

# Экспериментальное исследование взаимного влияния волоконных фарадеевских элементов в интерферометре на s-pin-волокне

В.П.Губин, С.К.Моршнев, Я.В.Пржиялковский, Н.И.Старостин, А.И.Сазонов

*Исследуется цельноволокнный линейный отражательный интерферометр, который содержит два фарадеевских волоконных контура и линию связи между ними, выполненные из s-pin-волокна. Экспериментально установлено, что в таком интерферометре имеет место взаимное влияние контуров. Оно выражается в появлении дополнительного фазового сдвига выходной характеристики (отклика) интерферометра, зависящего от циркулярного двулучепреломления, индуцированного эффектом Фарадея в обоих контурах. Кроме того, происходит изменение контраста интерферометра и магнитооптической чувствительности одного из контуров. Вероятным физическим механизмом обнаруженного эффекта является распределенная связь ортогонально поляризованных волн в волоконной среде, вызванная изгибом волокна при намотке контуров.*

**Ключевые слова:** эффект Фарадея, s-pin-волокно, линейный интерферометр.

## 1. Введение

В настоящей работе исследован эффект, который обнаружен в волоконно-оптическом датчике тока, основанном на эффекте Фарадея и содержащем два чувствительных элемента в линейном отражательном интерферометре на основе s-pin-волокна с высоким двулучепреломлением [1]. Эффект Фарадея – это возникновение циркулярного двулучепреломления (ДЛП) в оптическом волокне, находящемся в продольном магнитном поле, в результате чего ортогональные циркулярно поляризованные световые волны распространяются с разными скоростями, и между ними накапливается разность фаз  $\varphi_F$  (фазовый сдвиг Фарадея), пропорциональная магнитному полю (току). Оптический интерферометр, с помощью которого измеряют фазовый сдвиг, обычно включает в себя два элемента – фазосдвигающее устройство (модулятор) и чувствительный контур [2]. В работе [1] была предложена схема интерферометра, в которой оба элемента выполнены из магниточувствительного волокна (s-pin-волокна) и соединены через такое же волокно. Было высказано предположение, что в рассматриваемой схеме может иметь место взаимное влияние этих двух волоконных фарадеевских элементов интерферометра. Проведенные эксперименты подтверждают его. Обнаруженный эффект может проявляться в виде нелинейности выходной характеристики датчика тока. Цель настоящей работы – экспериментальное исследование обнаруженного эффекта.

## 2. Экспериментальная установка

Для экспериментального исследования взаимного влияния фарадеевских элементов был создан линейный отражательный интерферометр, схема которого представлена на рис.1. Регистрация отраженного света осуществлялась на выходе ответвителя 2 с помощью фотодиода 9. Напряжение с выхода фотодиода измеряли цифровым вольтметром.

Особенностью интерферометра является то, что он целиком выполнен на основе магниточувствительного s-pin-волокна и содержит фарадеевские волоконные элементы (фарадеевские ротаторы) в общем волоконном тракте: первый – устройство для динамического или статического сдвига фаз, второй – чувствительный контур (в датчике тока). Для краткости будем называть их первым и вторым фарадеевским ротатором. Собственно интерферометр образован элементами от поляризатора до зеркала. В интерферометре распространяются две ортогонально поляризованные световые волны, поляризационные состояния (ПС) которых в общем случае являются эллиптическими [3–6]. В отсутствие магнитного поля в ротаторах интерферометр имеет нулевую разность хода для циркулярных компонент волн ортогональных поляризаций (т.е. он является взаимным устройством), поскольку при отражении от зеркала циркулярно поляризо-

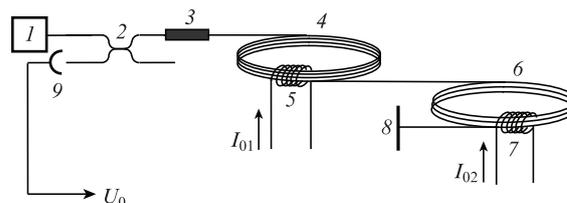


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – источник излучения; 2 – направленный ответвитель; 3 – поляризатор; 4 – контур модулятора (первый ротатор); 5, 7 – соленоид; 6 – чувствительный контур (второй ротатор); 8 – зеркало; 9 – фотодиод;  $I_{01}$  и  $I_{02}$  – токи.

