

Фазовая задержка поляризационных мод в упруго закрученных srip-волокнах

С.К.Моршнев, Ю.К.Чаморовский, И.Л.Воробьев

Теоретически и экспериментально исследована эволюция фазовой задержки одной из ортогональных мод с линейной поляризацией относительно другой моды в srip-волокне при упругом кручении его вокруг оси. Использовалась модель спиральной структуры осей линейного двулучепреломления, встроенного в волокно. Зависимость фазовой задержки от угла упругого кручения имеет синусоидальный характер, причем амплитуда и период синусоиды зависят от параметров волоконного световода – шага спиральной структуры и длины биений встроенного линейного двулучепреломления. Показано, что при известном шаге спиральной структуры из указанной зависимости фазовой задержки длина биений встроенного линейного двулучепреломления может быть определена в диапазоне 100–0.01 мм. Результаты экспериментов с обычными и микроструктурированными srip-волокнами подтверждают развитую теорию.

Ключевые слова: волоконный световод, srip-волокно, спиральная структура осей линейного двулучепреломления, фазовая задержка.

1. Введение

Волоконные световоды (ВС), получаемые вытяжкой из вращающейся заготовки со встроенным линейным двулучепреломлением (ДЛП), так называемые srip-волокна, известны с 1989 года [1] и находят применение, например, в датчиках магнитного поля и электрического тока [2–4]. Недавно было показано, что в srip-волокнах отсутствует встроенное циркулярное ДЛП, а свойства этих волокон определяет спиральная структура осей линейного ДЛП [4–7], образующаяся в процессе вытяжки.

Целью настоящей работы является дальнейшее изучение свойств srip-волокон, в частности при упругом кручении волокна вокруг его оси. Как известно [8], в условиях упругого кручения не только меняется шаг спиральной структуры линейного ДЛП, но и возникает циркулярное ДЛП.

Изучение зависимости фазовой задержки R одной из поляризационных мод относительно другой от угла упругого кручения srip-волокна может дать новую информацию о параметрах этого волокна, в частности о длине биений встроенного линейного ДЛП.

2. Теория

Свойства прямолинейного волокна со спиральной структурой осей встроенного линейного ДЛП описываются согласно работе [4] в базисе линейных поляризаций матрицей Джонса T [9]:

$$T \equiv \begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{vmatrix} = \frac{1}{\Omega} \begin{vmatrix} a_{11} + ib_{11} & a_{12} + ib_{12} \\ -a_{12} + ib_{12} & a_{11} - ib_{11} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= \Omega \cos \xi z \cos \Omega z + \left(\xi + \frac{\gamma}{2} \right) \sin \xi z \sin \Omega z; \\ a_{12} &= -\Omega \sin \xi z \cos \Omega z + \left(\xi + \frac{\gamma}{2} \right) \cos \xi z \sin \Omega z; \\ b_{11} &= \frac{\Delta\beta}{2} \cos \xi z \sin \Omega z; \\ b_{12} &= \frac{\Delta\beta}{2} \sin \xi z \sin \Omega z; \end{aligned} \quad (2)$$

$\Delta\beta = 2\pi/L_b$ – скорость нарастания с увеличением длины z волокна фазовой задержки между волнами с ортогональными линейными поляризациями из-за встроенного линейного ДЛП с длиной биений L_b ; $\gamma = 2\pi/L_c$ – скорость нарастания фазовой задержки между волнами с ортогональными циркулярными поляризациями из-за циркулярного ДЛП с длиной биений L_c ; $\xi = 2\pi/L_{tw}$ – угловая скорость вращения спиральной структуры осей встроенного линейного ДЛП с шагом спирали L_{tw} ;

$$\Omega = \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{2} \right)^2 + \left(\xi + \frac{\gamma}{2} \right)^2} \quad (3)$$

– пространственная частота.

