

Оптические волокна *srin*: спиральная структура линейного двулучепреломления или циркулярное двулучепреломление?

С.К.Моршнев, В.П.Губин, И.Л.Воробьев, Н.И.Старостин,
А.И.Сазонов, Ю.К.Чаморовский, Н.М.Коротков

*Предложен, обоснован и осуществлен эксперимент, позволяющий сделать выбор между двумя моделями, которые описывают поведение поляризованного светового излучения в волокнах, полученных при вращении заготовки с сильным встроенным линейным двулучепреломлением (общепринятое название *srin*): моделью спиральной структуры осей встроенного линейного двулучепреломления и моделью, использующей циркулярное двулучепреломление. Эксперимент, осуществленный на отражательном волоконном двухполяризованном интерферометре, показал, что поведение поляризационных состояний в *srin*-волокне описывается моделью спиральной структуры осей встроенного линейного двулучепреломления.*

Ключевые слова: волоконный световод, двулучепреломление, эффект Фарадея, *srin*-волокно.

1. Введение

В настоящее время широкое применение, в частности в датчиках электрического тока, находят чувствительные к магнитному полю оптические волоконные световоды (ВС) (общепринятое название *srin*) [1 – 5]. Такие ВС производятся из заготовок с достаточно сильным встроенным линейным двойным лучепреломлением (ДЛП), которые вращают в процессе вытяжки. По нашему мнению [3], в *srin*-волокне образуется спиральная структура осей линейного ДЛП с шагом, определяемым скоростью вытяжки и угловой скоростью вращения заготовки. Пройдя некоторый отрезок такого световода, световая волна встречает оси линейного ДЛП, которые повернуты на угол, пропорциональный длине пройденного светом отрезка. Поляризационные состояния световой волны преобразуются в этом волокне достаточно сложным образом. Изгиб ВС по радиусу R в контуре чувствительного элемента датчика приводит к появлению в волокне дополнительного наведенного линейного ДЛП [6], которое складывается векторно с линейным ДЛП световода со спиральной структурой осей. Проблема изучения эволюции поляризационных состояний (ПС) в ВС со спиральной структурой осей ДЛП актуальна, поскольку от характера этой эволюции зависит чувствительность волокна к магнитному полю. Несмотря на то что рассматриваемые волокна известны уже более 15 лет, в интерпретации эволюции ПС света в этих волокнах имеются существенные разногласия. В частности в работах [1, 4, 5] предполагается, что в *srin*-ВС присутствует циркулярное ДЛП, тогда как наша модель [3] позволяет объяснить

известные результаты с помощью только линейного ДЛП. Мы предлагаем решающий эксперимент по разрешению противоречия: что реализуется в *srin*-волокне – спиральная структура осей линейного ДЛП или циркулярное ДЛП?

2. Теория

В датчиках магнитного поля (электрического тока) на основе эффекта Фарадея две волны ортогональных циркулярных поляризаций проходят через чувствительный элемент, который представляет собой оптическое волокно, чувствительное к магнитному полю. Магнитное поле вызывает сдвиг фаз между этими волнами, регистрируемый с помощью линейного отражательного интерферометра [2, 3], в котором скомпенсированы все фазовые сдвиги между ортогональными поляризациями, кроме сдвига из-за эффекта Фарадея. Магнитное поле – векторная величина, поэтому сдвиг, обусловленный эффектом Фарадея, накапливается как при прямом, так и при обратном ходе излучения в чувствительном элементе. В нашей модели нужно проследить за эволюцией ПС волны, которая на входе в чувствительный элемент была циркулярно поляризованной. Всякое отклонение от чисто циркулярной поляризации приводит к уменьшению магнитооптической чувствительности интерферометра. Это можно понять, представив себе любое эллиптическое ПС как сумму двух ортогональных циркулярных поляризаций с различными весами и фазами и, естественно, с противоположными знаками вкладов в эффект Фарадея.

Для иллюстрации эволюции ПС чаще всего используют формализм сферы Пуанкаре, однако нам проще получить комплексные значения компонент напряженностей полей волн E_x и E_y , а из них – точку χ на комплексной плоскости:

$$\chi = E_y/E_x. \quad (1)$$

Как показано в работе [7], комплексная плоскость с точками вида (1) представляет собой «географическую

С.К.Моршнев, В.П.Губин, И.Л.Воробьев, Н.И.Старостин, А.И.Сазонов, Ю.К.Чаморовский, Н.М.Коротков. ФирЭ им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Введенского, 1; e-mail: m137@fryazino.net, nis229@ire216.msk.su, yuchamor@online.ru

Поступила в редакцию 11 июля 2008 г., после доработки – 1 октября 2008 г.