В.П.Губин, С.К.Моршнев, Я.В.Пржиялковский, Н.И.Старостин, А.И.Сазонов. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, просп. Введенского, 1; ЗАО Профотек, Россия, 121357 Москва, Верейская ул., 17; e-mail: yankus.p@gmail.com, nis229@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 27 мая 2014 г., после доработки – 4 августа 2014 г.

ванные компоненты волн меняются на ортогональные: правая поляризация переходит в левую, и наоборот, так что обе волны после полного обхода будут иметь одинаковые фазовые набег. Магнитное поле из-за эффекта Фарадея вносит некомпенсируемый сдвиг фаз  $\varphi_F$  между волнами, поэтому излучение на выходе интерферометра будет линейно поляризованным с поворотом плоскости поляризации на  $\varphi_F/2$ . Анализ интенсивности света, проходящего на фотодиод, позволяет вычислить искомый фазовый сдвиг  $\varphi_F$ , пропорциональный магнитному полю (току).

В качестве источника оптического излучения использовался эрбиевый волоконный излучатель на длине волны 1.55 мкм с выходной мощностью 30 мВт и шириной спектра излучения 25 нм.

Элементы интерферометра (волоконные контуры и линия связи) были выполнены из традиционного s-pm-волокна с длиной биений встроенного линейного ДЛП  $L_b = 8$  мм и длиной шага вращения осей ДЛП  $L_{tw} = 3$  мм. S-pm-волокно ротаторов было намотано на кварцевые трубки диаметром  $D = 20$  мм и длиной 100 мм. Продольное магнитное поле в волокне ротатора создавалось тороидальным соленоидом из медного провода, витки которого проходили через внутреннее отверстие кварцевой трубки и охватывали ее снаружи. Первый по схеме ротатор содержал  $N_{11} = 9000$  витков волокна и  $N_{12} = 50$  витков медного провода, аналогичные параметры второго ротатора –  $N_{21} = 4484$  и  $N_{22} = 60$  витков.

### 3. Методика эксперимента

Постоянная составляющая  $U_0$  напряжения на выходе фотодиода как функция токов в соленоидах ротаторов может быть представлена следующим соотношением:

$$U_0 = U_{00}[1 + K_n \cos(\varphi_{F1} + \varphi_{F2} + \Delta\varphi_n)], n = 1, 2, \quad (1)$$

$$\varphi_{F1} = a_1 I_{01} = 4VS_1 N_{11} N_{12} I_{01}, \quad (1a)$$

$$\varphi_{F2} = a_2 I_{02} = 4VS_2 N_{21} N_{22} I_{02}. \quad (1б)$$

Здесь  $U_{00}$  – среднее значение напряжения на выходе фотодиода;  $K_n$  – контраст (видность) интерферометра;  $\varphi_{F1}$  и  $\varphi_{F2}$  – фазовые сдвиги в первом и втором ротаторе;  $I_{01}$  и  $I_{02}$  – токи в соленоидах первого и второго ротатора;  $V \approx 7 \times 10^{-7}$  рад/А – постоянная Верде для кварцевого волокна;  $S_1, S_2$  – относительная магнитооптическая чувствительность s-pm-волокна в данном ротаторе по отношению к идеальному волокну. Величина  $\Delta\varphi_n$  – это постоянная фазовая добавка, обнаруженная в настоящей работе. Соотношение (1) представляет собой выходную характеристику (отклик) линейного отражательного интерферометра с двумя ротаторами. Индексы  $n = 1$  или  $2$  соответствуют выходной характеристике, когда независимой переменной является ток в первом или втором ротаторе соответственно.

Соотношение (1) было использовано для оценки искажения характеристики интерферометра вследствие взаимного влияния ротаторов. В настоящей работе эта характеристика определяется параметрами  $U_{00}, K_n, S_1, S_2, \Delta\varphi_n$ .

