

Использование волоконных световодов типа *Spun*

в датчиках тока

В.П.Губин, В.А.Исаев, С.К.Моршнев, А.И.Сазонов,
Н.И.Старостин, Ю.К.Чаморовский, А.И.Усов

*Изучены поляризационные свойства волоконного световода типа *Spun* с точки зрения их применения в волоконно-оптических датчиках тока на основе эффекта Фарадея. Предложена модель этого световода, представляющая его в виде анизотропной среды со спиральной структурой быстрых и медленных осей двулучепреломления. Разработан датчик на основе цельноволокнистого низкокогерентного линейного интерферометра с пороговой чувствительностью $70 \text{ мА}/\text{Гц}^{1/2}$, максимальным измеряемым током 3000 А и повторяемостью масштабного коэффициента $\pm 0.6\%$. Установлено, что при заданном диаметре волоконного контура нормированная чувствительность не зависит от длины световода. Экспериментальные результаты подтверждают теорию.*

Ключевые слова: волоконный световод, эффект Фарадея, датчик тока.

1. Введение

Неослабевающий интерес к волоконно-оптическим датчикам тока (ВОДТ) на основе эффекта Фарадея в волоконном световоде (ВС) в качестве чувствительного элемента [1–3] связан с высокими потенциальными возможностями этих устройств. Естественная развязка от напряжения сети, отсутствие наводок, большое быстродействие и высокая точность измерений, малые размеры и вес – вот далеко не полный перечень преимуществ ВОДТ по сравнению с традиционными датчиками тока.

Обычные ВС, используемые в линиях связи, не могут применяться в чувствительных элементах ВОДТ из-за своего внутреннего двулучепреломления (ДЛП), случайного вдоль длины ВС как по величине, так и по направлению осей. В настоящее время в ВОДТ используют различные типы специальных ВС, например ВС с низким ДЛП (типа *LoBi*), при этом для компенсации наведенного упругим изгибом линейного ДЛП применяют либо упругое кручение вокруг оси ВС [4], либо отжиг при высокой температуре чувствительного элемента после его намотки [3]. Весьма перспективными являются также ВС типа *Spun*, которые получают при вытяжке волокна из вращающейся заготовки, имеющей сильное внутреннее линейное ДЛП [1].

ВС типа *Spun* используют уже около 15 лет [1, 5, 6], однако до сих пор нет однозначного толкования свойств данных световодов и механизмов, ограничивающих область их применения, в частности имеются серьезные расхождения в методах и даже идеологии интерпретации полученных результатов [1, 6].

Заготовка для ВС типа *Spun* аналогична заготовке для ВС с сильным линейным ДЛП (типа *NiBi*), но при

вытяжке она вращается, что приводит в области размягчения материала заготовки к монотонному повороту слоев стекла относительно друг друга в плоскости, перпендикулярной оси ВС. Естественно предположить, что быстрая и медленная оси линейного внутреннего ДЛП «замораживаются» в процессе вытяжки в виде спирали с шагом, определяемым периодом вращения заготовки и скоростью вытяжки. В отличие от [1] упругие натяжения, вызывающие заметное циркулярное ДЛП, не «замораживаются» при вытяжке. Так, например, ВС типа *LoBi*, изготавливаемые по аналогичной технологии, не проявляют свойств циркулярного ДЛП [7, 8] при наличии спиральной структуры.

В настоящей работе мы анализируем свойства ВС типа *Spun* с точки зрения их применимости в ВОДТ на основе формализма дифференциальной матрицы Джонса и представления этого ВС в виде анизотропной среды со спиральной структурой быстрых и медленных осей линейного ДЛП. Существование такой структуры позволило нам ранее объяснить ряд свойств ВС типа *LoBi* с низким ДЛП [7]. Заметим, что в работах [1, 9], где анализируется волокно типа *Spun*, дифференциальные матрицы не использовались, тогда как в [6] для интерпретации результатов применялась именно дифференциальная матрица в базисе линейных поляризаций. Нами были проведены экспериментальные исследования применимости ВС типа *Spun* в качестве чувствительного элемента ВОДТ и получены результаты, подтверждающие справедливость предлагаемой модели.

