

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.11>

УДК: 621.372.8

МАГНИТО-ОПТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ SPUN-ВОЛОКНА ПРИ НАЛИЧИИ ОСЕВОГО МЕХАНИЧЕСКОГО СКРУЧИВАНИЯ

С.К. Моршнеv, Н.И. Старостин, Я.В. Пржиялковский, А.И. Сазонов

Фрязинский филиал ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН
141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 3 июля 2024 г.

Аннотация. Состояние поляризации светового излучения в spun-волокне является одним из факторов, определяющих его магнитооптическую чувствительность и применение в датчиках тока. В статье методом моделирования исследовано влияние упругого скручивания вокруг оси spun-волокна на эволюцию поляризации излучения и чувствительность световода. Установлено, что скручивающие воздействия или иные воздействия, меняющие шаг кручения, приводят к деградации чувствительности spun-волокна, причем величина деградации определяется состоянием поляризации на входе возмущенного участка волокна. Показано, что при возвращении к ненапряженному состоянию с исходными параметрами чувствительность волокна не восстанавливается, а продолжает уменьшаться. Отмечается важность минимизации скрученных участков при практическом применении spun-волокна в датчике тока.

Ключевые слова: spun-волокно, поляризационное состояние, магнитооптическая чувствительность, сфера Пуанкаре, шаг спирали.

Финансирование: Работа выполнена в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Старостин Николай Иванович, nis229@ire216.msk.su

Введение

Spun-волокна со встроенным двулучепреломлением в настоящее время имеют широкое применение благодаря своим магнитооптическим свойствам, в частности, их используют в качестве чувствительного элемента в волоконно-оптических датчиках тока. Изготавливают spun-волокна вытяжкой из быстро вращающейся анизотропной заготовки [1]. В результате внутри волокна возникает спиральная структура осей линейного двулучепреломления, которая и обеспечивает магнитооптические свойства spun-волокна [2, 3]. При подобной вытяжке возможны незначительные (менее 1%) флуктуации шага спирали, которые можно рассматривать как дополнительный поворот осей линейного ДЛП с последующим возвращением к среднему шагу спирали L_s . Возможны также на отдельных участках и механические закручивания вокруг оси волокна по или против направления вращения заготовки. Случайное механическое закручивание вокруг оси волокна может происходить также при укладке spun-волокна в чувствительный контур датчика тока. Каждое из перечисленных воздействий приводит к дополнительному изменению шага спиральной структуры на отдельных участках волокна, что в свою очередь порождает неоднородную магнитооптическую чувствительность по длине spun-волокна. Подобные изменения являются нежелательными для практических применений, в частности, датчик тока, использующий чувствительный контур с неоднородными участками spun-волокна, становится восприимчивым к влиянию внешних магнитных полей, что ухудшает его точностные характеристики.

В данной работе изучается влияние случайных механических закручиваний на поляризационное состояние излучения в spun-волокне и его магнитооптическую чувствительность. Для анализа используется модель spun-волокна, состоящего из трех последовательных отрезков. Расчет производится с помощью дифференциальной матрицы поляризационных состояний, исследуются случаи прямого и изогнутого волокна для разных поляризаций оптического излучения на входе.

1. Формирование дифференциальной матрицы для описания эволюции поляризационных состояний в srip-волокне

Как было отмечено во введении, вытяжку srip-волокон осуществляют при быстром вращении заготовки с встроенным линейным двойным лучепреломлением (ДЛП) [1]. В результате образуется спиральная структура осей линейного ДЛП [2, 3], обеспечивающая непрерывные переходы между поляризационными состояниями (ПС) светового излучения, распространяющегося по такому волокну. С каждым шагом спирали вдоль волокна свет встречает слегка повернутую систему осей ДЛП, то есть ДЛП оказывается зависящим от расстояния z от начала волокна. Как известно [2, 3, 4], такая ситуация не может быть описана матрицами Джонса и требует применения аппарата дифференциальной матрицы.

Пусть угловая скорость вращения осей ДЛП $\xi = 2\pi/L_s$, где L_s – шаг спиральной структуры, при движении вдоль волокна, а скорость набегания фаз из-за линейного ДЛП $\Delta\beta = 2\pi/L_b$, где L_b – длина биений ДЛП, тогда дифференциальная матрица для прямолинейного srip-волокна в базисе линейных поляризаций E_x, E_y имеет вид [2, 3, 4]:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial E_x}{\partial z} \\ \frac{\partial E_y}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\frac{\Delta\beta}{2} \cos 2\xi z & i\frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\xi z \\ i\frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\xi z & -i\frac{\Delta\beta}{2} \cos 2\xi z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

