биений встроенного в волокно ДЛП. Во время кручения, вплоть до 10÷15 оборотов, влияние образующегося цир-

Let the study of the HiBi-fiber drawn from the same workpiece but without rotation, by the same spectral method has given a value of group beat length of $L_b^{gr}=9,6$ mm, then the phase length of the embedded linear birefringence of the spun-fiber according to formula (4) will be $L_b^{ph}=11$ mm. As it was shown in [22], in temperature dependences $L_b^{gr}(T)$ and $L_b^{ph}(T)$ have the same temperature coefficients (slopes of the plots), which allows us to hope that during the drawing, the embedded birefringence does not change.

The rotation of the polarization plane is due to the lag of one circularly polarized mode relative to the other as the light propagates along the spun-fiber. This delay $\varphi_L - \varphi_R$ leads to a rotation of the polarization plane of the total mode at the fiber output by an angle of $\delta\theta$ equal to half phase delay $\delta\theta = (\varphi_L - \varphi_R)/2$. The refractive index difference $n_L - n_R$ of the left-polarized and right-polarized modes is determined by the formula [25]:

$$n_L - n_R = \lambda \cdot L_{tw} / (2L_b)^2.$$

For spun-fibers with parameters $L_{tw}=3$ mm; $L_b=10$ mm difference $n_L - n_R \sim 10^{-5}$, which is an order of magnitude smaller than the linear birefringence value $n_x - n_y \sim 2 \cdot 10^{-4}$ for the same parameters. Therefore, for the same source coherence length $l_{coh}=1.2$ mm, as in 2.2, the maximum possible fiber length z_{max} :

$$z_{max} = l_{coh} / (n_L - n_R) \approx 120 \text{ м.}$$

Assuming the values: $z_{max} \sim 120$ m, $\Delta\lambda \sim 40$ nm, for the working wavelength $\lambda_0 = 1550$ nm from formula (4) we obtain the upper limit $L_{b\text{exp}} = 70$ mm. Minimum value $L_{b\text{exp}}$, as in 2.2, is determined by the resolving power of the spectroanalyzer ± 0.02 nm, which gives, for a fiber length $z=1$ m by formula (4) the limitation from below $L_{b\text{exp}}=0.02$ mm. Thus, the spectral method with an erbium superluminescent source can be used for measurement of "mixed" linear birefringence beat length in the spun-fibers in the range of $70 \text{ мм} \leq L_{b\text{exp}} \leq 0.02$ мм.

2.4. LoBi-fibers

In the workpieces for the LoBi-fibers, all the possible causes of birefringence are thoroughly removed: the tubes for the workpiece are "ideally" round, the deposition of the substances forming the core and the collapse of the workpiece are made with homogeneous heating along the azimuth of the workpiece, the core is formed precisely along the center of the workpiece, the axis of rotation when drawing LoBi-fiber is

кулярного ДЛП пренебрежимо мало и не мешает сравнительно простой интерпретации результатов через фазовую задержку Rtd между модами, отличающимися ортогональными поляризациями. В Ni-Vi-волокнах это быстрая и медленная волны, а в spun-волокнах это фазовая задержка между линейно поляризованными модами, на которые можно разложить эллиптически поляризованное состояние, получающееся в процессе распространения света по spun-волокну (см. рис. 3). Угол фазовой задержки Rtd равен удвоенному углу эллиптичности $Rtd = 2\delta = 2 \cdot \arctg(b/a)$.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4. В качестве источника света используется полупроводниковый лазер 1, генерирующий излучение с длиной волны $\lambda = 1,55$ мкм, питаемый от стабилизатора тока 2. Объектив 3 создает параллельный пучок света, прерываемый механическим модулятором 4, и проходящий через линейный поляризатор 5. Поворот поляризатора изменяет азимутальный угол α по отношению к положению осей линейного ДЛП на входе ВС. Объектив 6 с юстировочным столиком 7 фокусирует излучение на входной торец исследуемого волокна 8, закрепленного на площадке 9 натяжного устройства с помощью оптического клея 10. Натяжение передается нитью, перекинутой через блок 11, а его величина регулируется грузом 12 (~0,4 Н). Вращение ВС вокруг оси волокна обеспечивается вращающим механизмом 13, на площадке которого закрепляется оптическим клеем 10 второй конец волокна (длина упруго скручиваемого отрезка волокна равна z). Излучение, поступающее с выхода ВС, проходит анализатор 14 и регистрируется фотодиодом 15. Промодулированный фототок поступает на синхронный усилитель 16, величина сигнала регистрируется компьютером 17.

Фазовая задержка Rtd определяется по формуле:

$$\cos Rtd = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}), \quad (5)$$

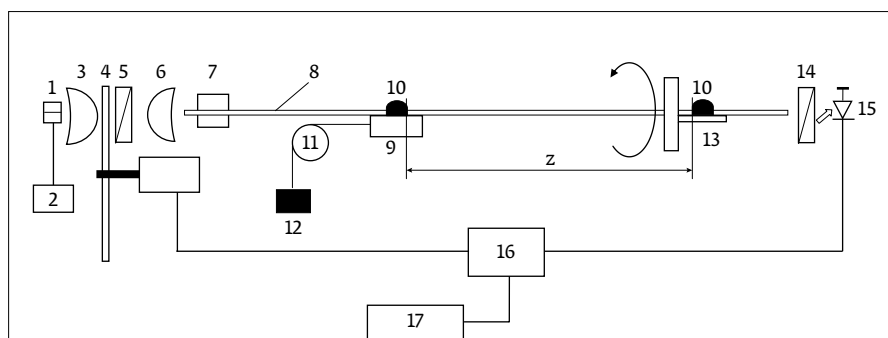


Рис. 4. Блок-схема установки для измерения ДЛП, встроенного в волокно, методом упругого кручения: 1 – источник светового излучения (полупроводниковый лазер); 2 – блок питания источника света; 3 – объектив, создающий параллельный пучок света; 4 – механический модулятор; 5 – поляризатор с углом поворота α по азимуту; 6 – объектив для ввода излучения в ВС; 7 – юстировочное устройство; 8 – измеряемый волоконный световод; 9 – площадка натяжного механизма; 10 – крепление ВС; 11 – блок; 12 – груз, натягивающий ВС; 13 – площадка вращающего механизма (ротора); 14 – анализатор на выходе ВС; 15 – фотоприемник; 16 – синхронный усилитель; 17 – компьютер