карту» сферы Пуанкаре. Ее экватор проецируется на ось действительных чисел комплексной плоскости. Точки экватора соответствуют линейным ПС, точка $\chi = \{0, 0\}$ – линейной поляризации $E \parallel x$, а $\chi = \{\infty\}$ – линейной поляризации $E \parallel y$. Полюса (циркулярные ПС) сферы Пуанкаре проецируются в точки $\chi = \{0, j\}$ (правая циркулярная поляризация) и $\chi = \{0, -j\}$ (левая циркулярная поляризация). Верхняя полушарность соответствует правым эллиптически поляризованным состояниям, а нижняя – левым. Такое представление сферы Пуанкаре комплексной плоскостью предполагает использование в вычислительных базах линейных поляризаций.

Расчет сделан на основе идеологии дифференциальных матриц Джонса, отражающей непрерывную эволюцию поляризованного света, распространяющегося в анизотропной среде, свойства которой меняются с длиной ВС. Пусть встроенное линейное ДЛП волокна имеет длину биений L_b . На длине биений между волнами двух ортогональных линейных поляризаций набежит фазовая задержка, равная 2π . Следовательно, скорость нарастания фазовой задержки с длиной волокна $\Delta\beta = 2\pi/L_b$. ДЛП, наведенное в ВС его изгибом по радиусу R , имеет длину биений L_{ind} и скорость нарастания фазовой задержки [6]

$$\delta = 2\pi/L_{ind} = 0.2757n_0^3r^2/\lambda R^2, \tag{2}$$

где λ – рабочая длина волны; n_0 – показатель преломления оболочки; r – внешний радиус световода. Пусть шаг спирали равен L_{tw} ; тогда скорость вращения осей ДЛП $\xi = 2\pi/L_{tw}$. В базисе линейных поляризаций напряженности электрических полей E_x, E_y могут быть найдены с помощью дифференциальной матрицы Джонса для ВС со спиральной структурой осей линейного ДЛП [3]:

$$\begin{bmatrix} \frac{dE_x}{dz} \\ \frac{dE_y}{dz} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} j(\Delta\beta \cos 2\xi z + \delta \cos 2\varphi_0) & j(\Delta\beta \sin 2\xi z + \delta \sin 2\varphi_0) \\ j(\Delta\beta \sin 2\xi z + \delta \sin 2\varphi_0) & -j(\Delta\beta \cos 2\xi z + \delta \cos 2\varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где z – путь, пройденный световой волной вдоль волокна, а φ_0 – угол, определяющий положение осей наведенного изгибом линейного ДЛП. Уравнение (3) позволяет вычислить комплексные напряженности электрических полей E_x и E_y и определить ПС на комплексной плоскости (точки χ). Решение уравнений (3) приводит к дифференциаль-

ному уравнению Риккати с негармоническими коэффициентами, не имеющему решения в квадратурах. Расчеты сделаны на компьютере.

ВС типа HiBi (с сильным линейным ДЛП, без вращения заготовки). Эволюция ПС в волокне типа HiBi представлена на рис.1,а. Видно, что под действием сильного линейного ДЛП поляризационные состояния смещаются к экватору сферы Пуанкаре, переходят в полушарие левых поляризаций, проходят через полюс и возвращаются в полушарие правых поляризаций. Далее эти циклы повторяются. ПС находится в обоих полушариях одинаковое время. Если, например, под действием магнитного поля правая циркулярная поляризация опережает левую, то, перейдя в полушарие левых поляризаций, та же самая волна будет теперь отставать. Фазовый сдвиг из-за эффекта Фарадея в таком волокне не накапливается с длиной ВС.

Прямолинейные оптические волокна со спиральной структурой ДЛП. Если заготовку в процессе вытяжки волокна вращать (даже не очень быстро), обеспечивая равенство шага вращения L_{tw} длине биений L_b , то вид эволюции существенно изменится (рис.1,б). Видно, что теперь ПС не покидают полушария правых поляризаций, следовательно, фазовый сдвиг из-за эффекта Фарадея будет накапливаться с длиной волокна. Вместе с тем отклонения от полюса все еще велики (витки имеют большую амплитуду), т.е. суммарный сигнал существенно меньше сигнала в идеальном ВС. С уменьшением шага вращения (на рис.1,в шаг спирали L_{tw} в два раза меньше длины биений L_b) амплитуды отклонений от полюса заметно уменьшаются и, следовательно, растет магнитооптическая чувствительность датчика. Если в чувствительном элементе используется прямолинейное волокно,

то для повышения чувствительности нужно просто уменьшать шаг спирали L_{tw} .