В эксперименте измерялись выходные характеристики  $U_0(I_{01})$  при  $I_{02} = \text{const}$  и  $U_0(I_{02})$  при  $I_{01} = \text{const}$ . На рис.2

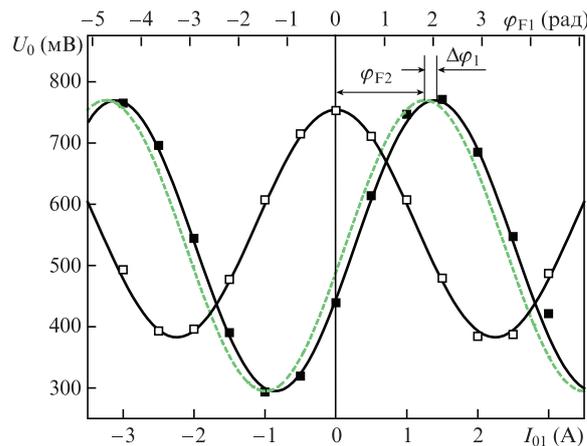


Рис.2. Выходные характеристики интерферометра, измеренные при изменении тока в первом ротаторе и токах во втором ротаторе  $I_{02} = 0$  (□) и  $-2$  А (■).

представлены зависимости  $U_0(I_{01})$  первого ротатора, измеренные при двух значениях постоянного тока  $I_{02}$  во втором ротаторе. Методика обработки измеренных данных заключалась в определении параметров с использованием соседних экстремумов характеристики и подгонки методом наименьших квадратов. Так, например, можно точно измерить токи  $I_{01\text{max}}$  и  $I_{01\text{min}}$  в экстремумах характеристики  $U_0(I_{01})$  при  $I_{02} = \text{const}$ , т. е. для  $\cos(\varphi_{F1} + \varphi_{F2} + \Delta\varphi_1) = 1$  и  $\cos(\varphi_{F1} + \varphi_{F2} + \Delta\varphi_1) = -1$  соответственно (см. рис.2). Затем, используя соотношение

$$\varphi_{F1} + \varphi_{F2} + \Delta\varphi_1 = 0, \quad (2)$$

можно определить величину добавки:

$$\Delta\varphi_{F1} = -(\varphi_{F1} + \varphi_{F2}) = -(a_1 I_{01\text{max}} + a_2 I_{02}). \quad (3)$$

Из этих же измерений

$$S_1 = \frac{\pi}{4VN_{11}N_{21}(|I_{01\text{max}} - I_{01\text{min}}|)}, \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{U_{01\text{max}} - U_{01\text{min}}}{U_{01\text{max}} + U_{01\text{min}}}, \quad (5)$$

где  $U_{01\text{max}}$  и  $U_{01\text{min}}$  – значения характеристики в экстремумах. Более точное определение указанных параметров проводилось подгонкой соотношения (1) к экспериментальным точкам всей измеренной характеристики по методу наименьших квадратов.

Сплошные кривые на рис.2 – результат расчета по соотношению (1). Параметры  $U_{00}, K_1, S_1, S_2$  этих кривых определены по вышеизложенной методике, причем  $S_1 = 1.109, S_2 = 1.164$  для  $I_{02} = -2$  А и  $S_1 = 1.112$  для  $I_{02} = 0$ . Для  $\Delta\varphi_1$  указаны два значения: штриховая кривая рассчитана для тока  $I_{02} = -2$  А при  $\Delta\varphi_1 = 0$ , а сплошная кривая – при  $\Delta\varphi_1 = -0.195$  рад. Из рис.2 следует, что при  $I_{02} = -2$  А эксперимент соответствует расчету при  $\Delta\varphi_1 = -0.195$  рад. Кроме того, из рис.2 видно, что при наличии тока во втором ротаторе заметно увеличивается контраст интерферометра.

Аналогичная процедура проводилась при измерениях характеристики второго ротатора  $U_0(I_{02})$  при  $I_{01} = \text{const}$ .

### 4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.3 показаны зависимости фазовой добавки  $\Delta\varphi_1$  и контраста  $K_1$  первого ротора от тока  $I_{02}$  во втором роторе, а на рис.4 – зависимости фазовой добавки  $\Delta\varphi_2$  и контраста  $K_2$  второго ротора от тока  $I_{01}$  в первом роторе.