Fig.4. Flow diagram of the device for measuring birefringence embedded in the fiber by the elastic twisting method: 1 – light source (semiconductor laser); 2 – power supply unit of the light source; 3 – lens that creates a parallel light beam; 4 – mechanical modulator; 5 – polarizer with a rotation angle α in azimuth; 6 – lens for introducing radiation into the OF; 7 – adjusting device; 8 – measured optical fiber; 9 – platform of the tension mechanism; 10 – fixing of the OF; 11 – block; 12 – load, pulling the OF; 13 – platform of the rotating mechanism (rotor); 14 – analyzer at the output of the OF; 15 – photodetector; 16 – synchronous amplifier; 17 – computer

exactly along the center of the workpiece, etc. Our [24], however, showed that LoBi-fibers made from our workpieces and foreign workpieces firms had weak birefringence with a beat length of up to $L_b \sim 80$ mm. In the foreign-made LoBi-fibers available to us, embedded linear birefringence was of the same order. We believe that it is associated with a very small misalignment of the axis of rotation when drawing with the center of the core in the workpiece. In this sense, real LoBi-fibers can be referred to spun-fibers with a very weak embedded linear birefringence. This makes it possible to apply the spectral method to LoBi-fibers with the calculations and according to formula (4) and the limitations in 2.3: $70 \text{ mm} \leq L_{b \text{exp}} \leq 0,02 \text{ mm}$.

A weak birefringence creates additional difficulties in the use of the spectral method. To measure large beating lengths, long lengths of measured LoBi fibers ~ 100 m are required. Winding such segments even over relatively large radii will lead to an additional, induced by bending, linear DLB, which will be measured as an embedded linear SLP, since the embedded BOFS itself is small.



где I_{max} , I_{min} – интенсивности излучения, полученные при вращении анализатора 14, характеризующие эллиптичность света на выходе ВС в отсутствии дихроизма волокна.

Как показано в работе [25], общая формула для фазовой задержки Rtd , применимая ко всем видам двулучепреломляющих волокон, имеет вид:

$$\sin Rtd = \frac{\Delta\beta \cdot (\xi + \gamma/2)(1 - \cos 2\Omega z) \cos 2\alpha - \Omega \cdot \sin 2\Omega z \cdot \sin 2\alpha}{2\Omega^2}, \quad (6)$$

где: $\Delta\beta = 2\pi/L_b$ – скорость нарастания фазовой задержки с длиной z волокна между волнами ортогональных линейных поляризаций из-за встроенного линейного ДЛП с длиной биений L_b ;

$\gamma_0 = 2\pi/L_c$ – аналогично, скорость нарастания фазовой задержки между волнами ортогональных циркулярных поляризаций из-за циркулярного ДЛП с длиной биений L_c ;

$\xi_0 = 2\pi/L_{tw}$ – угловая скорость вращения осей встроенного линейного ДЛП в спиральной структуре с шагом спирали L_{tw} ;

$\xi = \xi_0 \pm \varphi/z$; $\pm\varphi$ – угол упругого кручения

3. THE METHOD OF ELASTIC TWISTING OF A FIBER AROUND AN AXIS

3.1. Experimental setting of elastic twisting and measurement technique

The method of elastic twisting around the fiber axis makes it possible to measure the phase beat length of the birefringence embedded in the fiber. During twisting, up to 10÷15 revolutions, the influence of the circular birefringence formed is negligible and does not interfere with the relatively simple interpretation of the results through the phase delay Rtd between modes differing in orthogonal polarizations. They are fast and slow waves in the HiBi-fibers, and in the spun-fibers, this is the phase delay between linearly polarized modes, into which an elliptically polarized state resulting from the propagation of light through the spun fiber can be propagated (see Fig. 3). The angle of phase delay Rtd is equal to doubled angle of ellipticity $Rtd = 2\delta = 2 \cdot \arctg(b/a)$.

The scheme of the experimental setting is shown in Fig. As a light source, semiconductor laser 1 is used that generates radiation with a wavelength $\lambda = 1.55$ microns, fed from current stabilizer 2. Lens 3 generates a parallel light beam interrupted by mechanical modulator 4, and passing through linear polarizer 5. Rotating polarizer changes

образца волокна длиной z (знак выбирают по отношению к направлению кручения в спиральной структуре);

$\gamma = \varphi / \mu z$ – учтено циркулярное ДЛП, возникающее при упругом кручении волокна вокруг оси [26], $\mu = 6,85$;

α – азимутальный угол входного поляризационного состояния;

$$\Omega = \sqrt{(\Delta\beta/2)^2 + [\xi + (\gamma/2)]^2}, \quad (7)$$

Ω – пространственная частота.

Как видно из формулы (7), угол упругого кручения φ входит в пространственную частоту Ω и обеспечивает периодическое изменение фазовой задержки Rtd в процессе упругого кручения. Более того, как показал Рашли [26], упругое кручение вызывает слабое циркулярное ДЛП:

$$\gamma = \varphi / (\mu z), \quad (8)$$

где $\mu = 6,85$ для кварцевых волокон. Физически это означает, что в волокне длиной z можно получить циркулярное ДЛП с длиной биений $L_c = z$, только сделав на длине волокна L_c около 7 оборотов вокруг оси. Как показывает опыт [25], влияние наведенного кручением циркулярного ДЛП становится заметным начиная с -20 оборотов вокруг оси волокна при длине образца $z = 1$ м. Формулы (5)–(8) выведены для монохроматического света, поэтому длина биений здесь фазовая.

Методика измерений следующая. Вращением входного поляризатора 5 устанавливают произвольный угол α по отношению к осям ДЛП исследуемого волокна. Вращением анализатора 14 получают максимальное I_{max} и минимальное I_{min} значения интенсивностей эллиптической поляризации на выходе волокна. Рассчитывают по формуле (5) $\cos Rtd$. Затем поворачивают входной поляризатор 5 на небольшой угол и анализатором 14 стараются получить максимальное значение $\cos Rtd$. Когда значение $\cos Rtd$ достигает значения, приблизительно равного единице, можно утверждать, что азимутальный угол равен $\alpha = 0$, то есть

azimuthal angle α relative to the position of axes of linear birefringence at the OF inlet. Lens 6 with alignment table 7 focuses radiation at the input end of test fiber 8 fixed to platform 9 of the tension device using optical adhesive 10. The tension is transmitted through a thread let through block 11, and its magnitude is regulated by load 12 (~ 0.4 N). The OF rotation around the fiber axis is provided by rotating mechanism 13, on the platform of which the second end of the fiber is fixed with optical glue 10 (the length of the elastically twisted fiber segment is z). Radiation supplied from the OF output passes analyzer 14 and is registered with photodiode 15. The modulated photocurrent is supplied to synchronous amplifier 16, the signal value is recorded with computer 17.