Оптические волокна со спиральной структурой ДЛП, намотанные на катушку фиксированного радиуса. Для большинства применений с целью повышения абсолютной магнитооптической чувствительности датчика требуется

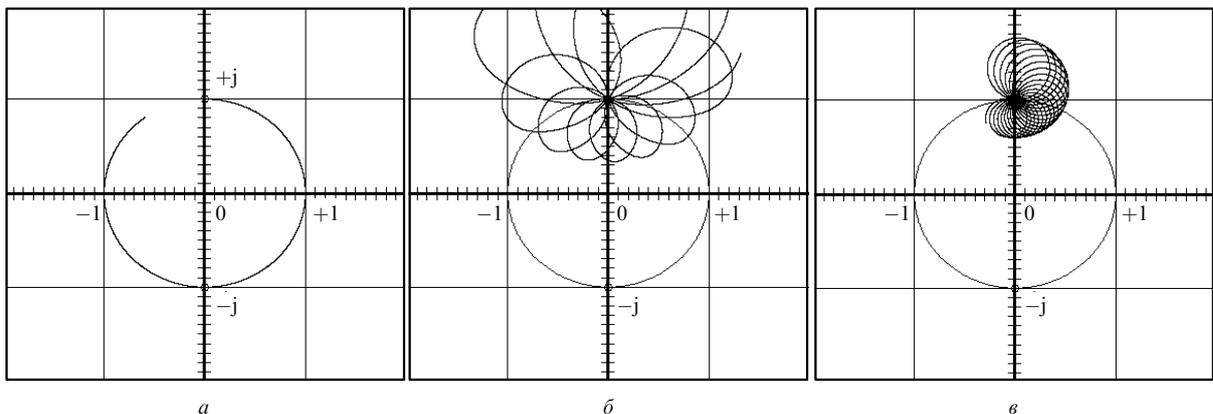


Рис.1. Эволюция поляризационных состояний на комплексной плоскости в волокне с сильным линейным ДЛП, изготовленном без вращения заготовки (а), и в прямолинейном волокне со спиральной структурой ДЛП (длина биений встроенного линейного ДЛП $L_b = 16$ мм) в случае шага спирали $L_{tw} = 16$ (б) и 8 мм (в).

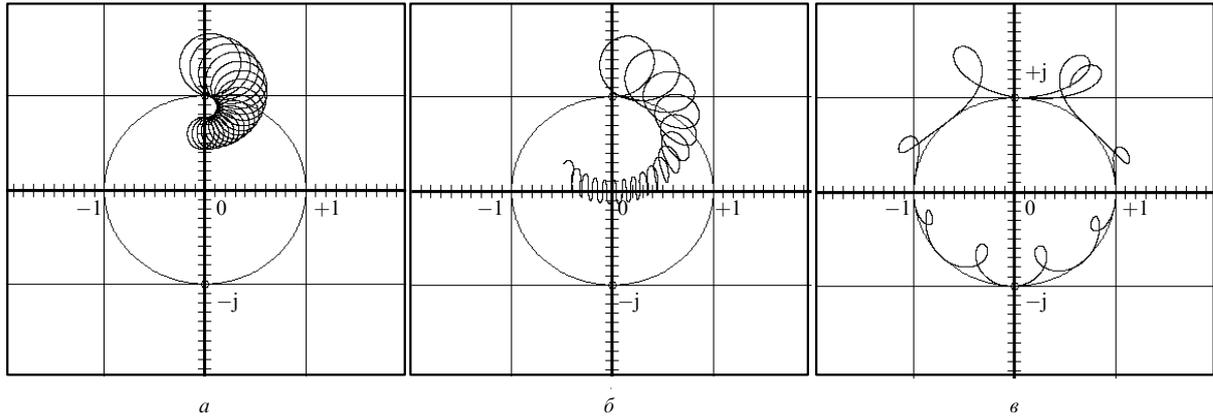


Рис.2. Эволюция поляризационных состояний в волокне со спиральной структурой линейного ДЛП ($L_b = 16$ мм, $L_{tw} = 8$ мм), намотанном на катушки с $R = 18$ (а), 7.3 (б) и 3.25 мм (в).

наматывать контуры того или иного радиуса. Пусть чувствительный элемент датчика представляет собой оптическое волокно со спиральной структурой ДЛП, намотанное на катушку сравнительно большого радиуса $R = 18$ мм ($L_{ind} = 973$ мм для $\lambda = 1.55$ мкм). Эволюция ПС в таком элементе представлена на рис.2,а. Картина напоминает движение вектора момента импульса гироскопа, участвующего в прецессии (огibaющая окружность) и в нутационных колебаниях (витки вокруг огibaющей окружности). Чтобы различать два ярко выраженных вида эволюционного движения ПС, воспользуемся термином «нутация». Видно, что не все витки нутации теперь проходят через полюс (соответствующий правой циркулярной поляризации), и огibaющая этих витков представляет собой окружность. Будем уменьшать радиус изгиба. При $R = 7.3$ мм ($L_{ind} = 160$ мм) эволюция ПС имеет вид, показанный на рис.2,б, и окружность огibaющей такова, что ПС покидают северное полушарие сферы Пуанкаре, а чувствительность резко падает. Подчеркнем, что это происходит при $L_{ind} = 160$ мм, т.е. при наведенном ДЛП, которое в 10 раз слабее внутреннего ДЛП ($L_b = 16$ мм). Дальнейшее продвижение в южное полушарие наблюдается при $L_{ind}/L_b = 2$ и радиусе намотки $R = 3.25$ мм (рис.2,в); ясно, что фазовый сдвиг из-за эффекта Фарадея при таком радиусе изгиба не будет накапливаться с увеличением длины ВС (ср. с рис.1,а)