При упругом кручении закручивание прямолинейного волокна длиной z на угол φ в ту же сторону, в которую закручена спиральная структура осей ДЛП, приводит к увеличению угловой скорости ξ :

$$\xi = \frac{2\pi}{L_{tw}} + \frac{\varphi}{z} \equiv \xi_0 + \frac{\varphi}{z}. \quad (4)$$

С.К.Моршнев, Ю.К.Чаморовский, И.Л.Воробьев. Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Введенского, 1; e-mail: m137@fryazino.net, yuchamor@online.ru

При закручивании в противоположную сторону ($\varphi < 0$) величина ξ уменьшается. Кроме того, согласно работе [8] в волокне возникает циркулярное ДЛП:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\mu z}, \tag{5}$$

где для кварцевых волокон параметр $\mu = 6.85$. Физически это означает, что в волокне длиной z можно получить циркулярное ДЛП с длиной биений $L_c = z$, если сделать на длине волокна L_c около семи оборотов вокруг оси.

Известно [9], что фазовая задержка R между волнами с ортогональными линейными поляризациями приводит к возникновению результирующего эллиптического состояния поля с углом эллиптичности ε ($R = 2\varepsilon$). Эллиптичность, т. е. отношение длин малой (b) и большой (a) полуосей эллипса поляризационного состояния, связана с углом эллиптичности следующим соотношением: $\tan \varepsilon = \pm b/a$. В световоде с линейным двулучепреломлением (без кручения) фазовая задержка между волнами с ортогональными линейными поляризациями нарастает пропорционально длине волокна. В s-pun-волокнах фазовая задержка вдоль длины волокна колеблется между максимальным и минимальным значениями [10].

Рассмотрим эволюцию поляризационных состояний на комплексной плоскости [9], координаты точек χ на которой определяются отношением ортогональных компонент поля E_y и E_x :

$$\chi = u + iv = \frac{E_y}{E_x}. \tag{6}$$

Комплексная плоскость представляет собой географическую проекцию сферы Пуанкаре, где в точку $\{u, v\} = \{0, +i\}$ проецируется северный полюс сферы Пуанкаре (правая циркулярная поляризация), а в точку $\{0, -i\}$ – южный полюс (левая циркулярная поляризация). На действительную ось проецируется экватор сферы Пуанкаре, т. е. все возможные линейные поляризации, например $E||x$ проецируется в точку $\{0, 0\}$, а $E||y$ – в точку $\{\infty, \infty\}$. Широта места соответствует фазовой задержке, а долгота – удвоенному азимуту эллиптического состояния [9]. В обозначениях (2) имеем

$$\chi = \frac{(-a_{12}E_{x0} + a_{11}E_{y0}) + i(b_{12}E_{x0} - b_{11}E_{y0})}{(a_{11}E_{x0} + a_{12}E_{y0}) + i(b_{11}E_{x0} + b_{12}E_{y0})}. \tag{7}$$

На входе в ВС будем использовать линейно поляризованные состояния, различающиеся только азимутом α :

$$E_{x0} = E_0 \cos \alpha, \quad E_{y0} = E_0 \sin \alpha. \tag{8}$$

Подставляя в формулу (7) выражения (2) и (8), получаем зависимости χ от длины ВС. Некоторые из этих зависимостей, различающиеся азимутом линейной поляризации излучения на входе в ВС и линейным двулучепреломлением $\Delta\beta$, приведены соответственно на рис.1 и 2.

Из рис.1,а видно, что при возбуждении светом с поляризацией $E||x$ ($\alpha = 0$) достигается наибольшее отклонение поляризационных состояний от экватора сферы Пуанкаре, т. е. максимальная фазовая задержка, которая приблизительно равна амплитуде от пика до пика в близких к синусоидальным колебаниях фазовой задержки на рис.1,б. Следует обратить внимание на то, что возрастающие амплитуды колебаний на левом и правом краях

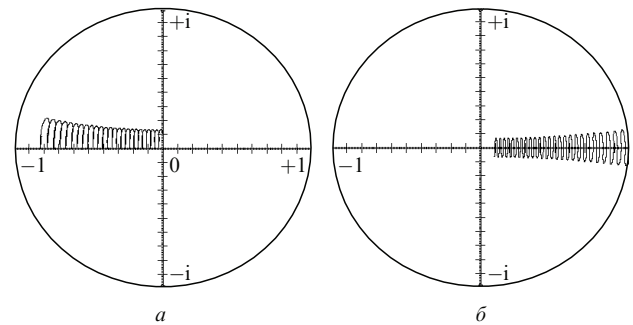


Рис.1. Эволюция (справа налево) поляризационных состояний по длине s-pun-волокна на комплексной плоскости при $L_b = 15$ мм, $L_{tw} = 4$ мм, $z = 50$ мм, азимуте линейной поляризации излучения на входе в s-pun-волокно $\alpha = 0$ (а) и 45° (б).