The phase delay Rtd is determined by the formula:

$$\cos Rtd = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}), \quad (5)$$

where I_{max} , I_{min} are the intensities of radiation received by the rotation of analyzer 14, characterizing ellipticity of light output in the absence of dichroism fibers.

As shown in [25], the general formula for the phase delay Rtd , applicable to all types of birefringence fibers, is:

$$\sin Rtd = \frac{\Delta\beta}{2} \cdot \frac{(\xi + \gamma/2)(1 - \cos 2\Omega z) \cos 2\alpha - \Omega \cdot \sin 2\Omega z \cdot \sin 2\alpha}{\Omega^2}, \quad (6)$$

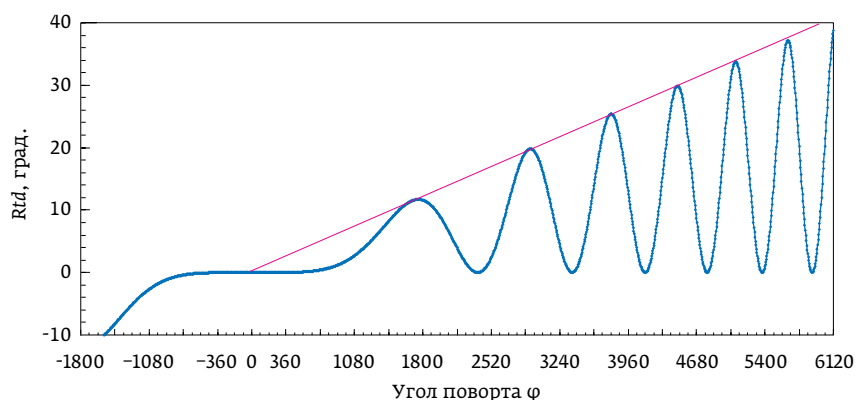


Рис. 5. Типичный график зависимости фазовой задержки Rtd от угла упругого кручения φ для HiBi-волокна при азимутальном угле $\alpha = 0$

Fig.5. Typical plot of the phase delay Rtd as a function of the angle of elastic twisting φ for HiBi-fiber at azimuthal angle $\alpha = 0$



на входе свет поляризован вдоль одной из осей ДЛП волокна. Отсчитывая от этого положения поляризатора 5, можно получить любое требуемое значение азимутального угла α . Дальнейшие методики измерений отличаются для различных двулучепреломляющих волокон: HiBi-, LoBi- и spun-волокон.

3.2. HiBi-волокна

Для применения методики к HiBi-волокнам нужно модифицировать формулу (6). Эти волокна вытягивают без вращения заготовки, следовательно, $\xi_0=0$. Поэтому в выражении для новой пространственной частоты Ω величина $\Delta\beta/2$ становится существенно больше второго члена:

$$\Delta\beta/2 \gg \xi + (\gamma/2) = [1 + (1/2\mu)] \cdot (\varphi/z), \tag{9}$$

действительно, $\Delta\beta \sim 2\pi/(2 \div 10 \text{ мм})$, а $\varphi/z \sim N \cdot 2\pi/(1 \text{ м})$, что даже при 10 оборотах упругого кручения удовлетворяет условию (9). Кроме того, для соблюдения условия (9) мы всегда можем увеличить длину z измеряемого волокна. С точностью до членов второго порядка малости пространственная частота $\Omega \approx \Delta\beta/2$. Далее выберем азимутальный угол $\alpha=0$. Выражение (6) упростится:

where: $\Delta\beta=2\pi/L_b$ is slew rate of the phase delay with a length z of fiber between the waves of orthogonal linear polarizations of embedded linear birefringence with the beat length L_b ;

$\gamma_0=2\pi/L_c$ is similarly, the rate of increase of the phase delay between the waves of orthogonal circular polarizations due to a circular birefringence with the beat length L_c ;

$\xi_0=2\pi/L_{tw}$ is angular velocity of the axes of the embedded linear birefringence in the helical structure with a spiral pitch L_{tw} ;

$\xi=\xi_0 \pm \varphi/z$; $\pm\varphi$ is the angle of elastic twisting of a fiber sample with length z (the sign is chosen with respect to the twisting direction in the spiral structure);

$\gamma=\varphi/\mu z$ is considered circular birefringence that occurs with elastic twisting of the fiber around its axis [26], $\mu=6,85$;

α is the azimuth angle of the input polarization state;

$$\Omega = \sqrt{(\Delta\beta/2)^2 + [\xi + (\gamma/2)]^2}, \tag{7}$$

Ω is spatial frequency.

$$\sin Rtd = (L_b / \pi) \cdot (1 - \cos 2\Omega z) \cdot [1 + (1/2\mu)] \cdot (\varphi / z).$$

Функция $\sin Rtd$ линейно зависит от угла кручения φ . На рис. 5 приведен график зависимости $Rtd(\varphi)$ вычисленный по точной формуле (6). Видно, что максимумы колебаний, обусловленные выражением $1 - \cos 2\Omega z$, лежат на одной прямой.

Тангенс угла наклона $\text{tg}\delta$ прямой, проходящей через максимумы $Rtd_{\max}(\varphi)$, позволяет определить длину биений линейного ДЛП встроенного в HiBi-волокно:

$$\text{tg}\delta = Rtd_{\max}(\varphi) / \varphi = [1 + (1/2\mu)] \cdot L_b / (\pi z).$$

Методика измерений следующая. HiBi-волокно закрепляют на установке (рис. 4) и фиксируют оптическим клеем. Вводят растягивающую нагрузку $\sim 0,3 \div 0,5$ Н. Перед вращением определяют по п. 3.1 положение азимутального угла $\alpha = 0$. Это соответствует случаю $\cos Rtd = 1$, $Rtd = 0$. Начинают вращение волокна вокруг оси с шагом $10^\circ \div 20^\circ$. Не меняя положения входного поляризатора и поворачивая анализатор 14, определяют по принимаемому фотодетектором сигналу величины I_{\max} и I_{\min} и по формуле (5) определяют фазовую задержку Rtd . Строят график типа рис. 5. По обнаруженным максимумам проводят прямую линию, по наклону которой, зная длину измеряемого волокна, получают длину биений L_b встроенного в HiBi-волокно ДЛП.