Для исследований был выбран подход, основанный на том, что ортогональные циркулярно поляризованные световые волны при распространении по кварцевому световоду в продольном магнитном поле приобретают фарадеевский фазовый сдвиг. Величина этого сдвига $\Delta\varphi_F = 2VB_zL$, где V – постоянная Верде для материала сердцевины ВС; B_z – продольная составляющая магнитного поля; L – длина световода. Если оптический световод уложен в виде замкнутого витка, внутри которого находится проводник с током, то $\Delta\varphi_F = 2VN_0J$, где N_0 – число витков; J – ток, протекающий через проводник. Рассмат-

В.П.Губин, В.А.Исаев, С.К.Моршнев, А.И.Сазонов, Н.И.Старостин, Ю.К.Чаморовский, А.И.Усов. Институт радиотехники и электроники РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Введенского, 1; e-mail: nis229@ire216.msk.su

риваемая ниже теория позволяет рассчитать фарадеевский фазовый сдвиг $\Delta\varphi_F$ с учетом основных типов ДЛП, присутствующих в реальном Spun-световоде, и сравнить результаты расчета и эксперимента.

2. Теория

Поляризационные свойства излучения, распространяющегося по ВС типа Spun со спиральной структурой быстрых и медленных осей ДЛП, могут быть описаны с помощью формализма дифференциальной матрицы $\|N\|$ [10]. В базисе линейных поляризаций изменение компонент вектора напряженности электрического поля волны E имеет вид

$$\begin{pmatrix} dE_x/dz \\ dE_y/dz \end{pmatrix} = \|N(z)\| \begin{pmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{pmatrix}. \tag{1}$$

Матрица $\|N\|$ описывает эволюцию электрического вектора плоской световой волны при перемещении ее волнового фронта на малое расстояние dz вдоль направления распространения. Интегрируя уравнения (1), получаем полную матрицу Джонса $\|T\|$, определяющую вектор $E(z)$ в точке z на оси световода по известному вектору $E(z=0)$:

$$\begin{pmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{pmatrix} = \|T(z)\| \begin{pmatrix} E_x(0) \\ E_y(0) \end{pmatrix}. \tag{2}$$

В дальнейшем все матрицы приведены в базисе циркулярных поляризаций, более удобном для интерпретации эксперимента.

Световая волна, распространяясь по ВС, испытывает линейное ДЛП с коэффициентом $\Delta\beta = 2\pi/L_b$, присущее заготовке ВС и вызванное анизотропией упругих натяжений или геометрией сердцевины; циркулярное ДЛП с коэффициентом $\gamma = 2\pi/L_F$, связанное с эффектом Фарадея, и линейное ДЛП с коэффициентом $\delta = 2\pi/L_{ind}$, индуцированное намоткой волокна на катушку радиусом R (где L_b, L_F, L_{ind} – длины биений соответствующих ДЛП) [11]. Подчеркнем, что, по нашему мнению, вращение заготовки приводит лишь к вращению осей (с пространственной частотой $\xi = 2\pi/L_{tw}$, где L_{tw} – шаг спиральной структуры) линейного ДЛП. Эти типы ДЛП и их дифференциальные матрицы приведены в табл.1.

Наш эксперимент построен на измерении разности фаз $\Delta\varphi = \delta_L - \delta_R$ между лево- и правополяризованными модами, поэтому будем считать сигналом такую допол-

нительную разность фаз $\Delta\varphi_F = \Delta\varphi(\gamma) - \Delta\varphi(\gamma=0)$, которая возникает при включении магнитного поля.

2.1. Прямолинейный ВС типа Spun

Матрица $\|N\|$ для прямолинейного ВС типа Spun, помещенного в продольное магнитное поле, имеет вид (табл.1)

$$\|N_{cir}^{Spun}\| = \begin{pmatrix} i\gamma & i(\Delta\beta/2) \exp(i2\xi z) \\ i(\Delta\beta/2) \exp(-i2\xi z) & -i\gamma \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Интегрирование уравнений (1) с матрицей (3) приводит к полной матрице Джонса

$$\|T_{cir}^{Spun}\| = \tag{4}$$

$$\begin{pmatrix} [\Omega \cos \Omega z - i(\xi + \gamma) \sin \Omega z] \exp(i\xi z) & i(\Delta\beta/2) \sin \Omega z \exp(i\xi z) \\ i(\Delta\beta/2) \sin \Omega z \exp(-i\xi z) & [\Omega \cos \Omega z + i(\xi + \gamma) \sin \Omega z] \exp(-i\xi z) \end{pmatrix},$$