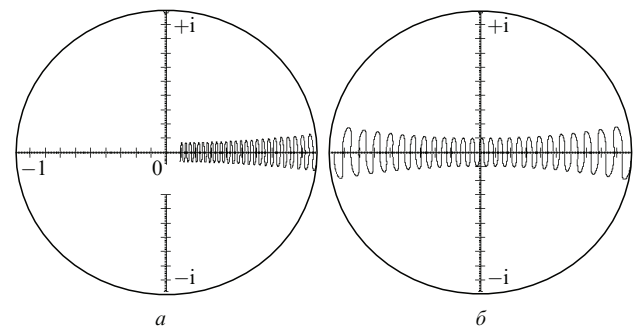


Рис.2. Эволюция (справа налево) поляризационных состояний по длине s-pun-волокна на комплексной плоскости при $L_{tw} = 4$ мм, $z = 50$ мм, $\alpha = 45^\circ$, $L_b = 15$ (а) и 10 мм (б).

рис.1,а и б соответственно есть не что иное, как искажение, связанное с проекцией сферы на плоскость.

Из рис.1 и 2 видно, что спиральная структура осей линейного ДЛП обеспечивает поворот плоскости поляризации излучения – эволюцию поляризационных состояний справа налево вдоль экватора сферы Пуанкаре, хотя встроенное в волокно циркулярное ДЛП отсутствует (более подробно см. в [7]). Из сравнения рис.2,а и б видно, что возрастание встроенного линейного ДЛП (уменьшение L_b) сопровождается увеличением не только максимальной фазовой задержки, но и азимутальной скорости вращения плоскости поляризации. Таким образом, за вращение плоскости поляризации отвечает встроенное линейное ДЛП со спиральной структурой осей. Фазовая задержка является периодической функцией длины z волокна с пространственным периодом $L_{tw}/2$, равным в нашем случае ~ 2 мм. Это создает дополнительные трудности при ее измерении, т. к. в пределах ~ 1 мм по длине волокна фазовая задержка R может измениться от максимальной до минимальной величины.

Точное значение R на выходе из ВС длиной z определяется выражением [9]

$$\sin R = \frac{2\text{Im}\chi}{1 + \chi^2}. \tag{9}$$

Используя соотношение (7), для s-pun-волокна получаем

$$\sin R = 2 \frac{(E_{x0}^2 - E_{y0}^2)(a_{11}b_{12} + a_{12}b_{11})}{\Omega^2 E_0^2} + 2 \frac{2E_{x0}E_{y0}(a_{12}b_{12} - a_{11}b_{11})}{\Omega^2 E_0^2}. \tag{10}$$

После подстановки в (10) выражений (2), (8) и тригонометрических преобразований имеем

$$\sin R = \frac{\Delta\beta (\xi + \gamma/2)(1 - \cos 2\Omega z) \cos 2\alpha - \Omega \sin 2\Omega z \sin 2\alpha}{2\Omega^2} \quad (11)$$

Из (11) видно, что фазовая задержка возникает из-за встроенного линейного ДЛП (множитель $\Delta\beta/2$) и является периодической функцией длины z волокна. При фиксированной длине z можно получить периодические изменения фазовой задержки от минимальной до максимальной величины, изменяя пространственную частоту Ω с помощью упругого кручения волокна вокруг его оси. Действительно, упругое кручение с увеличением угла $|\varphi|$, согласно выражениям (4) и (5), вызывает монотонное изменение шага спирали и величины слабого циркулярного ДЛП, что влечет за собой изменение пространственной частоты Ω (см. формулу (3)). Коэффициенты при гармонических функциях в формуле (11) в процессе кручения изменяются незначительно.