3.3. Spun-волокна

Формула (6) была выведена для spun-волокон [25]. По сравнению с формулой для HiBi-волокон она учитывает вращение осей ДЛП, образующих спиральную структуру: $\xi = \xi_0 + \varphi / z$; $\xi_0 = 2\pi / L_{tw}$. Причем шаг спиральной структуры обычно короткий $L_{tw} \sim 3 \div 4$ мм, а длина биений встроенного ДЛП в $3 \div 4$ раза больше. Таким образом, скорость пространственного вращения ξ_0 превышает не только скорость кручения волокна вдоль оси, но и скорость нарастания фазовой задержки ортогональных линейно поляризованных волн $\Delta\beta$. Поэтому упругое кручение добавляется к (или вычитается из) вращению осей ДЛП, полученному при вытяжке волокна как малая добавка. Этим обусловлено сравнительно простое поведение измеряемой фазовой задержки у spun-волокна. Как видно из рис. 6, при любом значении азимутального угла α функция $Rtd(\varphi)$ представляет собой синусоиду одной и той же амплитуды, но с добавлением изменяющейся постоянной составляющей. Измеряя амплитуду синусоиды от пика до пика, получаем возможность

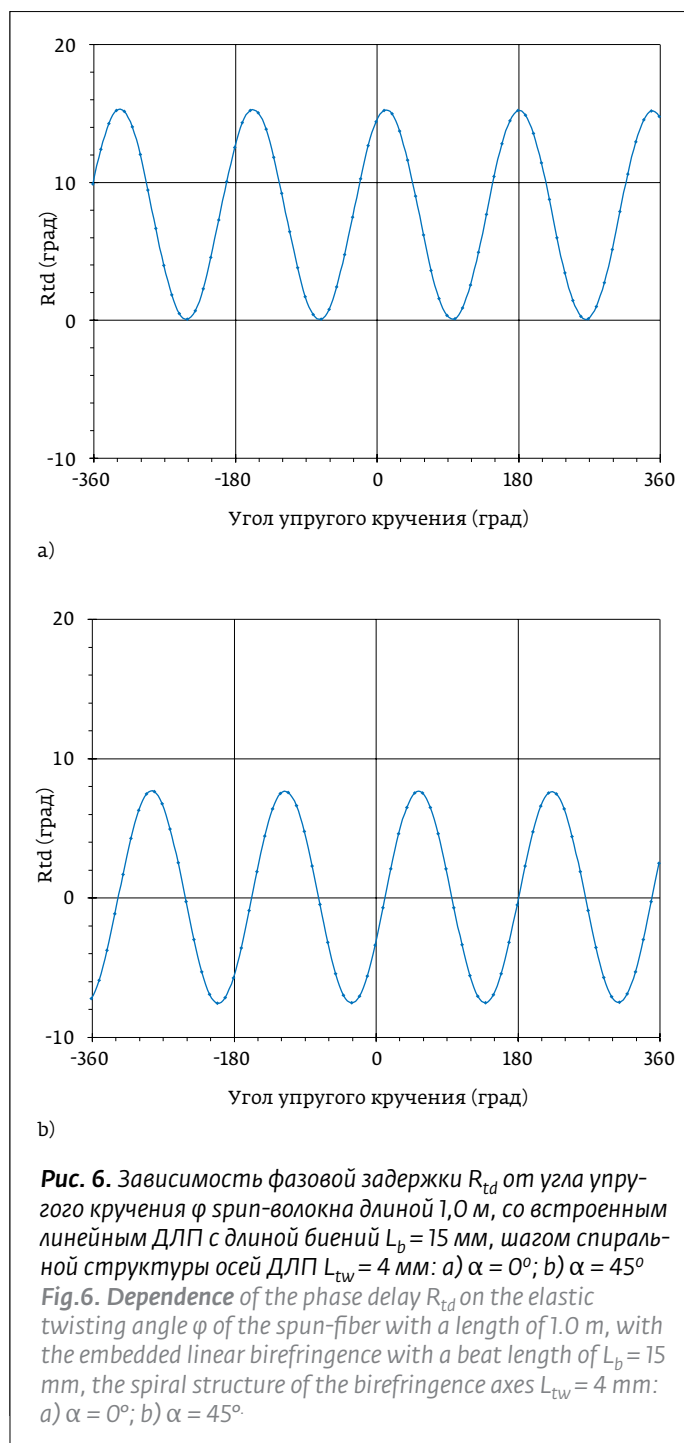
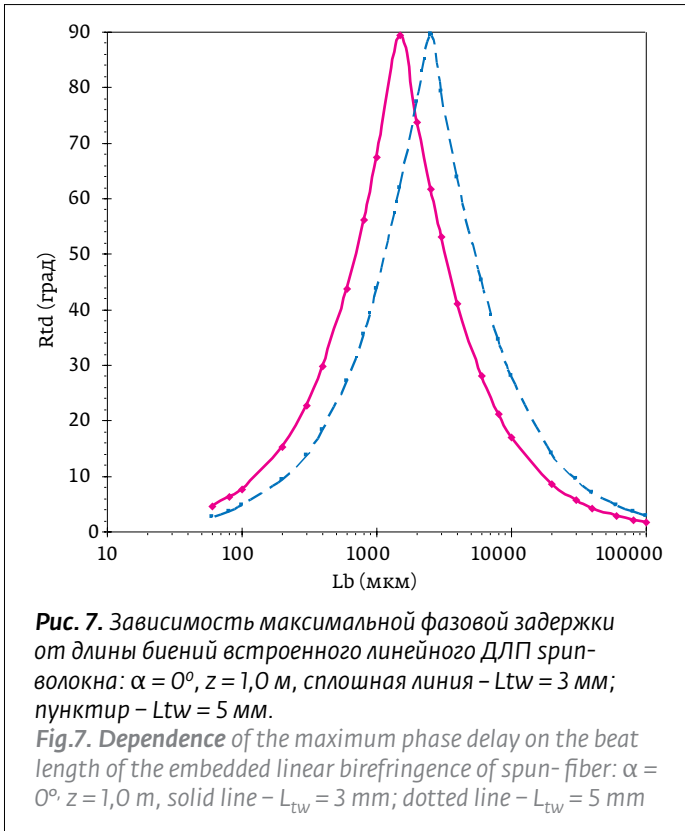


Рис. 6. Зависимость фазовой задержки Rtd от угла упругого кручения φ spun-волокна длиной 1,0 м, со встроенным линейным ДЛП с длиной биений $L_b = 15$ мм, шагом спиральной структуры осей ДЛП $L_{tw} = 4$ мм: а) $\alpha = 0^\circ$; б) $\alpha = 45^\circ$
Fig.6. Dependence of the phase delay Rtd on the elastic twisting angle φ of the spun-fiber with a length of 1.0 m, with the embedded linear birefringence with a beat length of $L_b = 15$ mm, the spiral structure of the birefringence axes $L_{tw} = 4$ mm: а) $\alpha = 0^\circ$; б) $\alpha = 45^\circ$.