где

$$\Omega = [\Delta\beta^2/4 + (\xi + \gamma)^2]^{1/2} \tag{5}$$

– пространственная частота. Из матрицы (4) получаем сигнал в виде фазовой задержки

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = \arctan \left\{ \left[\sin[2(\Omega - \xi)z] + \frac{(\Delta\beta/2)^2}{[\Omega + (\xi + \gamma)]^2} \right. \right. \\ \left. \left. \times \sin[2(\Omega + \xi)z] - 2 \frac{(\Delta\beta/2)^2}{(\xi + \gamma)[\Omega + (\xi + \gamma)]} \sin(2\xi z) \right] \right. \\ \left. \times \left[\cos[2(\Omega - \xi)z] - \frac{(\Delta\beta/2)^2}{[\Omega + (\xi + \gamma)]^2} \cos[2(\Omega + \xi)z] \right. \right. \\ \left. \left. - 2 \frac{(\Delta\beta/2)^2}{(\xi + \gamma)[\Omega + (\xi + \gamma)]} \cos(2\xi z) \right]^{-1} \right\}. \tag{6} \end{aligned}$$

Выражение в фигурных скобках описывает сложные биения трех пространственных частот: $\omega_1 = 2(\Omega - \xi)$, $\omega_2 = 2(\Omega + \xi)$ и $\omega_3 = 2\xi$, с различными весами, определяемыми коэффициентами при синусах и косинусах. При $\Delta\beta \ll \xi$ (кручение преобладает над линейным ДЛП), сигнал реализуется, как и в идеальном случае, в виде нарастающей с ростом длины ВС фазовой задержки

$$\Delta\varphi_F = 2\{[(\xi + \gamma)^2 + (\Delta\beta/2)^2]^{1/2} - \xi\}z \approx 2\gamma z.$$

Табл.1. Типы ДЛП и их дифференциальные матрицы.

Тип ДЛП	Коэффициент ДЛП [11]	Дифференциальная матрица
Исходное линейное ДЛП	$\Delta\beta = \frac{2\pi}{L_b} = C_b f(a, b) \frac{n_0^3(\lambda)}{\lambda}$	$\begin{pmatrix} 0 & i(\Delta\beta/2) \\ i(\Delta\beta/2) & 0 \end{pmatrix}$
Линейное ДЛП от намотки	$\delta = \frac{2\pi}{L_{ind}}, L_{ind} = 22.792 \frac{\lambda}{n_0^3(\lambda)} \frac{R^2}{r^2}$	$\begin{pmatrix} 0 & i(\delta/2) \\ i(\delta/2) & 0 \end{pmatrix}$
Циркулярное ДЛП от эффекта Фарадея	$\gamma = VB_z = \frac{2\pi}{L_F}, V = \frac{8.13 \times 10^5}{\lambda^2 - \lambda_V^2}$	$\begin{pmatrix} i\gamma & 0 \\ 0 & -i\gamma \end{pmatrix}$
Спиральная структура	–	$\begin{pmatrix} 0 & i(\Delta\beta/2) \exp(i2\xi z) \\ i(\Delta\beta/2) \exp(-i2\xi z) & 0 \end{pmatrix}$

Примечания: n_0 – средний показатель преломления ВС; $f(a, b)$ – функция формы ВС; C_b – константа, зависящая от упругих и термодинамических свойств материала ВС; λ – длина волны в нм; $\lambda_V = 118$ нм – граничная длина волны; r – внешний радиус ВС.

В случае $\Delta\beta \gg \xi$, т. е. в отсутствие кручения, ВС типа Spun превращается в ВС типа HiVi. Подставив $\xi = 0$ в уравнение (6), можно убедиться в том, что ВС типа HiVi плохо подходит для наблюдения эффекта Фарадея, т. к. накопление сигнала с увеличением длины ВС прекращается при длине $z > L_b$.