На рис.5 приведены зависимости относительной магнитооптической чувствительности  $S$  одного ротора от фазового сдвига  $\varphi_F$  в другом роторе.

Проведенные эксперименты указывают на существование в интерферометре с двумя фарадеевскими волоконными контурами нового физического эффекта – взаимного влияния контуров. Важно подчеркнуть, что наблюдаемые закономерности не обусловлены техническими несовершенствами экспериментальной установки, к которым относятся магнитные поля рассеяния соленоидов, нагрев контуров при протекании токов в соленоидах и т.п. Эксперименты проводились при различных расположении контуров (на расстоянии от 10 см до 2 м) и ориентации их осей. Температура spin-волокна контуров, в принципе, влияет на магнитооптическую чувствительность, однако это влияние было небольшим ввиду слабого нагрева (несколько градусов).

Анализ отмеченных факторов не выявил их вклада в полученные экспериментальные результаты, которые можно сформулировать следующим образом. Во-первых, это возникновение фазовой добавки к характеристике интерферометра, измеренной по току в одном роторе, при наличии постоянного магнитного поля (тока) в дру-

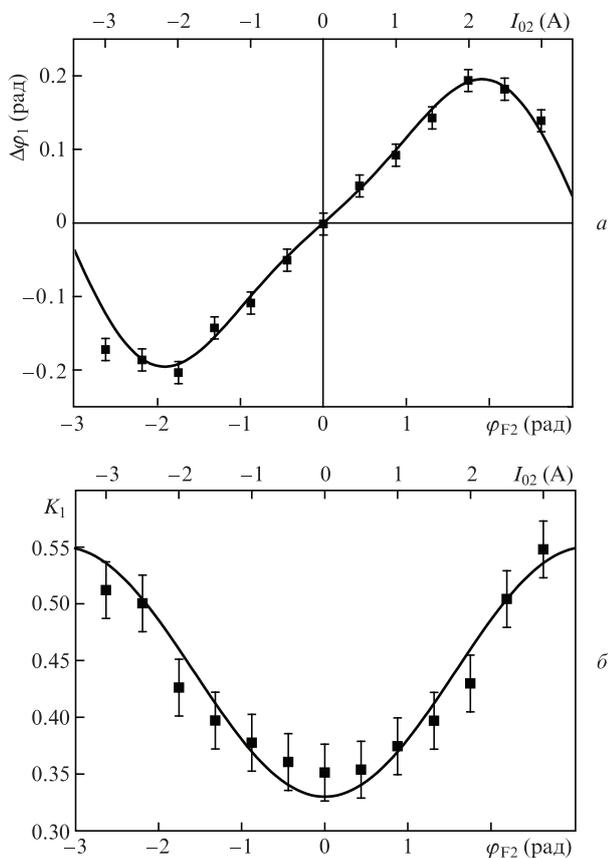


Рис.3. Зависимости фазовой добавки (а) и контраста (б) характеристики первого ротора от тока во втором роторе.