As can be seen from formula (7), the elastic twisting angle φ enters the spatial frequency Ω and provides periodic variation of the phase delay Rtd in the process of elastic twisting. Moreover, as shown by Rashley [26], elastic twisting causes a weak circular birefringence:

$$\gamma = \varphi / (\mu z), \tag{8}$$



where $\mu = 6.85$ for quartz fibers. Physically, this means that in the fiber with length z circular birefringence beat length $L_c = z$ can be obtained, only making in the fiber length L_c of about 7 turns around its axis. As the experiment [25] shows, the effect of the circular birefringence induced by twisting becomes noticeable starting from ~20 turns around the fiber axis at a specimen length $z = 1$ m. Formulas (5) – (8) are derived for monochromatic light, so the beat length here is phase.

The measurement procedure is as follows. By rotating input polarizer 5, an arbitrary angle α is set with respect to the axes of the birefringence of the studied fiber. Rotation of analyzer 14 produces the maximum I_{max} and minimum I_{min} values of the intensities of the elliptical polarization at the fiber output. Calculations are made using formula (5) $\cos Rtd$. Then, input polarizer 5 is rotated by a small angle and using analyzer 14 an attempt is made to obtain the maximum value $\cos Rtd$. When the value of $\cos Rtd \sim 1$ is reached, it can be argued that the azimuth angle is $\alpha = 0$, i.e., at the input, light is polarized along one of the fiber birefringence axes. By counting from this position of polarizer 5, any desired value of the azimuth angle α can be obtained.

определить длину биений L_b встроенного в spun-волокно линейного ДЛП. Действительно, из формулы (6) в интервале первых нескольких оборотов упругого кручения (можно пренебречь членами с φ/z) при азимутальном угле $\alpha=0^\circ$ следует:

$$\sin Rtd \approx \frac{\xi_0 \cdot (\Delta\beta/2)}{(\Delta\beta/2)^2 + \xi_0^2} (1 - \cos 2\Omega z), \quad (10)$$

а при азимутальном угле $\alpha=45^\circ$:

$$\sin Rtd \approx \frac{\xi_0 \cdot (\Delta\beta/2)}{(\Delta\beta/2)^2 + \xi_0^2} \left[1 + \frac{(\Delta\beta/2)^2}{2\xi_0^2} \right] \cdot \sin 2\Omega z.$$

Как было сказано, у spun-волокон шаг спиральной структуры L_{tw} в 3-4 раза меньше длины биений L_b встроенного ДЛП, поэтому вторым членом в прямых скобках можно пренебречь, и коэффициенты при гармонических членах становятся равными. В эксперименте разница в амплитудах при различных азимутальных углах α практически не наблюдается [25]. Для удобства измерений желательнее иметь теоретическую зависимость максимального значения Rtd_{max} при $\alpha=0^\circ$ от длины биений L_b , вычисленную по формуле (6) для известного значения шага L_{tw} спиральной структуры. График этой зависимости приведен на рис. 7 (сплошная линия) для $L_{tw}=3$ мм, $z=1$ м. Видно, что функция $Rtd_{max}(L_b)$ неоднозначна, и требуется дополнительная информация для точного определения фазовой длины биений (например из спектрального метода измерений, см. выше). Неоднозначность можно исключить также, если имеется в наличии волокно с другим шагом кручения L_{tw} , например, с меньшей скоростью вращения, но вытянутое из той же самой заготовки. На рис. 7 приведена также зависимость $Rtd_{max}(L_b)$ для $L_{tw}=5$ мм (пунктир). Видно, что для больших значений L_b (правая часть графика) происходит увеличение значений $Rtd_{max}(L_b)$ при переходе от $L_{tw}=3$ мм, к $L_{tw}=5$ мм, тогда как для малых значений L_b (левая часть графика) происходит уменьшение этих значений. Таким образом, по отношению $Rtd_{max}(L_b)$ для двух волокон можно исключить неоднозначность графика.

Методика измерений следующая. Spun-волокно помещают на установку (рис. 4) и фиксируют оптическим клеем. Вводят растягивающую нагрузку $\sim 0,3 \div 0,5$ Н. Перед вращением определяют по п. 3.1 положение азимутального угла $\alpha=0$. Это соответствует случаю $\cos Rtd=1$, $Rtd=0$. Начинают вращать волокно вокруг оси с шагом $10^\circ \div 20^\circ$, не меняя положения входного поляризатора и поворачивая анализа-

Further measurement procedures differ for different birefringence fibers: HiBi-, LoBi- and spun- fibers.

3.2. HiBi- fiber

For application of the method to HiBi-fibers it is necessary to modify formula (6). These fibers are drawn without rotation of the workpiece, therefore, $\xi_0=0$. Therefore, in the expression for the new spatial frequency Ω , $\Delta\beta/2$ becomes significantly larger than the second component:

$$\Delta\beta/2 \gg \xi + (\gamma/2) = [1 + (1/2\mu)] \cdot (\varphi/z), \quad (9)$$

indeed, $\Delta\beta \sim 2\pi/(2 \div 10$ mm), and $\varphi/z \sim N \cdot 2\pi/(1$ m), which even at 10 turns of the elastic correction satisfies condition (9). Furthermore, to satisfy condition (9), we can always increase the length z of the measured fiber. Up to components of the second order of smallness, the spatial frequency $\Omega \approx \Delta\beta/2$. Next, we choose the azimuth angle $\alpha=0$. The expression (6) is simplified:

$$\sin Rtd = (L_b / \pi) \cdot (1 - \cos 2\Omega z) \cdot [1 + (1/2\mu)] \cdot (\varphi/z).$$

The function $\sin Rtd$ linearly depends on the twisting angle φ . Fig. 5 shows plot of dependence $Rtd(\varphi)$ calculated by accurate formula (6). It can be seen that the maximum of the oscillations due to the expression $1 - \cos 2\Omega z$ lie on one straight line.