Найдем период z_{ω_1} пространственной частоты ω_1 , подставив в (5) выражения для $\Delta\beta$ и γ из табл.1 и $\xi = 2\pi/L_{tw}$. Учитывая, что $L_F \gg L_b, L_{tw}$, получаем

$$z_{\omega_1} = \frac{L_b L_{tw}}{(4L_b^2 + L_{tw}^2)^{1/2} - 2L_b}$$

Соотношение для периода z_{ω_1} аналогично соотношению для «длины биений эллиптического состояния» в [1], полученному из принципиально другой модели. Отметим, что z_{ω_1} не является длиной биений собственного поляризованного состояния ВС типа Spun, которое у таких волокон (даже в отсутствие магнитного поля ($\gamma = 0$)) зависит от длины z . Период z_{ω_1} – это всего лишь длина биений наименьшей из трех пространственных частот, преобладающей в сигнале в тех случаях, когда $L_{tw} \ll L_b$.

2.2. ВС типа Spun, намотанный на катушку

Дифференциальная матрица этого ВС, намотанного на катушку радиусом R и помещенного в магнитное поле тока, имеет вид (табл.1)

$$\|N_{cir}^{Spun+}\| = \quad (7)$$

$$\left\| \begin{array}{cc} i\gamma & i(\Delta\beta/2) \exp(i2\xi z) + i(\delta/2) \\ i(\Delta\beta/2) \exp(-i2\xi z) + i(\delta/2) & -i\gamma \end{array} \right\|.$$

Решение уравнений (1) с матрицей (7) приводит к уравнению Риккати с коэффициентами типа элемента матрицы N_{12} , которое не имеет стандартных решений.

Далее расчет проводился численно. Согласно формуле (1) с учетом матрицы (7) для напряженностей электрического поля с левой и правой круговыми поляризациями получаем выражения

$$\begin{aligned} \frac{dE_L}{dz} &= -i\gamma E_L + i[(\Delta\beta/2) \exp(i2\xi z) + (\delta/2)]E_R, \\ \frac{dE_R}{dz} &= i[(\Delta\beta/2) \exp(-i2\xi z) + (\delta/2)]E_L + i\gamma E_R. \end{aligned} \quad (8)$$

Методом численного интегрирования (8) был выполнен расчет зависимости $\Delta\varphi_F(z)$ для диаметров контура $D = 77.4, 44.7$ и 20 мм, которым соответствуют длины биений наведенного ДЛП $L_{ind} = 4500, 1500$ и 300 мм. Эволюция сигнала вдоль оси ВС длиной 16 м на последних 100 см показана на рис.1. Параметры ВС были следующими: $L_{tw} = 2$ мм, $L_b = 15$ мм, $J = 3$ А (напомним, что магнитное поле тока вдоль оси ВС пропорционально $1/D$). Тонкие линии на рис.1 соответствуют случаю, когда в световоде отсутствуют все типы ДЛП, кроме фарадеевского (идеальный сигнал). Из рис.1,*a* следует, что выходной сигнал содержит биения между высокочастотными компонентами ω_2 и ω_3 и имеет огибающую, период которой равен 445 мм для $D = 44.7$ мм. Мы предположили, что этот период соответствует частоте ω_1 из выражения (6). Действительно, оценка периода частоты ω_1 дает $z_{\omega_1} \approx 4L_b^2/L_{tw} \approx 450$ мм. Итак, наведенное изгибом световода ДЛП не приводит к появлению в сигнале $\Delta\varphi$ принци-

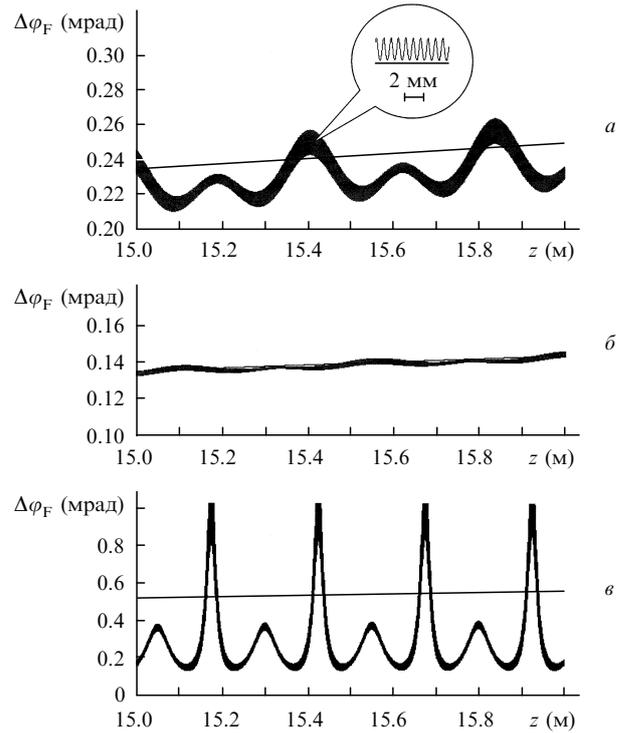


Рис.1. Эволюция сигнала по длине ВС типа Spun с полной длиной $L = 16$ м на последних 100 см при диаметрах намотки $D = 44.7$ (а), 77.4 (б) и 20 мм (в). Тонкие линии – идеальный сигнал.