На рис. 3 приведены зависимости фазовой задержки R от угла упругого кручения φ для типичного s-pun-волокна с длиной биений $L_b = 15$ мм и шагом спиральной структуры $L_{tw} = 4$ мм, вычисленные по формуле (11). Из рис. 3, а видно, что в процессе упругого кручения фазовая задержка периодически изменяется от 0 до $\sim 15^\circ$, если свет на входе в ВС поляризован параллельно оси x волокна ($\alpha = 0$). Период колебаний равен $\sim 180^\circ$ по углу кручения. Аналогично, если свет поляризован под углом 45° к осям линейного ДЛП на входе в волокно ($\alpha = 45^\circ$), то фазовая задержка периодически изменяется примерно от -7.5° до $+7.5^\circ$ (размах колебаний – те же 15°) с таким же периодом колебаний.

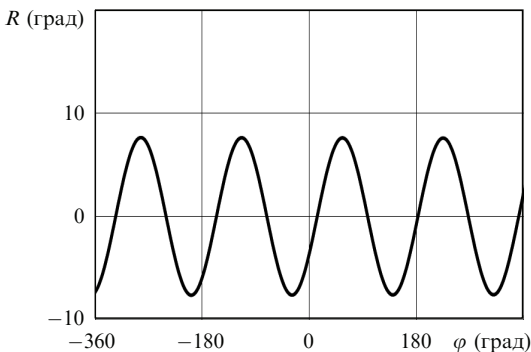
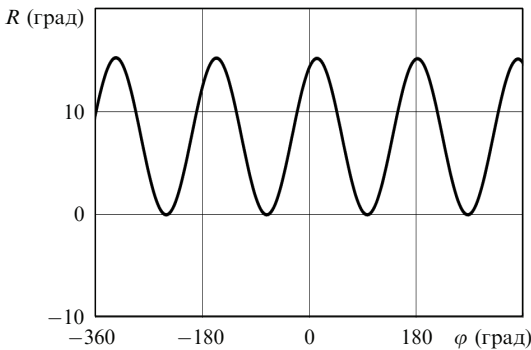


Рис. 3. Зависимости фазовой задержки R от угла упругого кручения φ s-pun-волокна длиной 1 м со встроенным линейным ДЛП при $L_b = 15$ мм, $L_{tw} = 4$ мм, $\alpha = 0$ (а) и 45° (б).

Отметим, что на рис. 3 слабое циркулярное ДЛП, возникающее при кручении, ничем не проявляется себя. Это связано с большой длиной исследуемого s-pun-волокна $z = 1$ м, при которой длина биений циркулярного ДЛП $L_c = 1$ м $\gg L_b$ реализуется при закручивании на семь оборотов. Если выбрать для кручения отрезок s-pun-волокна длиной $z = 10$ см, то амплитуда колебаний фазовой задержки заметно уменьшится при закручивании на семь оборотов (приблизительно на 20%). Циркулярное ДЛП в этом случае все еще слабое и длина его биений $L_c = 10$ см все еще превышает длину биений линейного ДЛП $L_b = 15$ мм.

Рассмотрим выражение (11). Пусть на входе в ВС свет линейно поляризован вдоль оси x ($\alpha = 0$). Тогда $\sin 2\alpha = 0$ и при упругом кручении s-pun-волокна функция $\sin R$ изменяется от нуля до максимального значения (см. формулу (11)):

$$\sin R_{\max} = 2 \frac{\Delta\beta(\xi + \gamma/2)}{2\Omega^2} \approx \frac{4\xi_0\Delta\beta}{\Delta\beta^2 + 4\xi_0^2}, \quad (12)$$

где ξ_0 – угловая скорость вращения в отсутствие упругого кручения (см. формулу (4)). Из выражения (12) видно, что максимальная фазовая задержка R_{\max} может достигнуть $\pi/2$ только при условии $\Delta\beta = 2\xi_0$, т. е. при длине биений линейного встроенного ДЛП, равной половине шага спирали: $L_b = L_{tw}/2$. Однако при дальнейшем увеличении встроенного линейного ДЛП фазовая задержка начнет убывать. Эта зависимость приведена на рис. 4.