The tangent of the slope angle $\text{tg}\delta$ of the straight line passing through the maxima $Rtd_{max}(\varphi)$ makes it possible to determine the beat length of a linear birefringence embedded into the HiBi-fiber:

$$\text{tg}\delta = Rtd_{max}(\varphi) / \varphi = [1 + (1/2\mu)] \cdot L_b / (\pi z).$$

The measurement procedure is as follows. The HiBi- fiber is installed on the setting (Figure 4) and is fixed with optical adhesive. Tensile load of $\sim 0.3 \div 0.5$ N is applied. Before rotation, the position of the azimuth angle $\alpha=0$ is determined as in 3.1. This corresponds to the case $\cos Rtd=1$, $Rtd=0$. The fiber is rotated around its axis with a pitch of $10^\circ \div 20^\circ$. Without changing the position of the input polarizer and by rotating analyzer 14, the values I_{max} and I_{min} are determined according to the signal received by the photodetector and according to formula (5) the phase delay Rtd is determined. The graph such as shown in Fig. 5 is plotted. According to the detected maxima a straight line is plotted, the slope of which, knowing the length of the measured fiber, is used to obtain beat length L_b of the birefringence embedded in HiBi-fiber.



тор 14, определяют по принимаемому фотодетектором сигналу величины I_{max} и I_{min} и по формуле (6,10) определяют фазовую задержку Rtd . Строят график типа рис.6. По амплитуде колебаний от пика до пика получают значение Rtd_{max} . По теоретической зависимости типа рис. 7 определяют длину биений L_b .

3.4. LoBi-волокна

Методика измерений аналогичная п. 3.3 для spun-волокон. Поскольку первоначально ожидалось, что LoBi-волокна могут иметь очень большие длины биений ($L_b \sim 1$ м), то следует оценить возможность измерения максимального значения длины биений методом упругого кручения. Отношение сигнал/шум в нашей схеме синхронного детектирования не превышало $S/N=5 \cdot 10^5$. Максимальное отношение I_{max}/I_{min} ограничивается отношением сигнал шум $I_{max}/I_{min} \leq S/N$. Подставляя в формулу (5) получим минимальное значение фазовой задержки $Rtd_{min}=0,6^\circ$, что соответствует $L_b \sim 300$ мм. Впрочем, большая чувствительность пока не понадобилась.

Исследования LoBi-волокон показывают [24], что фазовая задержка Rtd , измеренная без упругого кручения, составляет $Rtd \approx 2^\circ \div 4^\circ$ для многих фирм, тщательно исключавших причины возникновения паразитных двулучепреломлений. $Rtd_{max} \approx 2^\circ$, согласно формуле (6), соответствует длине биений $L_b \approx 80$ мм и $\cos Rtd = 0,9994$. Таким образом, можно утверждать, что в процессе вытяжки LoBi-волокна приобретают значительное встроенное линейное ДЛП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены физические основы и области применимости двух основных методов измерения встроенного ДЛП волоконных световодов: спектрального метода и метода упругого кручения. Показано приложение этих методов к трем типам ВС: ВС, сохраняющие линейную поляризацию (HiBi-волокна); ВС, сохраняющие направление вращения вектора электрического поля (spun-волокна); и ВС с вращением заготовки, в которой минимизируются искусственные ДЛП (LoBi-волокна). Подробно описана методика измерений длины биений встроенного ДЛП. Отмечены области применимости рассмотренных методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **V. Ramaswamy and W. G. French.** Influence of noncircular core on the polarization performance of single-mode fibers. – Electron. Lett., 1978, v. 14, № 5, p. 143–144.
2. **R. B. Dyott, J. R. Cozens, and D. G. Morris.** Preservation of polarization in optical-fiber waveguides with elliptical cores. – Electron. Lett., 1979, v. 15, № 13, p. 380–382
3. **V. Ramaswamy, I. P. Kaminow, P. Kaiser, and W. G. French.** Single polarization optical fibers: Exposed cladding technique. – Appl. Phys. Lett., 1978, v. 33, № 9, p. 814–816.

3.3. Spun-fiber

Formula (6) was derived for spun-fibers [25]. Compared with the formula for HiBi-fibers, it takes into account the rotation of the axes of the birefringence forming a spiral structure: $\xi = \xi_0 + \varphi/z$; $\xi_0 = 2\pi/L_{tw}$. Moreover, the pitch of the spiral structure is usually short $L_{tw} \sim 3 \div 4$ mm, and the beat length of the embedded birefringence is 3 ÷ 4 times larger. Thus, the speed of spatial rotation ξ_0 exceeds not only the fiber twisting speed along the axis, but also the rate of phase delay rise of orthogonal linearly polarized waves $\Delta\beta$. Therefore, the elastic twisting is added to (or subtracted from) the rotation axes of birefringence obtained when drawing fibers, as a small additive. This is the reason for the relatively simple behavior of the measured phase delay in the spun-fiber. As can be seen from Fig. 6, with any value of the azimuth angle α function $Rtd(\varphi)$ represents a sine wave of the same amplitude but with the addition of varying constant component. By measuring the amplitude of the sinusoid from peak to peak, we can determine the beat length L_b embedded into the spun-fiber of the linear birefringence. Indeed, it follows from formula (6) in the interval of the first turns of elastic twisting (one can neglect the components with ϕ/z) at the azimuthal angle $\alpha = 0^\circ$:

$$\sin Rtd \approx \frac{\xi_0 \cdot (\Delta\beta/2)}{(\Delta\beta/2)^2 + \xi_0^2} (1 - \cos 2\Omega z), \quad (10)$$

and at an azimuth angle $\alpha = 45^\circ$:

$$\sin Rtd \approx \frac{\xi_0 \cdot (\Delta\beta/2)}{(\Delta\beta/2)^2 + \xi_0^2} \left[1 + \frac{(\Delta\beta/2)^2}{2\xi_0^2} \right] \cdot \sin 2\Omega z.$$

As has been said, the pitch of helical structure L_{tw} of the spun-fibers is 3–4 times less than the beat length L_b of the embedded birefringence, so the second component may be neglected in the square brackets, and the coefficients of the harmonic components become equal. In the experiment, the difference in amplitudes for various azimuthal angles α is practically not observed [25]. For the convenience of measurements, it is desirable to have a theoretical dependence of the maximum value of Rtd_{max} at $\alpha = 0^\circ$ from the beat length L_b , calculated from (6) for the known value of the spiral structure pitch L_{tw} . The plot of this dependency is given in Fig. 7 (solid line) for $L_{tw} = 3$, $z = 1$ m. It can be seen that the function $Rtd_{max}(L_b)$ is ambiguous, and additional information is required to accurately determine