Из равенства (1) видна зависимость ПС светового излучения в srip-волокне от полной длины пройденного пути z . Диагональные элементы матрицы отвечают за фазовые набегания между E_x и E_y и в случае отсутствия кручения ($\xi = 0$) определяют свойства РМ-волокна, вытянутого без кручения из той же заготовки, что и srip-волокно. В случае srip-волокна недиагональные элементы смешивают состояния E_x и E_y . Если теперь добавить сюда внешнее линейное ДЛП от изгиба со скоростью фазового набегания $\delta = 2\pi/L_{ind}$ и азимутальным углом воздействия φ_0 и циркулярное ДЛП со скоростью

нарастания разности фаз γ между двумя ортогональными циркулярно поляризованными волнами (например от эффекта Фарадея) то получим [4]:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial E_x^{нов}}{\partial z} \\ \frac{\partial E_y^{нов}}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i \frac{\Delta\beta}{2} \cos 2\xi z + i \frac{\delta}{2} \cos 2\phi_0 & i \frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\xi z + i \frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\phi_0 - \frac{\gamma}{2} \\ i \frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\xi z + i \frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\phi_0 + \frac{\gamma}{2} & -i \frac{\Delta\beta}{2} \cos 2\xi z - i \frac{\delta}{2} \cos 2\phi_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{xR} + iE_{xI} \\ E_{yR} + iE_{yI} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Это выражение позволяет определить по известным компонентам ПС ($E_{xR}, E_{xI}, E_{yR}, E_{yI}$) в точке z на оси волокна новые ПС ($E_{xR}^{нов}, E_{xI}^{нов}, E_{yR}^{нов}, E_{yI}^{нов}$) в точке $z+dz$. Повторяя этот процесс можно пройти всю траекторию света в волокне в заданном интервале от начальной точки z_{min} до конечной точки z_{max} :

$$\begin{aligned} E_{xR}^{нов} &= E_{xR} - dz \cdot E_{xI} \cdot \left(\frac{\Delta\beta}{2} \cos 2\xi z + \frac{\delta}{2} \cos 2\phi_0 \right) - dz \cdot E_{yR} \cdot \frac{\gamma}{2} - dz \cdot E_{yI} \cdot \left(\frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\xi z + \frac{\delta}{2} \sin 2\phi_0 \right) \\ E_{xI}^{нов} &= dz \cdot E_{xR} \cdot \left(\frac{\Delta\beta}{2} \cos 2\xi z + \frac{\delta}{2} \cos 2\phi_0 \right) + E_{xI} + dz \cdot E_{yR} \cdot \left(\frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\xi z + \frac{\delta}{2} \sin 2\phi_0 \right) - dz \cdot E_{yI} \cdot \frac{\gamma}{2} \\ E_{yR}^{нов} &= dz \cdot E_{xR} \cdot \frac{\gamma}{2} - dz \cdot E_{xI} \cdot \left(\frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\xi z + \frac{\delta}{2} \sin 2\phi_0 \right) + E_{yR} + dz \cdot E_{yI} \cdot \left(\frac{\Delta\beta}{2} \cos 2\xi z + \frac{\delta}{2} \cos 2\phi_0 \right) \\ E_{yI}^{нов} &= dz \cdot E_{xR} \cdot \left(\frac{\Delta\beta}{2} \sin 2\xi z + \frac{\delta}{2} \sin 2\phi_0 \right) + dz \cdot E_{xI} \cdot \frac{\gamma}{2} - dz \cdot E_{yR} \cdot \left(\frac{\Delta\beta}{2} \cos 2\xi z + \frac{\delta}{2} \cos 2\phi_0 \right) + E_{yI} \end{aligned} \quad (3)$$

Для дальнейших расчетов мы использовали Visual Basic с наглядным нанесением полученных значений ($E_{xR}^{нов}, E_{xI}^{нов}, E_{yR}^{нов}, E_{yI}^{нов}$) на сферу Пуанкаре. Шаг dz выбирали существенно (в ~ 1000 раз) меньшим, чем наименьший элемент рисунка. Начальные значения при $z = z_{min}$ вводили перед расчетом, а конечные значения ($E_{xR}^{нов}, E_{xI}^{нов}, E_{yR}^{нов}, E_{yI}^{нов}$) при $z = z_{max}$, полученные по формулам (3), запоминали в качестве начальных значений для расчета следующего отрезка *spun*-волокна (возможно с другими параметрами).

Как известно [4], между точками на сфере Пуанкаре и всеми возможными поляризационными состояниями оптического излучения существует взаимно однозначное соответствие, причем удвоенный азимутальный угол 2θ ПС соответствует долготе на глобусе Пуанкаре, а удвоенный угол эллиптичности 2ε – широте. Углы показаны на рис. 2а. Ясно, что точки на полюсах соответствуют циркулярно поляризованному излучению $2\varepsilon = \pi/2$; $b/a = \text{tge} = 1$, а и b – полуоси эллипса поляризации. Экватор заполняют линейно

поляризованные состояния, отличающиеся азимутальным углом θ , отсчитываемым от нулевого меридиана (рис. 2а).