Зафиксируем шаг спирали ($L_{tw} = 4$ мм) и радиус намотки ($R = 10.3$ мм). При длине биений $L_b = 16$ мм встроенного линейного ДЛП волокна ПС достигают

экватора сферы Пуанкаре (рис.3,а). Увеличим теперь встроенное линейное ДЛП волокна в 1.25 раза ($L_b = 12$ мм). Эволюция ПС представлена на рис.3,б. Видно, что увеличение встроенного линейного ДЛП привело к улучшению ситуации с чувствительностью – ПС не достигают теперь экватора. Дальнейший рост собственного ДЛП волокна приводит к уменьшению радиуса огibaющей окружности. Таким образом, встроенное линейное ДЛП волокна явно участвует в подавлении линейного ДЛП, возникающего в результате деформации намотки на катушку фиксированного радиуса.

На рис.4 показана эволюция ПС в spun-волокнах с длиной биений собственного линейного ДЛП волокна $L_b = 16$ мм, намотанных на катушку радиусом $R = 10.3$ мм ($L_{ind} \approx 300$ мм) и различающихся шагом спирали. Видно, что уменьшение шага спирали от $L_{tw} = 8$ мм (рис.4,а) до $L_{tw} = 2$ мм (рис.4,в) приводит, как и в случае прямолинейного волокна, к уменьшению амплитуды нутаций, однако радиус огibaющей окружности в этой последовательности растет быстрее и ПС оказываются в южном полушарии сферы Пуанкаре. Вращение волокна явно не участвует в подавлении линейного ДЛП, возникающего в результате намотки.

Ситуация парадоксальная: с одной стороны, без вращения наблюдение эффекта Фарадея невозможно, а с другой – слишком сильное вращение приводит при использовании намотки к уменьшению чувствительности. Объяснить это можно следующим образом. Вращение подавляет собственное линейное ДЛП световода и не

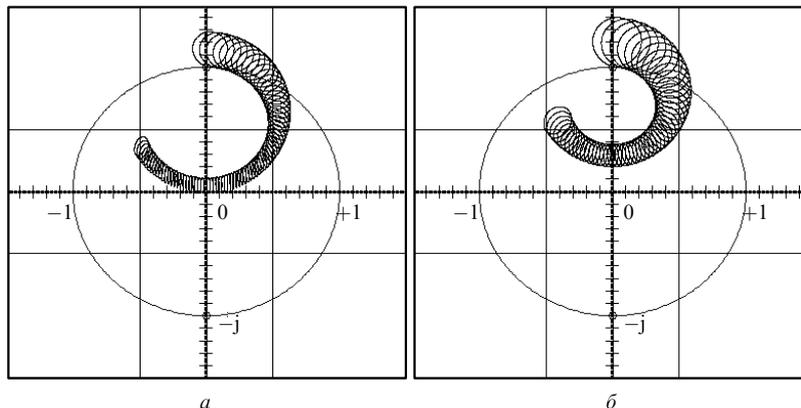


Рис.3. Эволюция поляризационных состояний в волокнах со спиральной структурой линейного ДЛП с шагом спирали $L_{tw} = 4$ мм, намотанных на катушки радиусом $R = 10.3$ мм. Длина биений встроенного линейного ДЛП $L_b = 16$ (а) и 12 мм (б).

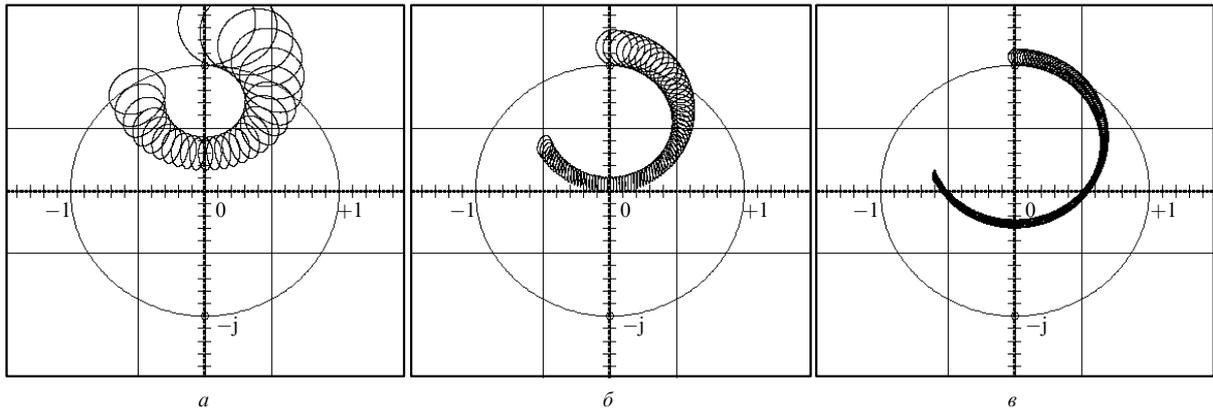


Рис.4. Эволюция поляризационных состояний в волокнах со спиральной структурой линейного ДЛП с длиной биений $L_b = 16$ мм, намотанных на катушки радиусом $R = 10.3$ мм. Шаг спирали $L_{tw} = 8$ (а), 4 (б) и 2 мм (в).