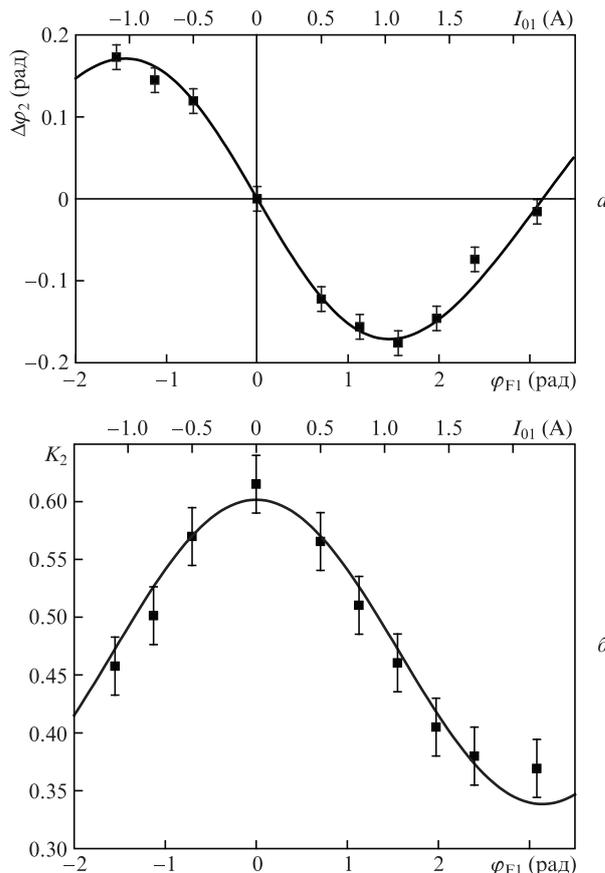


Рис.4. Зависимости фазовой добавки (а) и контраста (б) характеристики второго ротора от тока в первом роторе.

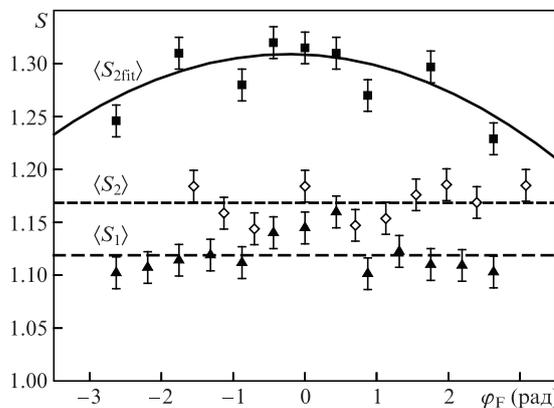


Рис.5. Зависимости  $S_1(\varphi_{F2})$  ( $\blacktriangle$ , расчет по формуле (4)),  $S_2(\varphi_{F1})$  ( $\diamond$ , расчет по формуле, аналогичной (4)), а также  $S_{2fit}(\varphi_{F1})$  ( $\blacksquare$ , расчет по формуле (2) в отсутствие фазовой добавки ( $\Delta\varphi_1 = 0$ )).

гом роторе. Знак добавки зависит от направления тока, а ее величина является функцией тока. Во-вторых, это изменение контраста (видности) интерферометра. Кроме того, имеет место небольшое изменение магнитооптической чувствительности одного из волоконных роторов (первого) в рассматриваемом интерферометре.

Так, характеристика одного ротора, например первого,  $U_0(\varphi_{F1})$ , смещается по оси абсцисс не только на величину фарадеевского сдвига  $\varphi_{F2}$  во втором роторе, но и испытывает дополнительный фазовый сдвиг  $\Delta\varphi_1$  (см. рис.2). Аналогичный фазовый сдвиг  $\Delta\varphi_2$ , но противоположного знака, имеет место для характеристики  $U_0(\varphi_{F2})$

при постоянном сдвиге  $\varphi_{F1}$  в первом ротаторе. Следует подчеркнуть, что возникновение фазовой добавки требует наличия циркулярного ДЛП от эффекта Фарадея в обоих ротаторах.

Фазовая добавка вычисляется из подгонки расчетных параметров соотношения (1) и характеристики интерферометра, измеряемой экспериментально. При этом важно знать точные значения магнитооптической чувствительности ротаторов во всем диапазоне токов. Приведенные на рис.5 зависимости  $S_1(\varphi_{F2})$  и  $S_2(\varphi_{F1})$  вычислялись из соотношения (4) по расстоянию между соседними экстремумами измеренной характеристики. Видно, что средние значения чувствительности первого и второго ротатора в диапазоне рабочих токов (фазовых сдвигов Фарадея) различаются:  $\langle S_1 \rangle = 1.119$ ,  $\langle S_2 \rangle = 1.168$ , причем разница немного превышает ошибку измерений (1%–2%). Причину этого различия мы не анализировали. Из рис.5 также видно, что значение  $S_2$  в пределах ошибки измерений не зависит от циркулярного ДЛП в первом ротаторе. Среднее значение  $S_2$  практически совпадает со значением при нулевом токе ( $S_2 = 1.164$ ). В то же время  $S_1$  с ростом по модулю  $\varphi_{F2}$  немного уменьшается. Наличие зависимости  $S_1(\varphi_{F2})$  мы связываем с взаимным влиянием ротаторов.