Как выяснилось, траектории ПС в *srpn*-волокне напоминает траектории движения верхней точки оси гироскопа [5]. У обеих траекторий можно выделить «нutationные витки», которые выстраиваются в «прецессионное» замкнутое движение. На рис. 1а показаны начальные нutationные витки, проходящие через полюс, а на рис. 1с – прецессионный виток, используемый для правильного определения среднего значения угла эллиптичности – то есть магнитной чувствительности. Для краткости мы будем и в дальнейшем пользоваться понятиями «нutationный виток» и «прецессионный виток».

Чувствительность η к магнитному полю можно вычислить по среднему углу эллиптичности излучения в волокне ε : $\eta = \sin 2\varepsilon$ [4, 6, 7]. У идеального волокна $\varepsilon = \pi/4$ и чувствительность $\eta = 1$. Далее следует напомнить некоторые свойства *srpn*-волокон. Рассмотрим рис. 1, на котором показаны эволюции ПС вдоль прямолинейного отрезка *srpn*-волокна при шагах кручения с $L_s = 5$ мм (рис. 1а) и с $L_s = 3.5$ мм (рис. 1б) и одинаковым встроенным ДЛП с $L_b = 10$ мм. Возбуждение волокна производили циркулярно поляризованной волной (ПС на полюсе сферы Пуанкаре). Из рис. 1 видно, что ПС волокна с большим шагом спирали (рис. 1а) сильнее отклоняются от полюса сферы Пуанкаре, то есть реализуют меньшую чувствительность к магнитному полю. Это подтверждается и значениями чувствительности: для волокон с $L_s = 5$ мм чувствительность $\eta = 0,802$, а для волокон с $L_s = 3.5$ мм – $\eta = 0,879$. Ясно, также, что чем сильнее встроенное линейное ДЛП (чем меньше L_b), тем сильнее нужно крутить заготовку при вытяжке, укорачивая шаг спирали L_s , для повышения чувствительности к магнитному полю. Возникает вопрос: зачем вообще встраивать линейное ДЛП в *srpn*-волокна, если это понижает чувствительность?

Следует неверный вывод о необходимости предельного уменьшения встроенного линейного ДЛП при минимальном шаге кручения. Неверный потому, что для измерения тока необходимо располагать *srpn*-волокна по

замкнутым контурам, то есть подвергать эти волокна изгибам, что полностью меняет картину.

Рассмотрим рисунки рис. 1с и рис. 1d, на которых показано насколько эффективно *srpn*-волокна с различными встроенными линейными ДЛП сопротивляются изгибу. Пусть каждое *srpn*-волокно намотано на одинаковые катушки диаметром 20 мм. Индуцированное изгибом линейное ДЛП невелико: на длине волны 1,55 мкм у такого внешнего воздействия длина биений $L_{ind} \sim 300$ мм. Рис. 1с и рис. 1d показывают, что изгибное ДЛП смещает ПС к экватору тем самым, уменьшая чувствительность *srpn*-волокна к магнитному полю, причем оказывается, что чем меньше шаг спиральной структуры, тем сильнее отклонение от полюса сферы Пуанкаре, тем меньше указанная чувствительность. Радиус же нутаций, как и ранее (рис. 1а, b), уменьшается при уменьшении шага спирали. Итак, спиральная структура встроенного, достаточно сильного линейного ДЛП позволяет *srpn*-волокну эффективно сопротивляться внешнему воздействию в виде изгиба.

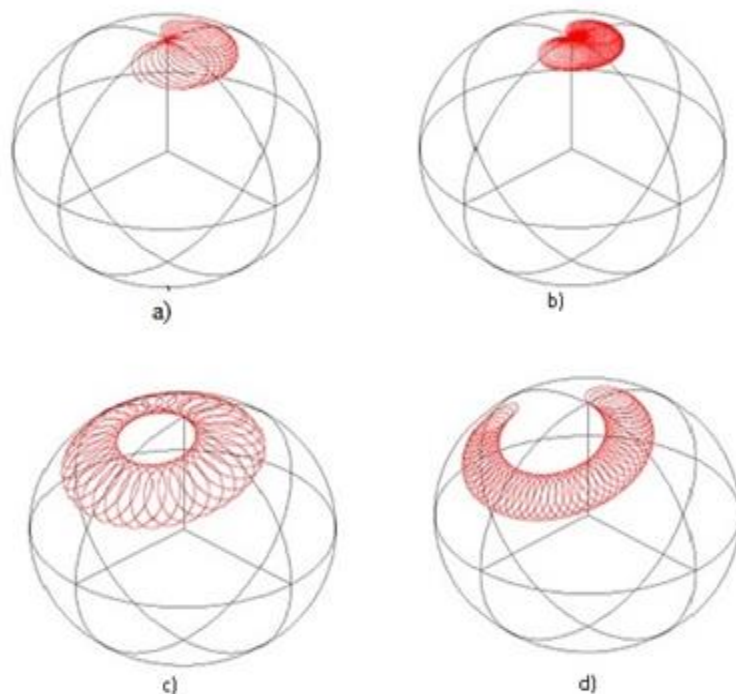


Рис. 1. Эволюция ПС излучения в *srpn*-волокне на сфере Пуанкаре при различных значениях шага спиральной структуры L_s без изгиба волокна и при изгибе.