4. **R. H. Stolen, V. Ramaswamy, P. Kaiser, and W. Pliebel.** Linear polarization in birefringent single-mode fibers. – Appl. Phys. Lett., 1978, v. 33, № 8, p. 699–701.
5. **I. P. Kaminow, J. R. Simpson, H. M. Presby, and J. B. Mac-Chesney.** Strain birefringence in single-polarization germanosilicate optical fibers. – Electron. Lett., 1979, v. 15, № 21, p. 677–679
6. **T. Hosaka, K. Okamoto, T. Miya, Y. Sasaki, and T. Edahiro.** Low-loss single-polarization fibers with asymmetrical strain birefringence. – Electron Lett., 1981, v. 17, № 15, p. 530–531.
7. **M. P. Varnham, D. N. Payne, R. D. Birch, and E. J. Tarbox.** Single-polarization operation of highly birefringent bow-tie optical fibers. – Electron Lett., 1983, v. 19, № 7, p. 246–247.
8. **S. R. Norman, D. N. Payne, M. J. Adams, and A. M. Smith.** Fabrication of single-mode fibers exhibiting extremely low polarization birefringence. – Electron Lett., 1979, v. 15, № 11, p. 309–311.
9. **A. J. Barlow, D. N. Payne, M. R. Hadley, and R. J. Mansfield.** Production of single-mode fibers with negligible intrinsic birefringence and polarization-mode dispersion. – Electron Lett., 1981, v. 17, № 20, p. 725–726.
10. **D. N. Payne, A. J. Barlow, and J. J. R. Hansen.** Development of low- and high-birefringence optical fibers. – IEEE J. Quantum Electron., 1982, v. QE-18, № 4, p. 477–488.
11. **A. J. Barlow and D. N. Payne.** Polarization maintenance in circularly birefringent fibers. – Electron Lett., 1981, v. 17, № 11, p. 388–389.
12. **A. J. Barlow, J. J. Ramkov-Hansen, and D. N. Payne.** Birefringence and polarization-mode dispersion in spun single-mode fibers. – Appl. Opt., 1981, v. 20, № 17, p. 2962–2968.
13. **A. J. Barlow, J. J. Ramkov-Hansen, and D. N. Payne.** Anisotropy in spun single-mode fibers. – Electron Lett., 1982, v. 18, № 5, p. 200–202.
14. **С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин.** Физическая оптика. – М., Изд-во Московского университета, 1998.
15. **B. Y. Kim, and S. S. Choi.** Analysis and measurement of birefringence in single-mode fibers using the backscattering method. – Opt. Lett., 1981, v. 6, № 11, p. 578–580.
16. **M. Monerie and P. Lamouler.** Birefringence measurement in twisted single-mode fiber. – Electron. Lett., 1981, v. 17, № 7, p. 252–253.
17. **M. Nakazawa, T. Horiguchi, M. Tokuda, and N. Uchida.** Polarization beat length measurement in a single-mode optical fiber by backward Rayleigh scattering. – Electron. Lett., 1981, v. 17, № 15, p. 513–515.
18. **J. N. Ross.** Birefringence measurement in optical fibers by polarization optical-time-domain reflectometry. – Appl. Opt., 1982, v. 21, № 19, p. 3489–3495.
19. **П. И. Гнусин, С. А. Васильев, О. И. Медведков, Я. В. Пржиляковский.** Брэгговские решётки в волоконных световодах типа Spun. – Фотон-экспресс, 2015, № 6(126), с. 178–179.
20. **K. Kikuchi and T. Okoshi.** Wavelength-sweeping technique for measuring the beat length of linearly birefringent optical fibers. – Opt. Lett., 1983, v. 8, № 2, p. 122–123.
21. **S. C. Rashleigh.** Measurement of fiber birefringence by wavelength scanning: Effect of dispersion. – Opt. Lett., 1983, v. 8, № 6, p. 336–338.
22. **С. К. Моршнеv, В. П. Губин, Я. В. Пржиляковский, Н. И. Старостин.** Температурные зависимости фазового и группового двойных лучепреломлений в spun-волокнах. – Квантовая электроника, 2013, т. 43, № 12, с. 1143–1148.
S. K. Morshnev, V. P. Gubin, YA. V. Przhilyakovskij, N. I. Starostin. Temperaturnye zavisimosti fazovogo i gruppovogo dvoynnykh lucheprelomlenij v spun-voлокнах. – Kvantovaya ehlektronika, 2013, t. 43, № 12, p. 1143–1148.
23. **S. K. Morshnev, M. V. Ryabko, Y. K. Charmorovskii.** Measuring of an embedded linear birefringence in Spun optical fibers. – Proc. SPIE "Lasers for measurements and Information Transfer", 2007, v. 6594, 6594OR.

the phase beat length (e. g., based on the spectral measurement method, see above). Ambiguity can also be eliminated if there is a fiber with a different twisting pitch L_{tw} , e. g., with a lower speed, but it is drawn from the same very workpiece. Figure 7 also shows dependence $Rtd_{max}(L_b)$ for $L_{tw}=5$ mm (dotted line). It is seen that for large values of L_b (right side of the plot), the values of $Rtd_{max}(L_b)$ increase with a transition from $L_{tw}=3$ mm, to $L_{tw}=5$ mm, whereas for small values L_b (the left part of the plot), these values decrease. Thus, with respect to $Rtd_{max}(L_b)$ for two fibers, one cannot eliminate the ambiguity of the plot.

The measurement procedure is as follows. A spun-fiber is placed on the machine (Figure 4) and is fixed with optical adhesive. The tensile load $\sim 0,3 \div 0,5$ N is applied. Before rotation, the position of the azimuth angle $\alpha=0$ is determined in accordance with 3.1. This corresponds to the case $\cos \cos Rtd=1$, $Rtd=0$. The fiber is rotated around its axis with a pitch of of $10^\circ \div 20^\circ$. Without changing the position of the input polarizer, and by rotating analyzer 14, the values I_{max} and I_{min} are determined according to the signal received by the photodetector and according to formula (6, 10) the phase delay Rtd is determined. A graph such is shown in Fig. 7 is plotted. The amplitude of the oscillations from peak to peak is used to obtain the value Rtd_{max} . According to the theoretical dependence such as shown in Fig. 7 the beat length L_b is determined.