Необходимо отметить, что хорошее согласие расчета и эксперимента можно получить и при нулевой фазовой добавке, если при расчете подгонять величину  $S_2$ , которая, вообще говоря, может изменяться из-за взаимного влияния ротаторов. Однако полученная при такой подгонке зависимость  $S_{2fit}(\varphi_{F1})$  (рис.5) сильно завышает чувствительность, особенно при малых  $\varphi_{F1}$ . Так, при малых токах  $S_{2fit} \approx 1.3$ , что не согласуется со значением  $S_2 = 1.164$ , измеренным при нулевом токе первого ротатора. Поэтому ситуацию с отсутствием фазовой добавки мы считаем нереалистичной. Повторим, что согласно нашим экспериментам величину  $S_2$  можно считать постоянной.

Следует отметить, что в наших измерениях значения  $S_1$  и  $S_2$  оказались больше единицы. Этот факт мы объясняем отличием постоянной Верде в нашем s-pun-волокне от ее значения для чистого кварца, принятого при расчетах.

Величина фазовой добавки в одном ротаторе периодически зависит от циркулярного ДЛП в другом ротаторе. Показанные на рис.3,а и 4,а аппроксимации зависимостей  $\Delta\varphi_1 = 0.18\sin(\varphi_{F2}) - 0.04\sin(2\varphi_{F2})$  и  $\Delta\varphi_2 = -0.17\sin(\varphi_{F1}) - 0.01\sin(2\varphi_{F1})$  удовлетворительно согласуются с экспериментом.

Зависимость контраста интерферометра от циркулярного ДЛП в одном из ротаторов также имеет периодический вид, удовлетворительно аппроксимируемый косинусоидальной функцией фазового сдвига Фарадея (рис.3,б и 4,б):  $K_1 = 0.47[1 - 0.28\cos(\varphi_{F2})]$  и  $K_2 = 0.48[(1 + 0.25\cos(\varphi_{F1}))]$ .

Таким образом, экспериментально установлено взаимное влияние волоконных фарадеевских контуров (ротаторов) в общем тракте интерферометра, выполненного из s-pun-волокна. Математическая модель такого эффекта пока не разработана. Приведем его возможное объяснение. Ротаторы в данной схеме находятся в разных условиях. Во втором ротаторе прямая и обратная световые волны в процессе взаимодействия со «своим» магнитным полем не проходят через среду первого ротатора. В то же время в первом ротаторе прямая волна проходит через среду второго ротатора после взаимодействия со своим магнитным полем, а обратная волна – до начала этого взаимодействия. В среде второго ротатора наведено циркулярное ДЛП из-за невязанного эффекта Фарадея. Мы предполагаем, что причиной добавки является изгиб волокна из-за намотки в контур. В изогнутом волокне каждая волна становится суперпозицией ортогонально поляризованных волн, связанных друг с другом. Эта распределенная по волокну связь может вызывать изменение первоначально накопленной фазы каждой волны, проходящей через рассматриваемую среду с «невязанным» циркулярным ДЛП, т.е. быть причиной фазовой добавки в первом ротаторе. Поскольку ДЛП обусловлено невязанным эффектом Фарадея, компенсации дополнительно накопленной фазы волны при полном обходе интерферометра не происходит. Следует отметить, что величина связи волн при изгибе должна зависеть от степени анизотропии s-pun-волокна, характеризуемой параметром  $\sigma = L_{tw}/2L_b$  [6].

Что касается возникновения фазовой добавки во втором ротаторе, то она может быть следствием появления фазовой добавки в первом ротаторе, индуцированной, как было сказано, наличием ДЛП во втором ротаторе.

Мы также предполагаем, что отмеченная выше связь ортогонально поляризованных волн, индуцированная изгибом, вызывает перераспределение первоначальной мощности волны в «когерентный» и «некогерентный» каналы (оптические пути) интерферометра [7], что является причиной изменения контраста.