а) и б) изгиба нет, с) и d) при изгибе по радиусу $R \sim 10$ мм ($L_{ind} \sim 300$ мм).
а) и с): $L_s = 5$ мм, б) и d): $L_s = 3,5$ мм. $L_b = 10$ мм во всех случаях.

2. Дополнительное механическое кручение вокруг оси *srpn*-волокна

2.1. Исходное ПС – циркулярная поляризация

Как было сказано выше в процессе вытяжки *srpn*-волокна или намотки его на катушку возможна фиксация случайного упругого поворота небольших участков волокна вокруг его оси. Впоследствии на следующем участке *srpn*-волокна весьма вероятно возвращение к ненапряженному состоянию.

Упругий поворот вокруг оси *srpn*-волокна приводит к двум результатам: во-первых, оси ДЛП дополнительно поворачиваются, уменьшая шаг спирали, если поворот осуществляют в ту же сторону, в которую закручена спираль, или, увеличивая шаг спирали, если поворот производят в противоположную сторону. Во-вторых, упругое кручение вызывает циркулярное ДЛП, которое не проявляет себя в спиральной структуре в отсутствии упругих напряжений.

Однако длина биений циркулярного ДЛП в семь раз больше шага спиральной структуры, создаваемой при упругом кручении [8]. Этим циркулярным ДЛП можно, поэтому, пренебречь.

Пусть ω_0 – частота пространственного вращения спиральной структуры ДЛП *srpn*-волокна, с шагом спирали L_s , а ω_1 – частота упругого пространственного вращения с одним полным оборотом на длине L_1 . Указанные величины связаны соотношениями:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{L_s}; \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{L_1}. \quad (4)$$

Суммарную частоту Ω пространственного вращения осей ДЛП (один оборот на длине L_Ω) можно определить из соотношения:

$$\Omega = \omega_0 \pm \omega_1 \quad \rightarrow \quad \frac{2\pi}{L_\Omega} = \frac{2\pi}{L_s} \pm \frac{2\pi}{L_1}. \quad (5)$$

Например, механическое кручение (один оборот на длине 160 мм) *srpn*-волокна с шагом спирали $L_s = 5$ мм приводит к тому, что на длине 160 мм устанавливается спиральная структура с шагом $L_\Omega = 4,84$ мм (знак (+) в формуле (5)), если механическое кручение осуществляли в ту же сторону, что и

у встроенной структуры волокна или устанавливается спиральная структура с шагом $L_{\Omega} = 5,16$ мм (знак $(-)$ в формуле (5)), если механическое кручение осуществляли в противоположную сторону.

Предположим на входе в *srin*-волокно излучение циркулярно поляризованное, что на практике соответствует максимальной чувствительности к магнитному полю. Дальнейшая эволюция ПС излучения на сфере Пуанкаре при распространении по волокну, как было отмечено выше, напоминает движение гироскопа, в котором есть нутации и прецессии. Например, для *srin*-волокна с шагом спирали $L_s = 5$ мм и встроенным линейным двулучепреломлением структуры с длиной биений $L_b = 10$ мм период одного оборота нутации составляет $L_n = L_s/2 = 2,5$ мм, а период прецессии – $L_p = 80$ мм.

Предположим, что в некоторой точке z на оси волокна включается упругое кручение, что приводит к другому значению шага спиральной структуры $L_{\Omega} \neq L_s$. Результат дальнейшей эволюции ПС будет зависеть от: 1) того на какой части нутационного витка будет находиться точка z ; 2) знака воздействия (т.е. увеличивается или уменьшается шаг спирали в результате воздействия) и 3) на какой части прецессионного витка будет находиться точка z .

Моделирование производим следующим образом. Выделяем в рассматриваемом *srin*-волокне три последовательных отрезка: 1) отрезок *srin*-волокна длиной z_1 не подвергнутый кручению вокруг оси волокна; 2) отрезок *srin*-волокна длиной $z_2 - z_1$ слабо закрученный вокруг своей оси; 3) отрезок *srin*-волокна длиной $z_3 - z_2$ также не подвергнутый кручению вокруг оси волокна и с теми же параметрами спиральной структуры, что и на отрезке z_1 . Длину $z_3 - z_2$ выбираем равной периоду прецессии для наилучшего усреднения угла эллиптичности ϵ по азимутальному углу. Такое моделирование описывает как случайные отклонения в скорости вращения заготовки, так и случайные закручивания в процессе намотки волокна на катушку.