ально новых частот, однако частота $\omega_3 = 2\xi$ размывается в спектр шириной $\Delta\xi \approx 4\xi(\delta/\Delta\beta)$, что обуславливает негармоническое поведение огибающей сигнала вплоть до $L_{ind}/L_b \sim 100$. На рис.1,*б* видно, что огибающая стала похожа на синусоиду лишь при $L_{ind}/L_b \sim 300$.

Рассмотрим влияние спектра источника излучения на сигнал. Дисперсия показателя преломления $dn/d\lambda = 1.23 \times 10^{-5} \text{ нм}^{-1}$ при $\lambda = 1550$ нм приводит к зависимости коэффициентов линейных ДЛП $\Delta\beta$ и δ от длины волны λ . Для циркулярного ДЛП, обусловленного эффектом Фарадея, зависимость от λ определяется константой Верде [12] (табл.1). Результат расчета эволюции сигналов в окрестности $\lambda = 1550$ нм, длины волн которых различаются на $\Delta\lambda = 15$ нм, показал, что эти сигналы сохраняют форму, но сдвигаются вдоль оси ВС на расстояние ~ 13 мм. Это означает, что при использовании источника света с шириной спектра 15 нм мы получим сигнал, усредненный на интервале $\Delta z \sim 13$ мм. Ясно, что в таком сигнале будут отсутствовать обе высокочастотные пространственные компоненты ω_2 и ω_3 (для этого достаточно усреднения при $\Delta z \sim 2.5$ мм) и будет частично сглажена периодическая функция на частоте ω_1 (рис.2).

При сравнении с экспериментом необходимо учесть и другие причины усреднения сигнала. Так, эллиптичность катушки, вариации длины биений в ВС или шага спи-

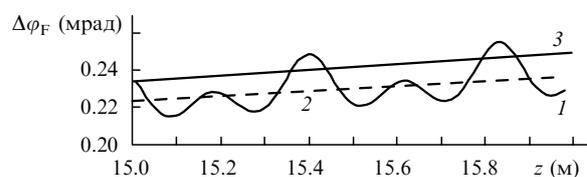


Рис.2. Эволюция сигнала (I), аналогичная показанной на рис.1,*a*, после усреднения при $\Delta z = 13$ мм. Кривая 2 – усреднение при $\Delta z = 107$ мм, кривая 3 – идеальный сигнал.

ральной структуры порядка 1 % приводят к усреднению соответственно при $\Delta z \sim 11$, ~ 20 и ~ 7 мм. Наибольшее усреднение ($\Delta z \sim 107$ мм), как показал анализ, связано с учетом запаздывающей фазовой модуляции, в результате чего осциллирующая структура сигнала не проявляется (кривая 2 на рис.2).

Был выполнен расчет чувствительности датчика, нормированной на его чувствительность при регистрации идеального сигнала (обеспечиваемого волокном, у которого отсутствуют все виды двулучепреломления, кроме ДЛП, наводимого магнитным полем электрического тока), для разных диаметров катушки чувствительного ВС типа Spun.

3. Эксперимент

Нами был разработан ВОДТ, в котором реализуется фазовый подход для измерения электрического тока. Этот датчик использовался как инструмент для проверки предложенной модели Spun-волокна. Блок-схема ВОДТ показана на рис.3. Оптическая часть датчика представляет собой цельноволоконный низкокогерентный линейный интерферометр, аналогичный описанному в [2, 3]. Источником оптического излучения 1 служит волоконный суперфлуоресцентный излучатель на легированном эрбием кварцевом ВС с накачкой от лазерного диода. Рабочая длина волны источника $\lambda = 1550$ нм, выходная мощность составила около 10 мВт, ширина спектра $\Delta\lambda = 15$ нм.