Для подтверждения высказанной гипотезы для трех конструкций интерферометра измерялись относительные добавки  $g = \Delta\varphi_1/\varphi_{F1}(I_{01max})$ . Полученные результаты приведены в табл.1. Видно, что уменьшение радиуса изгиба волокна  $D_2$  приводит к увеличению фазовой добавки  $\Delta\varphi_1$  (или  $g$ ). Кроме того, увеличение встроенного ДЛП (уменьшение  $L_b$ , увеличение  $\sigma$ ) повышает сопротивляемость s-pun-волокна к изгибу [8,9] и, как следствие, приводит к сокращению фазовой добавки  $\Delta\varphi_1$ , что подтверждается уменьшением относительной фазовой добавки  $g$ .

Следует отметить, что обнаруженный эффект может приводить к нелинейности выходной характеристики датчика тока на основе рассматриваемого интерферометра.

Табл.1. Зависимость добавки  $g$  от параметров второго ротатора для различных конструкций (№ 1–3) интерферометра.

№	Волокно	$L_b$ (мм)	$L_{tw}$ (мм)	Влияние изгиба	$D_2$ (мм)	$\sigma$	$S_2$	$\varphi_{F1}(I_{01max})$ (рад)	$\Delta\varphi_1$ (рад)	$g$
1	Обычное	8	3	Сильное	14	0.19	0.9385	0.90	$0.121 \pm 0.015$	0.134
2	Обычное	8	3	Среднее (наст. работа)	20	0.19	1.164	0.88	$0.092 \pm 0.015$	0.105
3	Микроструктурированное	5	3.5	Слабое	20	0.35	0.97	0.88	$0.062 \pm 0.01$	0.071

Примечание:  $D_{1,2}$  – диаметры изгиба волокна ротаторов,  $D_1 = 20$  мм.

## 5. Заключение

Экспериментально установлено, что в цельноволокном линейном отражательном интерферометре, который содержит два фарадеевских волоконных контура и линию связи между ними, выполненные из s-pun-волокна, имеет место взаимное влияние контуров: появляется дополнительный фазовый сдвиг (фазовая добавка) выходной характеристики (отклика) интерферометра, зависящий от циркулярного ДЛП в обоих контурах. Кроме того, изменяются контраст интерферометра и магнитооптическая чувствительность одного из контуров. При увеличении встроенного линейного ДЛП s-pun-волокна и/или увеличении радиуса намотки фазовая добавка уменьшается. Причиной обнаруженного эффекта может быть распределенная связь ортогонально поляризованных волн в волоконной среде, вызванная изгибом волокна. Обнаруженный эффект может приводить к нелинейности выходной характеристики датчика тока на основе рассматрива-

емого интерферометра. Для минимизации последствий данного эффекта в датчике тока с малогабаритным чувствительным контуром необходимо применять s-pun-волокно с высоким встроенным ДЛП, например микроструктурированное s-pun-волокно.

1. Старостин Н.И., Чаморовский Ю.К., Рябко М.В. и др. *Фотон-Экспресс*, № 6 (94), 38 (2011).
2. Frosio G., Dancliker R. *Appl. Opt.*, **33**, 6111 (1994).
3. Laming R.I., Payne D.N. *J. Lightwave Technol.*, **7** (12), 2084 (1989).
4. Губин В.П., Исаев В.А., Моршнев С.К. и др. *Квантовая электроника*, **36** (2), 287 (2006).
5. Michie A., Canning J., Bassett I., et al. *Opt. Express*, **15**, 1811 (2007).
6. Пржиялковский Я.В., Моршнев С.К., Старостин Н.И., Губин В.П. *Квантовая электроника*, **43** (2), 167 (2013).
7. Губин В.П., Моршнев С.К., Старостин Н.И. и др. *Квантовая электроника*, **41** (9), 815 (2011).
8. Chamorovsky Yu.K., Starostin N.I., Ryabko M.V., et al. *Opt. Commun.*, **282**, 4618 (2009).
9. Чаморовский Ю.К., Старостин Н.И., Моршнев С.К. и др. *Квантовая электроника*, **39** (11), 1074 (2009).