Расчет эволюции ПС производим в Visual Basic с помощью выражений (3) следующим образом. Первоначально вводим параметры *spun*-волокна: длину биений встроенного линейного двулучепреломления L_b , формирующего спиральную структуру, и шаг этой спиральной структуры L_s . Затем вводим длину биений линейного двулучепреломления от изгиба L_{ind} , и длину биений циркулярного двулучепреломления от эффекта Фарадея L_F в качестве внешних воздействий. Далее указываем начальную точку z_{min} и конечную точку z_{max} от начала первого отрезка *spun*-волокна и значения E_{xR} , E_{xI} , E_{yR} , E_{yI} в начальной точке z_{min} . Затем производим расчет ПС по формулам (3) на интервале $z_{min} \div z_{max}$ и конечный результат расчета $E_{xR}^{нов}$, $E_{xI}^{нов}$, $E_{yR}^{нов}$, $E_{yI}^{нов}$ записываем на месте начальных значений. Тем самым подготавливаем возможность произвести расчет на следующем интервале $z_{max} = z_{min}' \div z_{max}'$ с измененными параметрами (в частности с измененными значениями L_s на L_Ω).

Пусть в начальной точке $z_{min} = 0$ в *spun*-волокно вводят циркулярно поляризованное излучение так, что на длине $z_1 = 40$ мм ($L_s = 5$ мм, $L_b = 10$ мм) ПС оказывается вблизи нулевого меридиана $\theta = 0$. При возбуждении ПС вблизи полюса чувствительность первого отрезка не меняется $\eta = 0,802$ и определяется отклонением ПС от полюса к экватору (рис. 2а).

Далее рассмотрим, как будут себя вести ПС при дальнейшем распространении излучения через последующие волоконные отрезки. В точке $z_1=40$ мм включаем упругое кручение соответствующее $L_s = L_\Omega = 5,16$ мм и на отрезке $z_2 - z_1$ от 40 мм до 41,25 мм вычисляем по формулам (3) как меняется ПС. Затем вычисляем ПС в третьем невозмущенном отрезке ($L_s=5,0$ мм) $z_3 - z_2 \sim 41,25 \div 123,75$ мм получаем среднюю чувствительность на целом прецессионном витке (на остальных прецессионных витках чувствительность будет повторяться). При этом ПС сползают к экватору и магнитная чувствительность уменьшается до $\eta = 0,208$ вопреки логике. Поведение ПС иллюстрирует рис. 2, где приведены эволюции ПС и магнитные чувствительности на указанных трех отрезках: z_1 (рис. 2а), z_2-z_1 (рис. 2б) и z_3-z_2 (рис. 2с). Видно, что выбраны были такие значения z_1 и z_2 , которые

привели к максимальному уменьшению магнитной чувствительности волокна (от $\eta = 0,802$ до $\eta = 0,208$). Следует, однако, подчеркнуть, что ослабление чувствительности происходит практически в любой точке z_2 . По мере переноса точки воздействия упругим вращением z_{min} ближе к полюсу, чувствительность повышается (см. таблицу 1).

Таблица 1. Магнито-оптическая чувствительность η srip-волокна для разных положений на нутационном витке точки воздействия упругим вращением отрезка z_2-z_1 .

L_{Ω} , мм	$z_{min} = z_2$, мм	Доля нутационного витка	z_3-z_2 , мм	η , отн.ед.
5,16	40,0	0	80,0	0,5164
5,16	40,3125	1/8	80,0	0,5456
5,16	40,625	1/4	80,0	0,6304
5,16	41,0	0,4	80,0	0,7583
5,16	41,1	0,44	80,0	0,7822
5,16	41,25	0,5	80,0	0,7962

Из таблицы видно, что наиболее сильное уменьшение чувствительности наблюдается в точке наиболее удаленной от полюса сферы Пуанкаре в нутационном витке.