может подавить линейное ДЛП, индуцированное намоткой. Таким образом, влияние намотки подавляется при непосредственном участии встроенного линейного ДЛП. При малых шагах спирали встроенное линейное ДЛП подавляется сильно и перестает справляться с ДЛП, индуцированным намоткой.

Подчеркнем, что результаты наших расчетов существенно отличаются от результатов, полученных при использовании общепризнанной модели [1, 4], в которой вращение заготовки якобы приводит к появлению циркулярного ДЛП. Основным отличием циркулярного ДЛП является его ортогональность ко всем линейным ДЛП независимо от их природы. Сокращение шага вращения должно приводить к увеличению циркулярного ДЛП и, следовательно, к более эффективному подавлению любого линейного ДЛП, в том числе и ДЛП, возникающего в случае фиксированного радиуса намотки. Волокна типа LoVi со слабым собственным линейным ДЛП, полученные при вращении заготовки с малым шагом вращения (~ 4 мм), при намотке на катушки различных радиусов демонстрируют фазовую задержку, в точности равную фазовой задержке, наведенной индуцированным намоткой линейным ДЛП. Циркулярное ДЛП в них себя не проявляет.

Кроме этого признание существования в *strip*-волокнах встроенного циркулярного ДЛП приводит к существованию собственного эллиптического состояния волокна, т. е. если такое ПС будет «введено» в данный световод, то вне зависимости от длины отрезка волокна на выходе будет наблюдаться точно такое же состояние (как, например, состояние линейной поляризации в волокнах NiBi). В нашей модели, как показывают эволюционные кривые, даже для прямолинейного волокна не существует собственного эллиптического состояния – для каждого отрезка волокна они будут различными.

Для решения указанной проблемы мы предлагаем следующий эксперимент. В чувствительном элементе интерферометрического датчика тока используют два ВС со встроенным ДЛП с одинаковыми длинами биений, например $L_b = 15$ мм, различающиеся шагом спирали, например $L_{1tw} = 2.5$ мм и $L_{2tw} = 7.5$ мм. Измеряют относительную чувствительность датчика S/S_{id} в зависимости от радиуса R намотки ВС в чувствительном элементе (S_{id} – чувствительность датчика, чувствительный элемент которого изготовлен из идеального изотропного волокна). При больших радиусах ($R \sim 40$ мм), так же как и в прямолинейном ВС, чувствительность S/S_{id} у ВС с малым

шагом спирали L_{1tw} будет больше, чем у ВС с большим шагом спирали L_{2tw} . Однако структура с малым шагом спирали, как показано выше, лучше подавляет встроенное линейное ДЛП волокна, а последнее играет основную роль в подавлении наведенного изгибом линейного ДЛП. Поэтому ВС с шагом спирали L_{1tw} будет быстрее терять чувствительность, чем световод с шагом L_{2tw} , если уменьшать радиус R их намотки в чувствительном элементе датчика. При малых радиусах R относительная чувствительность S/S_{id} у ВС с малым шагом спирали будет меньше, чем у ВС с большим шагом.

Такое поведение коренным образом отличается от поведения ВС с циркулярным ДЛП. Если циркулярное ДЛП может подавить встроенное линейное ДЛП волокна ($L_b \sim 16$ мм), чтобы можно было накапливать сдвиг фаз от эффекта Фарадея с длиной волокна, то оно тем более подавит линейное ДЛП от намотки по радиусу $R = 10$ мм ($L_{ind} \approx 300$ мм). Относительная чувствительность S/S_{id} в диапазоне $10 \text{ мм} \leq R \leq 40 \text{ мм}$ практически не будет изменяться. Зависимости S/S_{id} от R для двух волокон с разными длинами биений циркулярного ДЛП пойдут параллельно, не пересекаясь.

Существенное осложнение в эксперимент вносит неконтролируемая величина угла φ_0 (см. формулу(3)). Это угол на входе в изогнутую часть ВС между быстрыми (или медленными) осями собственного линейного ДЛП и линейного ДЛП, индуцированного изгибом. Ясно, что его величина достаточно случайна, однако от нее зависит относительная чувствительность. Мы рассчитали S/S_{id} для различных значений φ_0 в диапазоне $0 \leq \varphi_0 \leq \pi/2$. В этом диапазоне величина S/S_{id} изменяется примерно на 2% при большом радиусе намотки; при $R \sim 10$ мм это изменение составляет почти 20% у волокон с шагом $L_{2tw} = 7.5$ мм и 2% – 10% у волокон с шагом $L_{1tw} = 2.5$ мм.