Таким образом, получив экспериментально зависимость фазовой задержки от угла упругого кручения $R(\varphi)$ типа приведенной на рис. 3 и определив из размаха колебаний (от пика до пика) максимальную фазовую задержку, по формуле (12) можно рассчитать длину биений встроенного линейного ДЛП в довольно широких пределах – от ~ 100 до ~ 0.1 мм. Следует, однако, отметить, что функция (12) неоднозначна (рис. 4) и нужны дополнительные сведения о том, больше или меньше длина биений L_b половины шага спирали $L_{tw}/2$. У микроструктурированных s-pun-волокон длины биений могут находиться в диапазоне $L_b < 0.1$ мм [11–13], где указанный метод неточен (см. ниже).

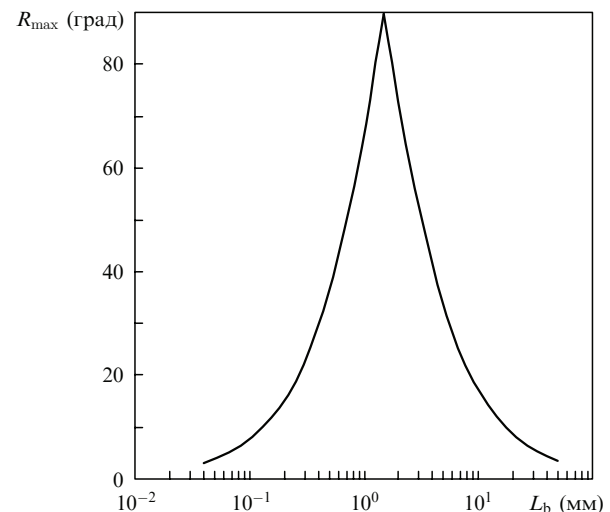


Рис. 4. Зависимость максимальной фазовой задержки R от длины биений L_b встроенного линейного ДЛП s-pun-волокна при $\alpha = 0$, $L_{tw} = 3$ мм, $z = 1$ м.

Рассмотрим теперь в этих условиях изменение периода колебаний. Для длины образца $z \sim 1$ м добавка от упругого кручения к величине ξ_0 невелика (см. формулы (4), (5)): $\varphi/z + \varphi/(2\mu z) \ll \xi_0$. Пространственная частота Ω определяется выражением

$$\begin{aligned} \Omega &\approx \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 + \xi_0^2 + 2\xi_0\left(\frac{\varphi}{z} + \frac{\varphi}{2\mu z}\right)} \\ &\approx \Omega_0 \left[1 + \frac{\xi_0}{\Omega_0^2} \left(\frac{\varphi}{z} + \frac{\varphi}{2\mu z}\right)\right], \end{aligned} \tag{13}$$

где $\Omega_0^2 = (\Delta\beta/2)^2 + \xi_0^2$. Аргумент под знаком синуса в формуле (11)

$$2\Omega z \approx 2\Omega_0 z + \frac{2\xi_0}{\Omega_0} \left(1 + \frac{1}{2\mu}\right) \varphi. \tag{14}$$

Период по углу упругого кручения $\Delta\varphi$ определяется равенством второго члена в выражении (14) значению 2π :

$$\Delta\varphi = \frac{\Omega_0}{\xi_0[1 + 1/(2\mu)]} \pi. \tag{15}$$

Из последней формулы, зная шаг спирали L_{tw} и определив из эксперимента период $\Delta\varphi$, можно найти длину биений встроенного линейного ДЛП:

$$L_b = \frac{L_{tw}}{2\sqrt{[1 + 1/(2\mu)]^2 (\Delta\varphi/\pi)^2 - 1}}. \tag{16}$$

Для микроструктурированного *srpn*-волокна $\Delta\beta \gg \xi_0$ и пространственная частота $\Omega_0 \approx \Delta\beta/2$, поэтому получаем длину биений

$$L_b = \frac{L_{tw}}{2[1 + 1/(2\mu)]} \frac{\pi}{\Delta\varphi}. \tag{17}$$

На рис.5 приведена зависимость фазовой задержки от угла упругого кручения при $\alpha = 45^\circ$, длине образца $z = 1$ м, шаге спиральной структуры $L_{tw} = 3$ мм и длине биений $L_b = 0.075$ мм. Видно, что период изменения фазовой задержки R составляет около девяти оборотов упругого кручения. Зависимость периода $\Delta\varphi$ от длины биений L_b встроенного линейного ДЛП приведена на рис.6. При уменьшении длины биений L_b период $\Delta\varphi$ быстро возрастает. Так, при $L_b = 0.01$ мм период $\Delta\varphi = 139.8\pi$, или ~ 69.9 оборотов. В эксперименте, однако, как видно из рис.5, можно определять период по наклону зависимости $R(\varphi)$.