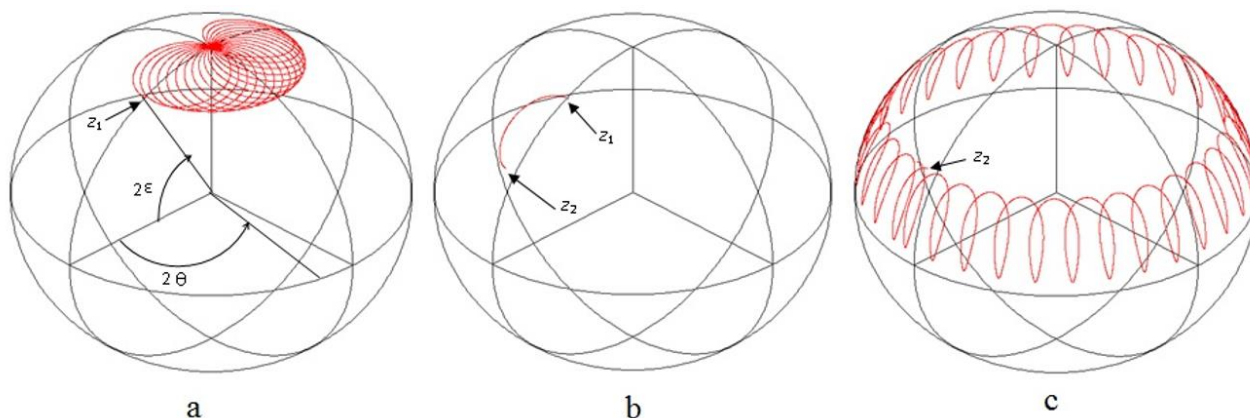


Рис. 2. Эволюция ПС при возбуждении srip-волокна циркулярно поляризованным излучением:

а) Начальный невозмущенный кручением отрезок:

$$L_s = 5 \text{ мм}, L_b = 10 \text{ мм}, z_{min}=0, z_{max}= z_1 = 40 \text{ мм}, \eta = 0,802;$$

б) В присутствии дополнительного упругого кручения вокруг оси волокна:

$$L_{\Omega} = 5,16 \text{ мм}, z_{min}= z_1 = 40 \text{ мм}, z_{max}= z_2 = 41,25 \text{ мм}, \eta = 0,5154;$$

с) Без кручения, $L_s = 5 \text{ мм}, z_{min}= z_2 = 41,25 \text{ мм}, z_{max} = z_3 = 123,75 \text{ мм}, \eta = 0,208,$

ϵ – угол эллиптичности, θ – азимутальный угол.

Повторное включение упругого кручения вокруг оси $srin$ -волокна приводит к отрицательному значению чувствительности $\eta = -0,102$, то есть на этом участке эффект Фарадея не накапливается, а ослабевает.

Для более полного представления мы построили график зависимости магнитной чувствительности $srin$ -волокна от протяженности скрученного отрезка $z_2 - z_1$ и привели его на рис. 3. На графике видны четкие периоды нутации (2,5 мм) и половина периода прецессии (40 мм). Видно также, что в процессе прохождения нутационного витка ПС может оказаться в циркулярном состоянии в момент включения упругого вращения, тогда реализуется максимальная чувствительность (с $L_s = L_\Omega = 5,16$ мм) $\eta = 0,7962$. Если же ПС оказывается на противоположной стороне нутационного витка, реализуется минимальная чувствительность. При движении вдоль прецессионного витка происходит сближение максимальной и минимальной магнитной чувствительности к значению $\eta = 0,5$.

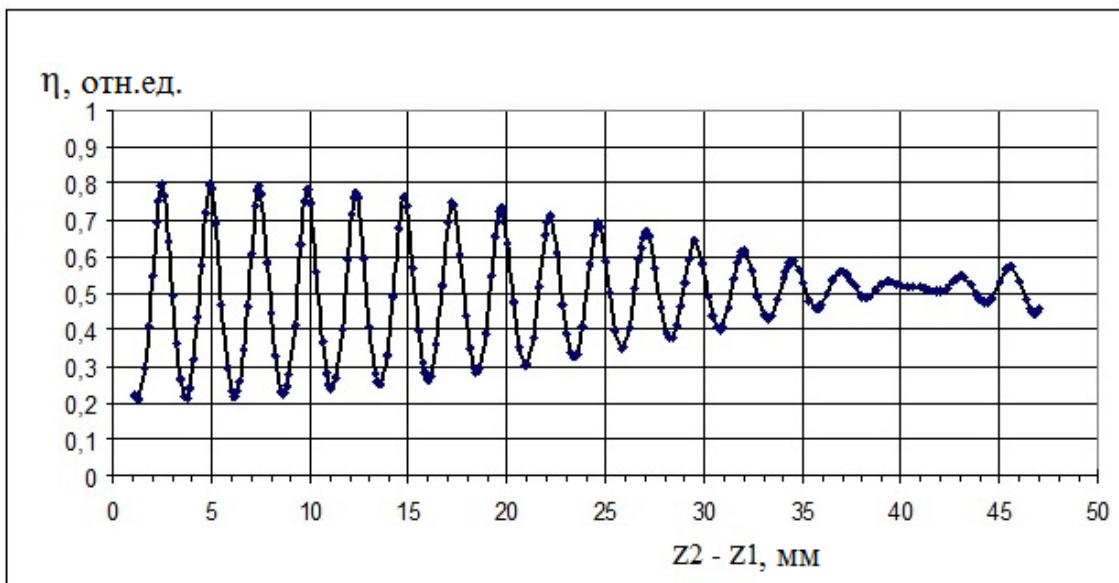


Рис. 3. Чувствительность $srin$ -волокна в зависимости от длины упруго скрученного вокруг оси второго отрезка $z_2 - z_1$, $L_s = 5,16$ мм.