В эксперименте, чтобы избавиться от неконтролируемого параметра, исследуемая катушка нагревается. При нагреве волокно удлиняется и происходит поворот осей встроенного линейного ДЛП световода относительно осей линейного ДЛП, индуцированного намоткой по заданному радиусу на входе в катушку. Чувствительность меняется по синусоиде. Можно выделить максимальное и минимальные значения относительной чувствительности S/S_{id} . Вклады других механизмов в изменение S/S_{id} не превышают 1%.

На рис.5, иллюстрирующем вышесказанное, приведены зависимости S/S_{id} от радиуса R намотки волокна в чувствительном элементе датчика тока. Для двух воло-

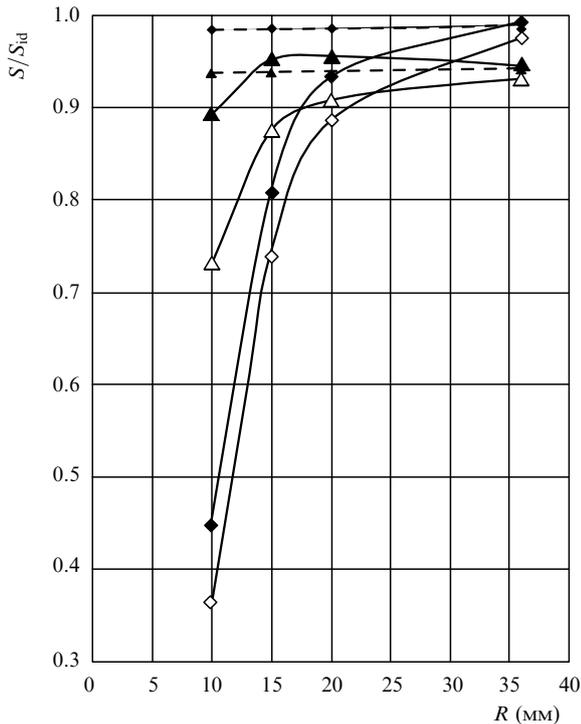


Рис.5. Изменение относительной чувствительности S/S_{id} датчика тока с чувствительным элементом из волокон со спиральной структурой ДЛП, намотанных на катушки радиусом R , при $L_b = 15$ мм и $L_{1tw} = 2.5$ мм (\diamond, \blacklozenge), $L_{2tw} = 7.5$ мм ($\triangle, \blacktriangle$). Темные точки соответствуют максимальной относительной чувствительности ($\varphi_0 = \pi/2$), светлые – минимальной ($\varphi_0 = 0$). Штриховыми линиями показаны зависимости S/S_{id} от R в случае, если бы srpn-волокна обладали циркулярным ДЛП. Маленькими ромбами отмечены волокна с $L_{1tw} = 2.5$ мм, маленькими треугольниками – с $L_{2tw} = 7.5$ мм.

кон со спиральной структурой линейного ДЛП с одной и той же длиной биений $L_b = 15$ мм, но различными шагами спирали L_{tw} , получены теоретически две пары пересекающихся кривых, отмеченные темными и светлыми ромбами ($L_{1tw} = 2.5$ мм) и треугольниками ($L_{2tw} = 7.5$ мм). Темными точками отмечены зависимости S/S_{id} , соответствующие максимальной чувствительности ($\varphi_0 = \pi/2$), светлыми – минимальной ($\varphi_0 = 0$).

Из рис.5 видно, что при $R = 36$ мм минимальная относительная чувствительность S/S_{id} волокна с $L_{1tw} = 2.5$ мм примерно на 3 % превышает максимальную чувствительность S/S_{id} волокна с $L_{2tw} = 7.5$ мм и, следовательно, может быть разрешена в эксперименте. При $R = 10$ мм максимальная относительная чувствительность волокна с $L_{1tw} = 2.5$ мм существенно ниже минимальной чувствительности волокна с $L_{2tw} = 7.5$ мм.