Оптическое излучение последовательно проходит через направленный ответвитель 2, волоконный поляризатор 4 и поступает в волоконный модулятор двулучепреломления 6, причем ось пропускания поляризатора ориентирована (точка сварки 5а) под углом 45° к осям ДЛП входного волокна модулятора. В волоконном тракте модулятора (начиная от точки сварки 5а) излучение распространяется в виде двух световых волн равной интенсивности с ортогональными линейными поляризациями. Модулятор выполнен из ВС типа PANDA, намотанного на пьезоцилиндр диаметром 30 мм с натяжением 50 г. Далее излучение проходит через соединительную линию 7 длиной 900 м на основе ВС типа PANDA и фазовую четвертьволновую пластинку 8, оси которой ориентированы под углом 45° к осям соединительной линии 7 (точка сварки 5б). Фазовая пластинка изготовлена из отрезка ВС типа PANDA (длина биений 4 мм).

Сформированные фазовой пластинкой ортогональные циркулярно поляризованные моды распространя-

ются по чувствительному контуру 9, выполненному из ВС типа Spun ($L_b = 15$ мм, $L_{tw} = 2$ мм), длиной $L = 16$ м. После отражения от зеркала 10 эти моды, сменив направление циркулярной поляризации на противоположное, распространяются в обратном направлении. При повторном проходе фазовой пластинки 8 циркулярно поляризованные моды вновь преобразуются в линейные, причем x -мода переходит в y -моду, и наоборот. В результате на входе в поляризатор 4 (точка сварки 5а) все фазовые сдвиги между поляризованными модами, обусловленные взаимными эффектами (влияние показателя преломления среды, ДЛП в световоде), компенсируются, и сохраняется только связанный с измеряемым электрическим током фарадеевский фазовый сдвиг $\Delta\varphi_F$.

Составляющие обеих линейно поляризованных мод, коллинеарные оси пропускания поляризатора, проходят через поляризатор и интерферируют, затем интерференционный сигнал через ответвитель 2 поступает на фотоприемник 3. Для регистрации фарадеевского фазового сдвига $\Delta\varphi_F$ используется широко известная в волоконно-оптической гироскопии модуляционная методика, основанная на запаздывающей гармонической модуляции фазового сдвига между рабочими световыми волнами интерферометра [13].

Модуляция осуществляется модулятором ДЛП 6. Необходимое временное запаздывание между входной и выходной световыми волнами, требуемое для повышения эффективности фазовой модуляции, обеспечивается с помощью соединительной линии 7. Модулятор возбуждается генератором 13, работающим на частоте $f_m = 40$ кГц, и обеспечивает модуляцию сдвига фаз между x - и y -модами $\varphi_m(t) = \Psi_m \cos(2\pi f_m t)$ с амплитудой $\Psi_m = 1.2$ рад. Выражение для мощности излучения P на фотоприемнике 3 (в предположении, что $\varphi_m(t), \Delta\varphi_F \ll 1$) можно представить в виде

$$P \approx \frac{P_0}{2} \left[1 + 2\Delta\varphi_F \Psi_m \cos(2\pi f_m t) + \frac{\Psi_m^2}{2} \cos^2(2\pi f_m t) \right].$$

На выходе фазового детектора 12, настроенного на выделение сигнала, пропорционального $\cos(2\pi f_m t)$, напряжение пропорционально фазовому сдвигу, обусловленному эффектом Фарадея: $U_0 = \kappa \Delta\varphi_F$, $\kappa = \text{const}$. Сигнал с фазового детектора оцифровывают в АЦП 14 и регистрируют компьютером 15. Измеряемый ток в проводнике 11 задается стабилизатором тока 16.

На рис.4 приведена выходная характеристика ВОДТ. В датчике использовался чувствительный контур, волоконная катушка которого располагалась внутри тороидальной обмотки из 370 витков медного провода. Данная конструкция позволяла реализовать магнитное поле, эк-

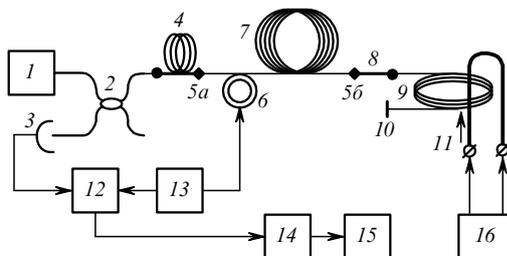


Рис.3. Блок-схема ВОДТ:

1 – источник света; 2 – направленный ответвитель; 3 – фотодетектор; 4 – поляризатор; 5а, 5б – точки 45° -ной сварки ВС; 6 – модулятор двулучепреломления; 7 – волоконная линия; 8 – четвертьволновая пластинка; 9 – чувствительный контур; 10 – зеркало; 11 – проводник с током; 12 – фазовый детектор; 13 – опорный генератор; 14 – АЦП; 15 – компьютер; 16 – источник тока.