2.2 Учет изгиба волокна по фиксированному радиусу

Рассмотрим типичное воздействие изгиба при намотке spun-волокна на катушку. Ранее на рис. 1 видно, что изгиб приводит к смещению ПС к экватору, это ведет к уменьшению магнитной чувствительности волокна. Таким образом, чувствительность понижается еще до отрезка 2 (z_2-z_1) с упругим кручением и отрезка 3 (z_3-z_2) с первоначальными параметрами. После учета влияния этих отрезков чувствительность падает еще на 20% как показано в таблице 2:

Таблица 2. Магнито-оптическая чувствительность spun-волокна с учетом изгиба и кручения.

	$z_1, \text{мм}$	$L_\Omega, \text{мм}$	$z_2-z_1, \text{мм}$	η_1	$L_s, \text{мм}$	$z_3-z_2, \text{мм}$	η_3
Без изгиба	40	5,16	118,75	0,516	5,0	200	0,209
Изгиб: $R = 20 \text{ мм}$ $L_{ind} = 1200 \text{ мм}$	40	5,16	118,75	0,473	5,0	200	0,167

2.3 Исходное ПС – состояние, сохраняющее эллиптичность в spun-волокне

Известно [2-4], что в spun-волокнах отсутствуют собственные состояния, однако, обнаруживаются ПС сохраняющие величину эллиптичности с углом эллиптичности ε ($\text{tg}\varepsilon = b/a$; a, b , – полуоси эллипса поляризации). В частности, для spun-волокна с параметрами $L_b = 10 \text{ мм}$, $L_s = 5 \text{ мм}$ угол эллиптичности $\varepsilon = 38,0^\circ$. В этом случае эволюция ПС осуществляется при постоянном угле эллиптичности ε и непрерывно меняющемся азимутальном угле θ . На глобусе Пуанкаре это выглядит как тонкое кольцо при постоянном значении широты 2ε (рис. 4а). Если за начальные значения принять любую точку этого кольца, то эволюция ПС пойдет также строго по этому же кольцу. Если же незначительно изменить шаг спирали L_s (слабая скрутка вокруг оси отрезка z_2-z_1 волокна), то эволюция ПС будет представлять нутационные кольца, покачивающиеся относительно полюса и поворачивающиеся согласно прецессии, как показано на рис. 4б. При этом ПС также слабо отклоняются по широте 2ε , если значения шагов спирали L_s и L_Ω отличаются незначительно.

Чтобы выяснить влияние закрученного участка на чувствительность *srpn*-волокна в случае возбуждения ПС с сохранением эллиптичности можно использовать модель изложенную выше.

Расчет, аналогичный проделанному ранее, показывает, что на первых двух отрезках не происходит существенного понижения чувствительности, однако, при возвращении к первоначальным параметрам на отрезке 3 происходит резкое понижение магнитной чувствительности (рис. 4с).

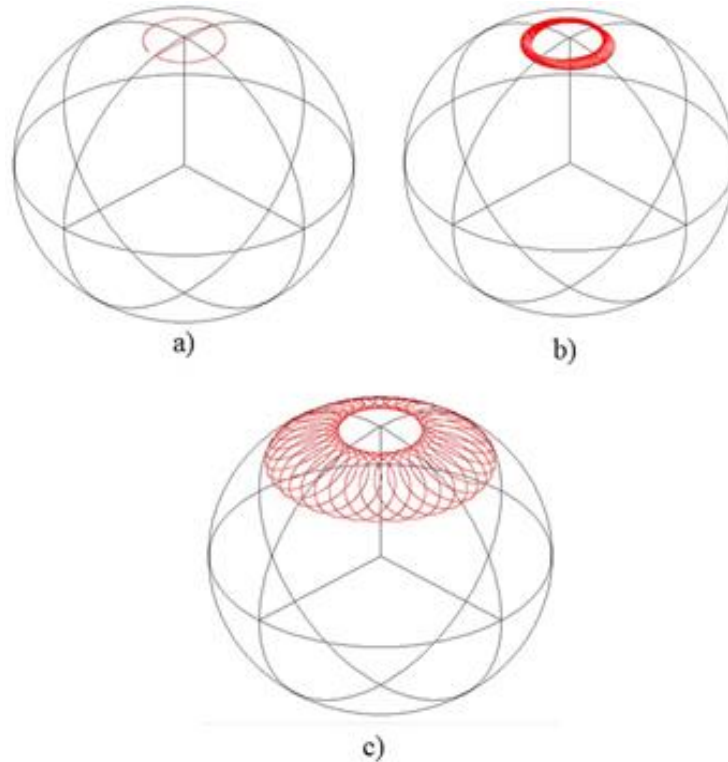


Рис. 4. Эволюция ПС при возбуждении *srpn*-волокна ПС, сохраняющими эллиптичность в *srpn*-волокне:

- a) Первый отрезок (без кручения): $L_s = 5$ мм, $L_b = 10$ мм, $z_1 = 2,4$ мм, $\eta = 0,844$;
- b) Второй отрезок (с кручением): $L_\Omega = 5,16$ мм, $L_b = 10$ мм, $z_2 = 42,4$ мм, $\eta = 0,838$;
- c) Третий отрезок (без кручения): $L_s = 5$ мм, $L_b = 10$ мм, $z_3 = 122,4$ мм, $\eta = 0,668$.