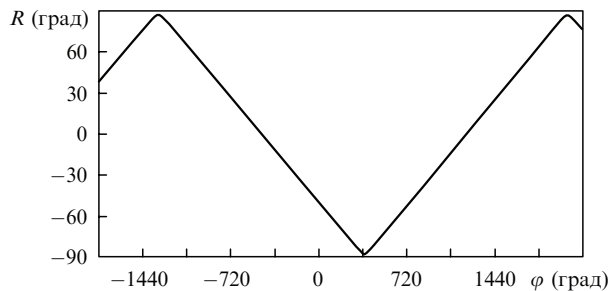


Рис.5. Зависимость фазовой задержки R от угла упругого кручения φ *srpn*-волокна длиной 1 м со встроенным линейным ДЛП при $L_b = 0.075$ мм, $L_{tw} = 3$ мм, $\alpha = 45^\circ$.

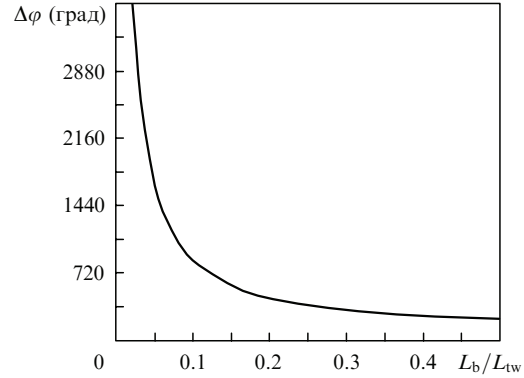


Рис.6. Период упругого кручения $\Delta\varphi$ *srpn*-волокна в зависимости от отношения длины биений L_b встроенного линейного ДЛП к шагу спиральной структуры L_{tw} .

3. Эксперимент

Схема экспериментальной установки приведена на рис.7. В качестве источника света используется полупроводниковый лазер 1, генерирующий излучение с длиной волны $\lambda = 1.55$ мкм и питаемый от стабилизатора тока 2. Объектив 3 формирует параллельный пучок света, проходящий через механический прерыватель-модулятор 4 и линейный поляризатор 5. Поворот поляризатора изменяет азимутальный угол α относительно положения осей линейного ДЛП на входе в ВС. Объектив 6 с юстировочным столиком 7 фокусирует излучение на входной торец *srpn*-волокна 8, закрепленного на площадке 9 натяжного устройства с помощью оптического клея 10. Натяжение передается нитью, перекинутой через блок 11, а его величина регулируется грузом 12 (~ 0.4 Н). Вращение ВС вокруг оси осуществляется ротором 13, на площадке которого закрепляется оптическим клеем 10 второй конец волокна. Излучение, поступающее с выхода ВС, проходит через анализатор 14 и регистрируется фотодиодом 15. Промодулированный фототок поступает на синхронный усилитель 16, сигнал с которого регистрируется цифровым вольтметром 17.