Эксперимент

Схема экспериментальной установки, которая представляет собой линейный отражательный волоконный двухполяризационный интерферометр (ВДИ), предназначенный для измерения электрического тока с использованием эффекта Фарадея в кварцевом ВС [2, 3], показана на рис.6. Чувствительный элемент ВДИ состоит из исследуемого контура, присоединенного с помощью сварки к выходному волоконному концу четвертьволновой фазовой пластинки. Были изготовлены восемь контуров различного диаметра из srpn-волокна двух типов. Оба типа волокон имеют одну и ту же длину биений встроенного линейного ДЛП ($L_b = 15$ мм), но различаются шагами спирали L_{tw} (2.5 и 7.5 мм). Контур из каждого типа волокна намотаны с натяжением 7 г на каркасы из органического стекла с радиусами 36, 20, 15 и 10 мм. Для увеличения эффективного тока, пронизывающего плоскость контура, каждый волоконный контур снабжен тороидальной обмоткой из медного провода. В каждом контуре число витков волокна $N = 160$, число витков медного провода $M = 36$. В качестве зеркала ВДИ использовался перпендикулярный торец волокна. Каждый контур имел входной (3) и выходной (4) волоконные концы длиной ~50 см. Для измерения чувствительности через медную обмотку пропускали эталонный ток $I_0 = 3$ А. Остальная часть ВДИ полностью аналогична приведенной в [3] и здесь не рассматривается. Электронный блок обработки сигнала ВДИ построен по схеме анализа отношений гармоник модуляции [3], обеспечивающей точность измерений ± 0.1 %.

Для измерения магнитооптической чувствительности S_i каждого (i -го) контура использовалась следующая ме-

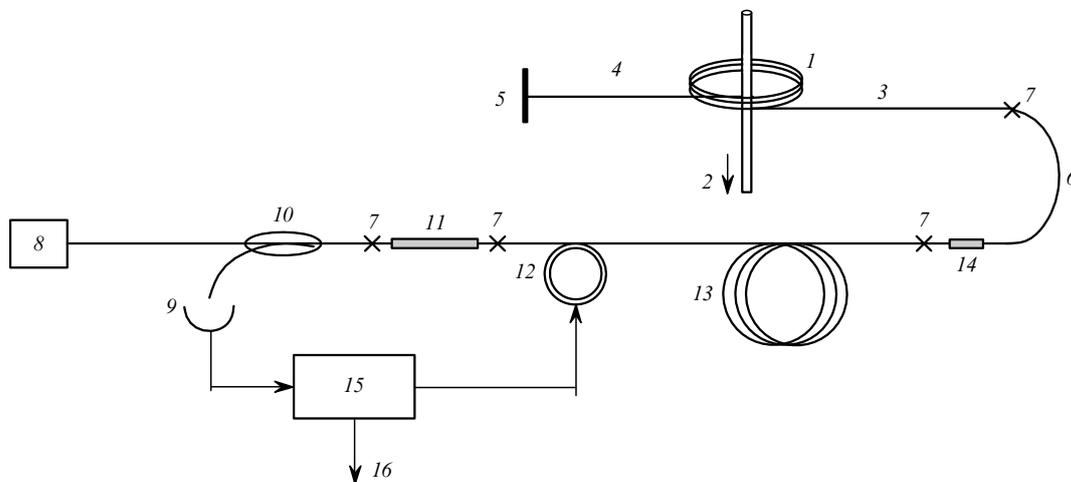


Рис.6. Схема экспериментальной установки:

1 – исследуемый контур; 2 – провод с эталонным током; 3, 4 – входной и выходной концы контура соответственно; 5 – зеркало; 6 – волоконный выходной конец фазовой пластинки; 7 – места сварки волокон; 8 – источник света; 9 – фотодетектор; 10 – направленный ответвитель; 11 – поляризатор; 12 – модулятор поляризации; 13 – волоконная линия задержки; 14 – четвертьволновая фазовая пластинка; 15 – электронный блок; 16 – измеренный ток.

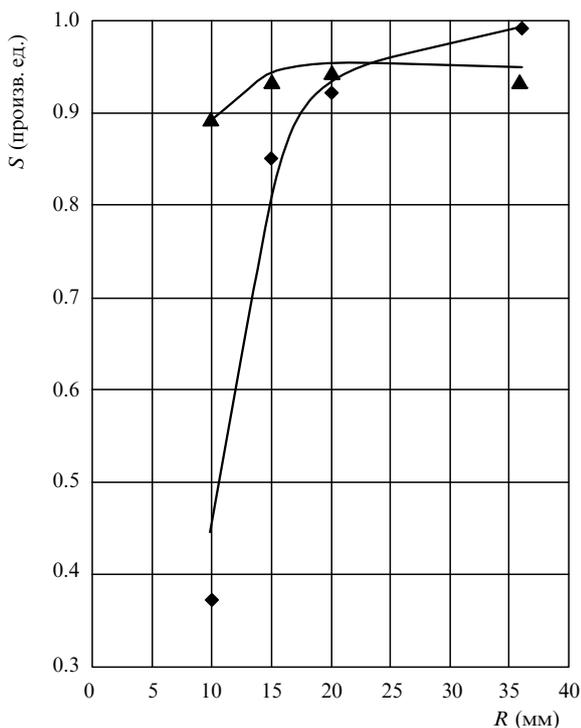


Рис.7. Зависимости магнитооптической чувствительности датчика от радиуса R катушки s-p-p-волокон с $L_b = 15$ мм при шаге спирали $L_{1tw} = 2.5$ мм (◆) и $L_{2tw} = 7.5$ мм (▲). Точки – эксперимент, сплошные кривые – результаты теоретического расчета.