Заключение

Мы рассмотрели влияние упругих кручений *srpn*-волокна вокруг его оси на поляризационные свойства и магнито-оптическую чувствительность. Подобные кручения могут возникать как при вытяжке волокна, так и при его укладке в чувствительный контур волоконно-оптического датчика тока. Анализ был основан на модельном представлении *srpn*-волокна в виде трех

последовательных отрезков, средний из которых испытывал упругое кручение волокна вокруг его оси, а в начальном и конечном отрезках кручение отсутствовало. Для расчета поляризационных состояний светового излучения в *srpn*-волокне использовалась дифференциальная матрица. Получаемые значения ПС для наглядности отображались на сфере Пуанкаре. По средней эллиптичности каждого волоконного отрезка определялась магнитооптическая чувствительность. Был рассмотрен большой набор входных ПС, включая ПС, сохраняющие собственную эллиптичность в *srpn*-волокне. Мы показали, что упругие кручения вокруг оси волокна, в том числе случайные, могут приводить к сравнительно быстрой деградации чувствительности к магнитному полю у *srpn*-волокон, причем величина деградации чувствительности определяется поляризационным состоянием излучения на входе волоконного участка, подвергнутого кручению. Чем более удалено входное ПС от циркулярной поляризации, тем меньше чувствительность участка *srpn*-волокна. Интересным является установленный факт, что на волоконном участке следующим после закрученного, и имеющем параметры начального участка, чувствительность не восстанавливается до чувствительности исходного участка, а продолжает снижаться. Представленный анализ показывает, что закручивание отдельных участков волокна приводит к появлению неоднородной магнитооптической чувствительности по длине *srpn*-волокна, и это является негативным фактором для практического использования. В частности, волоконно-оптический датчик тока с чувствительным контуром на *srpn*-волокне с закрученными вокруг оси участками может стать восприимчивым к влиянию магнитных полей внешних токовых шин, что ухудшит точностные характеристики датчика. Для минимизации паразитного эффекта необходимо до укладки *srpn*-волокна в чувствительный контур (особенно с большим числом витков) освободить *srpn*-волокно от случайных упругих закруток в предыстории волокна и не допускать появлений осевых закручиваний волокна в процессе укладки.

Финансирование: Работа выполнена в рамках Государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Laming R.I., Payne D.N. Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers // J. Lightwave Technology. –1989. – V.7. –№12. – P. 2084-2089.
2. Morshnev S.K., Gubin V.P., Isaev V.A., Starostin N.I., Sazonov A.I., Chamorovsky Yu.K., Korotkov N.M. Concerning the Question about Physycal Model of Birefringent Spun Fiber // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). –2008. – V.17. – №4. – P. 258-262.
3. Morshnev S.K., Gubin V.P., Vorob'ev I.L., Starostin N.I., Sazonov A.I., Chamorovsky Yu.K., Korotkov N.M. Spun optical fibres: A helical structure of linear birefringence or circular birefringence? // Kvantovaya Elektronika. – 2009. –V.39. –№3. – P.287–292. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n03ABEH013945>
4. Azzam R.M.A., Bashara N.M. Ellipsometry and polarized light. – North-Holland Publishing Company. – 1977. –400 p.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Механика. – М.: Наука, 1983. –500 с.
6. Przhiyalkovsky Ya. V., Morshnev S. K., Starostin N. I., Gubin V. P., Propagation of polarized light in bent hi–bi spun fibres // Kvantovaya Elektronika. – 2015. V.45. №11. P.1075-1082. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n11ABEH015813>
7. Przhiyalkovskiy Ya.V., Morshnev S.K., Starostin N.I., Gubin V.P. Propagation of broadband optical radiation in a spun high-birefringent fibre // Kvantovaya Elektronika. – 2013. – V.43. – №2. – P.167–173. <https://doi.org/10.1070/QE2013v043n02ABEH014952>
8. Rashleigh S.C. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers // J. Lightwave Technology. – 1983. – V.1 – №2. – P.312-331.

Для цитирования:

Моршнев С.К., Старостин Н.И., Пржиялковский Я.В., Сазонов А.И. Магнито-оптическая чувствительность spun-волокна при наличии осевого механического скручивания // Журнал радиоэлектроники. –2024. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.11>