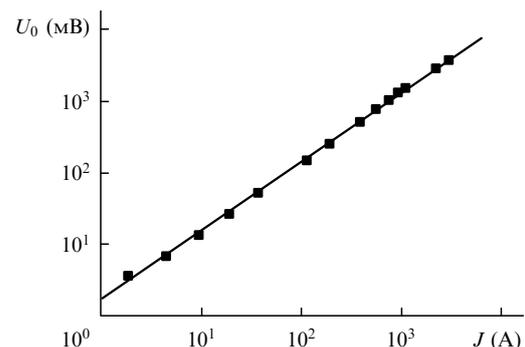


Рис.4. Выходная характеристика ВОДТ ($D = 155$ мм, $N_0 = 27$).

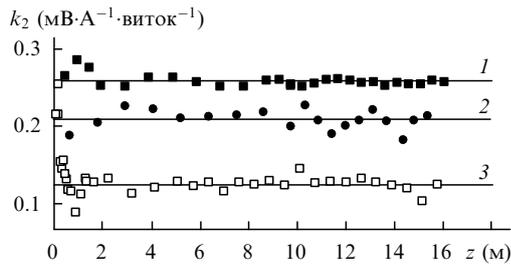


Рис.5. Экспериментальные зависимости чувствительности ВОДТ от длины z световода типа Spun, намотанного на катушку, при полной длине световода $L = 16$ м и диаметре $D = 155$ (1), 36 (2) и 20 мм (3).

вивалентное в 370 раз большему электрическому току, чем мог обеспечить стабилизатор тока 16. Максимальный измеренный эквивалентный ток составил 3000 А. Минимальный ток определялся пороговой чувствительностью ВОДТ (собственный шум датчика ~ 0.5 мВ), равной $70 \text{ мА/Гц}^{1/2}$. Чувствительность ВОДТ $k_1 = dU_0/dI = 6.4 \text{ мВ/А}$. Нестабильность выходного сигнала составила менее 0.1% на протяжении двух часов. Погрешность чувствительности k_1 за 22 дня наблюдений не превысила 0.6% (доверительный интервал 1σ). В рамках исследования свойств ВС типа Spun определялась чувствительность ВОДТ при намотке волокна на катушки разных диаметров D . Была измерена чувствительность k_2 на один виток контура ($k_2 = k_1/N_0$), выраженная в $\text{мВ}\cdot\text{А}^{-1}\cdot\text{виток}^{-1}$. Экспериментальные зависимости $k_2(L)$ для разных D приведены на рис.5. Зависимость чувствительности от диаметра D показана на рис.6 (точки).

4. Обсуждение результатов

В экспериментах с использованием контуров разных диаметров (рис.5) получены постоянные и не зависящие от длины волокна значения чувствительности k_2 , приходящейся на один виток, или тангенса угла наклона функции накопления сигнала (рис.2), по крайней мере до длины 16 м. Отклонение от такого поведения ожидается лишь на длинах порядка длины биений $L_F \sim 10^5$ м. При уменьшении диаметра контура ($D < 70$ мм) чувствительность k_2 понижается (рис.6), причем наблюдается хорошее совпадение результатов теории и эксперимента. Следует отметить, что это понижение происходит еще при достаточно большом превышении внутреннего линейного ДЛП волокна типа Spun над линейным ДЛП от намотки. Так, $k_2/k_{id} = 0.2$ при $L_{ind}/L_b \sim 10$ и $D = 14$ мм, где k_{id} – чувствительность ВС, который имеет только фарадеевское ДЛП.