3.4. LoBi-fibers

The measurement procedure is the same as in 3.3 for spun-fibers. Since at first it was expected that LoBi-fibers can have very large beat lengths ($L_b \sim 1$ m), it is necessary to evaluate the possibility of measuring the maximum value of the beat length by elastic twisting. The signal-to-noise ratio in our synchronous detection scheme did not exceed $S/N=5 \cdot 10^5$. The maximum ratio of I_{max}/I_{min} is limited by signal to noise ratio $I_{max}/I_{min} \leq S/N$. Substituting in formula (5), we obtain the minimum value of phase delay $Rtd_{min}=0,6^\circ$. which corresponds to $L_b \sim 300$ mm. However, a great sensitivity was not needed.

Studies of LoBi-fibers show [24] that the phase delay Rtd , measured without elastic twisting, is $Rtd \approx 2^\circ \div 4^\circ$ for many companies that carefully excluded the causes of parasitic birefringence. $Rtd_{max} \approx 2^\circ$, according to formula (6), corresponds to the beat length $L_b \approx 80$ mm and $\cos Rtd=0,9994$. Thus, it can be argued that during the drawing process, LoBi-fibers acquire a significant embedded linear birefringence.



24. **В. А. Аксенов, Г. А. Иванов, С. К. Моршнева, Ю. К. Чаморовский.** Поляризационные одномодовые волоконные световоды. – Сборник трудов 13-й международной научной конференции "ММТТ-2000", С.-Петербург, 2000, т. 7, с. 53.
V. A. Aksenov, G. A. Ivanov, S. K. Morshnev, YU. K. Chamorovskij. Poljarizacionnye odnomodovye volokonnnye svetovody. – Sbornik trudov 13-j mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "ММТТ-2000", S.-Peterburg, 2000, t. 7, p. 53.
25. **С. К. Моршнева, Ю. К. Чаморовский, И. Л. Воробьев.** Фазовая задержка поляризационных мод в упруго закрученных спун-волоконнах. – Квантовая электроника, 2011, т. 41, № 5, с. 469–474.
S. K. Morshnev, YU. K. Chamorovskij, I. L. Vorob'ev. Fazovaya zaderzhka polarizacionnyh mod v uprugozakruchennyh spun-volokonnah. – Kvantovaya ehlektronika, 2011, t. 41, № 5, p. 469–474.
26. **S. C. Rashleigh.** Origins and control of polarization effects in single-mode fibers. – J. Lightwave Technol., 1983, v. LF-1, № 2, p. 312–331.

CONCLUSION

Physical bases and areas of applicability of two basic methods for measuring the embedded birefringence of optical fibers are considered: the spectral method and the elastic twisting method. The application of these methods to three OF types has been demonstrated: OFs maintaining linear polarization (HiBi-fibers), OFs maintaining the direction of rotation of the electric field vector (spun-fibers), and OFs with the rotation of the workpiece, in which artificial birefringence is minimized (LoBi-fibers). The technique of measuring the beat length of the embedded birefringence is described in detail. Areas of applicability of the methods are considered.

МАГНИТНАЯ МИКРОФЛЮИДИКА

В последние два года появилось несколько обзоров по новой дисциплине, находящейся на стыке биотехнологий, микроэлектроники и физики магнитных явлений – магнитной микрофлюидики. Микрофлюидика или технология "lab on chip" (микробиологическая лаборатория, уместающаяся на одной микросхеме) стала побочным продуктом развития фотолитографических методов, позволяющих протравливать в кристалле сложные структуры. Только в случае микрофлюидики вместо проводов в чипе образуется разветвленная система микроканалов, а в роли элементов микроэлектроники выступают микрореакторы. Микрофлюидика имеет ряд особенностей, которые отличают ее от традиционной химии:

- большая удельная поверхность микрофлюидных систем: решение проблемы теплоотвода и поддержания температурного режима;
- малые числа Рейнольдса: простой расчет движения жидкости, характеризующегося ламинарным течением;
- доминирование капиллярных сил над гравитационными: не требуются мощные насосы, нет проблемы неравномерного распределения компонент по высоте.

Использование магнитных жидкостей дополнительно расширяет инструментарий микрофлюидики за счет введения функций управления с помощью магнитных полей от постоянных магнитов и проводов, легко интегрируемых в микрофлюидные чипы.

По материалам А. Пятаков, Бюл. МАГО, т. 19, № 19, № 3

ГРАФЕН ДЛЯ СПИНТРОНИКИ

Графен знаменит своими уникальными транспортными свойствами, но вот его магнитные характеристики не очень выразительны. Действительно, для использования графена в качестве канала спинового транзистора, в котором под влиянием электрического поля управляющего электрода (затвора) происходит прецессия спина пролетающих электронов, требуется достаточно сильное спин-орбитальное взаимодействие. Это взаимодействие является сильным в полупроводниках группы АІІІВ благодаря эффекту Рашбы, предсказанному еще в 1960 году [Э. И. Рашба, ФТТ, 1960, 2, 1224]. Основой эффекта является существование взаимодействия зоны проводимости и валентной зоны в этих полупроводниках. Благодаря эффекту Рашбы спин-орбитальное взаимодействие в этих полупроводниках оказывается на пять порядков величины больше, чем то, что можно было бы рассчитать обычным образом (в однозонной модели). Это и позволило рассматривать материалы АІІІВ в качестве рабочих материалов канала спиновых транзисторов. Однако, на практике выяснилось, что и в них спин-орбитальное взаимодействие все-таки не достаточно сильное.

Раз графен лишен ярких магнитных свойств, можно попробовать их "привить", т. е. ввести графен в контакт с магнитным материалом, а именно, изолятором, для устранения шунтирования тока. В каче-

стве такого магнитного изолятора можно использовать пленку оксида европия (EuO) – материала, в котором образуются магнитные поляроны. Это и было проделано группой В. Г. Сторчака из Курчатовского института в работе [D. V. Averyanov et al. ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2018, 10, 20767], выполненной в рамках гранта Российского научного фонда. Надо отметить, что группа давно и успешно исследует магнитные поляроны методами мюонной спиновой релаксации в различных материалах – металлах, полупроводниках и изоляторах. Существование магнитных поляронов было предсказано Э. Л. Нагаевым в 1967 году. Затем они активно исследовались в различных материалах. Однако в последние годы в этой области наступило некоторое затишье, и соответствующие экспериментальные работы были возобновлены именно группой В. Г. Сторчака. Магнитный полярон фактически является облаком ферромагнитной фазы атомов Eu, окружающим электрон. При этом вся среда является спиново разупорядоченной. Ферромагнитное (спиново упорядоченное) состояние образуется в результате обменного взаимодействия электрона с атомами Eu. Магнитные поляроны открывают очень интересные возможности в спинтронике.

По материалам В. Вьюрков, Перст, 2018, т. 25, вып. 13 / 16.