тодика. Сначала получали максимальное значение видности ВДИ путем слабых деформаций входного и выходного волоконных концов при $I_0 = 0$. Наибольшее значение S_i имеет в случае круговой поляризации излучения на входе в контур. Затем включали ток $I_0 = 3$ А и записывали на самописце показания измеренного тока.

Согласно вышеизложенной теории, чувствительность ВС зависит от угла φ_0 между осями встроенного линейного ДЛП и линейного ДЛП от катушки. Этот угол изменяется вследствие разогрева контура с волокном измеряемым током. В результате показания (I_i) измерителя тока осциллируют во времени. Для определения магнитооптической чувствительности S_i данного контура ($S_i = I_i/I_0$) использовались максимальные значения I_i . Поскольку чувствительность (масштабный коэффициент датчика тока) зависит не только от параметров контура, но и от других элементов оптической схемы ВДИ, проводилась калибровка датчика тока при радиусе контура 36 мм с волокном, имеющим $L_{1tw} = 2.5$ мм. При этих параметрах контура датчик имел максимально возможную в данных экспериментах чувствительность, относительная величина которой была равна 0.99, что соответствует ее теоретическому значению для данных параметров (см. рис.5). Этим была осуществлена привязка экспериментальных результатов к теории.

Результаты измерений магнитооптической чувствительности при различных радиусах R катушки s-p-p-волокна представлены на рис.7. Отметим хорошее согласие теории и эксперимента как при больших, так и при малых значениях R .

Как следует из теории и эксперимента, при больших R s-p-p-волокно с шагом спирали L_{1tw} имеет более высокую чувствительность, приближающуюся к чувствительности идеального (изотропного) волокна. В то же время при переходе к малым диаметрам катушки чувствительность такого s-p-p-волокна падает более резко, чем у волокна с L_{2tw} , что указывает, в соответствии с теорией, на более высокую устойчивость последнего к изгибным деформациям.

3. Заключение

Эксперимент по исследованию упруго изогнутых (по различным радиусам) волоконных световодов, полученных вращением заготовки с сильным встроенным линейным двулучепреломлением (s-p-p-волокна), позволяет сделать выбор между двумя моделями s-p-p-волокна в пользу модели спиральной структуры встроенного линейного ДЛП. В эксперименте получено предсказанное теорией пересечение зависимостей магнитооптической чувствительности от радиуса R катушки волокна для двух образцов s-p-p-волокон с одинаковыми длинами биений линейного ДЛП ($L_b = 15$ мм) и различными шагами спирали ($L_{1tw} = 2.5$ мм, $L_{2tw} = 7.5$ мм). Волокно с меньшим шагом спирали проявляет более высокую чувствительность при больших радиусах R катушки, которая резко уменьшается по мере уменьшения радиуса. Волокно с большим шагом спирали проявляет более высокую чувствительность при малых радиусах катушки. Вращение при изготовлении s-p-p-волокна подавляет только встроенное линейное ДЛП, которое при сильном подавлении ($L_{1tw} = 2.5$ мм) не может подавить линейное ДЛП, индуцированное катушкой по малому радиусу R .

Общепринятая в настоящее время модель [1, 4], в которой вращение заготовки якобы приводит к появлению циркулярного ДЛП, принципиально отрицает наблюдавшееся пересечение зависимостей чувствительности от радиуса катушки волокна, т. к. в этой модели основной причиной подавления паразитного ДЛП от катушки по радиусу R является циркулярное ДЛП, естественно тем более сильное, чем меньше период вращения.

Таким образом, на основании проведенного эксперимента можно утверждать, что s-p-p-волокна адекватно описываются моделью спиральной структуры встроенного линейного ДЛП.

1. Laming R.I., Payne D.N. *J. Lightwave Technol.*, **7**, 2084 (1989).
2. Polynkin P., Blake J. *J. Lightwave Technol.*, **23** (11), 3815 (2005).
3. Губин В.П., Исаев В.А., Моршнев С.К., Сазонов А.И., Старостин Н.И., Чаморовский Ю.К., Усов А.И. *Квантовая электроника*, **36** (3), 287 (2006).
4. Дейкин Дж., Калшо Б. *Оптоволоконные сенсоры: принципы и компоненты* (М.: Мир, 1992, с. 347).
5. Michie A., Canning J., Bassett I., Haywood J., Digweed K., Aslund M., Ashton B., Stevenson M., Digweed J. *Opt. Express*, **15** (4), 1811, (2007).
6. Rashleigh S.C. *J. Lightwave Technol.*, **1**, 312 (1983).
7. Azzam R.M.A., Bashara N.M. *Ellipsometry and Polarised Light* (Amsterdam – New York – Oxford: North-Holland Publ. Comp., 1977).