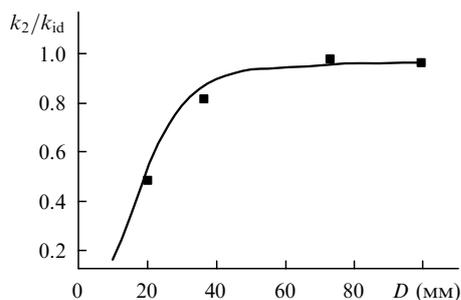


Рис.6. Чувствительность датчика, нормированная на его чувствительность при регистрации идеального сигнала, в зависимости от диаметра D намотки ВС типа Spun (кривая – теория, точки – эксперимент).

Вернемся к рис.5. Небольшие изменения чувствительности k_2 по длине ВС могут быть объяснены модуляцией сигнала с пространственной частотой ω_1 из-за недостаточно полного усреднения. Поскольку длина намотки менялась на целое число длин одного витка, то зависимости на рис.5 имеют характер случайной выборки.

5. Заключение

Изучены поляризационные свойства ВС типа Spun с точки зрения их применения в датчиках тока на основе эффекта Фарадея. Исследования проводились с использованием разработанного ВОДТ. Датчик выполнен в виде низкокогерентного линейного отражательного интерферометра с пороговой чувствительностью $70 \text{ мА/Гц}^{1/2}$, максимальным измеряемым током 3000 А и повторяемостью масштабного коэффициента $\pm 0.6\%$.

Для интерпретации свойств ВС типа Spun разработана теория, использующая концепцию спиральной структуры осей линейного ДЛП, образующейся в процессе вытяжки ВС при вращении заготовки. Применен метод интегрирования дифференциальной матрицы Джонса. Для прямолинейного ВС типа Spun в магнитном поле решение получено в квадратурах, для ВС типа Spun, намотанного на катушку, интегрирование дифференциальной матрицы было проведено численно.

Расчет показал, что в ВС типа Spun, намотанном на катушку, частично компенсируется линейное ДЛП, наведенное упругим изгибом (с радиусом R) волокна, что и определяет преимущество волокон этого типа при использовании их в качестве чувствительного элемента датчиков тока на основе эффекта Фарадея. Однако при сравнительно слабом условии $L_{tw} < L_b$ требуется соблюдать более жесткое условие $20L_b < L_{ind}$.

Результаты измерения чувствительности датчика в зависимости от диаметра катушки и длины намотки подтвердили выводы теории. В частности, экспериментально показано, что при данном диаметре контура средняя чувствительность на один виток при $L \leq 16$ м практически не зависит от длины ВС. Падение чувствительности при уменьшении диаметра намотки совпадает с теоретическим расчетом.

- Laming R.I., Payne D.N. *J. Lightwave Technol.*, **7**, 2084 (1989).
- Blake J., Tantaswadi P., de Carvalho. *IEEE Trans. on Power Delivery*, **11**, 116 (1996).
- Bohnert K., Gabus P., Nehring J., Brändle H. *J. Lightwave Technol.*, **20**, 267 (2002).
- Takahashi M. et al. *IEEE Trans. on Power Delivery*, **12**, 1422 (1997).
- Bosselmann T. *Proc. Conf. OFS-9* (Firenze, Italia, 1993, p. 297).
- Rose A.H., Polinkin P.G., Blake J. *Proc. Conf. OFS-14* (Venice, Italia, 2000, TH3-5).
- Аксенов В.А., Иванов Г.А., Моршнев С.К., Чаморовский Ю.К. *13-я Междуна. научная конф. ММТТ-2000* (С.-Петербург, 2000, т. 7, секция 10, с. 53).
- Аксенов В.А., Волошин В.В., Воробьев И.Л., Иванов Г.А., Исаев В.А., Колосовский А.О., Моршнев С.К., Чаморовский Ю.К. *Радиотехника и электроника*, **47**, 1011 (2002).
- Barlow A.J., Ramskov-Hansen J.J., Payne D.N. *Appl. Opt.*, **20**, 2962 (1981).
- Azzam R.M.A., Bashara N.M. *Ellipsometry and Polarised Light* (Amsterdam – New York – Oxford: North-Holland Publ. Comp., 1977).
- Rashleigh S.C. *J. Lightwave Technol.*, **1**, 312 (1983).
- Robinson C.C. *Appl. Opt.*, **3**, 1163 (1964).
- Berg R.A., Lefevre H.C., Show H.J. *J. Lightwave Technol.*, **2**, 91 (1984).