Фазовая задержка R определяется по известной формуле

$$\cos R = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \tag{18}$$

где I_{\max} и I_{\min} – интенсивности излучения, полученные при вращении анализатора 14 и характеризующие эллип-

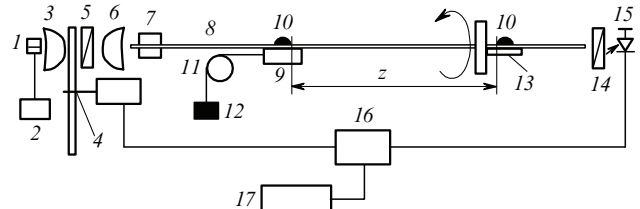


Рис.7. Схема установки для измерения фазовой задержки: 1 – источник светового излучения (полупроводниковый лазер); 2 – блок питания источника света; 3 – объектив, формирующий параллельный пучок света; 4 – механический модулятор; 5 – поляризатор; 6 – объектив для ввода излучения в ВС; 7 – юстировочное устройство; 8 – ВС; 9 – площадка натяжного механизма; 10 – оптический клей; 11 – блок; 12 – груз; 13 – площадка вращающего механизма; 14 – анализатор на выходе ВС; 15 – фотоприемник; 16 – синхронный усилитель; 17 – цифровой вольтметр.

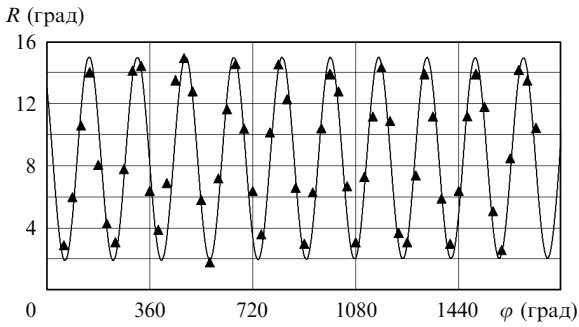


Рис.8. Расчетная зависимость фазовой задержки R от угла упругого кручения φ (сплошная кривая) для s-pm-волокна с длиной биений встроенного линейного ДЛП $L_b = 15.2$ мм, шагом спирали $L_{tw} = 3.5$ мм и длиной волокна $z = 1$ м. Точки – эксперимент.

тичность света на выходе из ВС в отсутствие дихроизма волокна.

Для проверки теории было исследовано s-pm-волокно с известным встроенным линейным ДЛП с длиной биений $L_b = 15 \pm 1$ мм [14] и шагом спиральной структуры $L_{tw} = 3.5$ мм. Результаты эксперимента приведены на рис.8. Изменение фазовой задержки от максимума до минимума составляет $13^\circ \pm 0.2^\circ$, что согласно формуле (12) дает $L_b = 15.3 \pm 0.3$ мм.

Интересным отличием экспериментальных данных от теоретических (рис.3,а) является некоторая «приподнятость» зависимости $R(\varphi)$ над осью абсцисс, что может быть связано с влиянием отрезка волокна от юстировочного столика 7 до места крепления волокна на площадке 9 натяжного устройства. Длина этого отрезка (естественно, не подвергавшегося кручению) в данном случае составляла 40 см. Рассчитанная с учетом данного отрезка зависимость показана на рис.8 сплошной кривой. Видно, что теоретические и экспериментальные результаты совпадают для длины биений $L_b = 15.2$ мм.

Отметим, что за пять оборотов кручения не происходит изменения амплитуды колебаний фазовой задержки. Это означает, что влияние наведенного кручением циркулярного ДЛП пренебрежимо мало, а встроенное циркулярное ДЛП в волокне отсутствует.

На рис.9 приведены результаты эксперимента с микроструктурированным [12, 13] s-pm-волокном, у которого длина биений L_b встроенного ДЛП меньше шага спиральной структуры L_{tw} и равна ~ 1 мм при $L_{tw} = 3$ мм. Фазовая задержка R (размах от пика до пика на рис.9) составляет 62° . Из рис.4 видно, что при определении длины биений по фазовой задержке (формула (12)) получаем

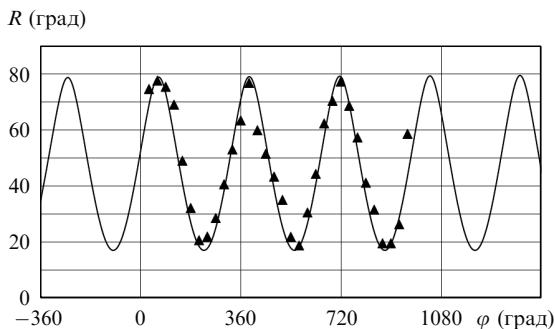


Рис.9. Расчетная зависимость фазовой задержки R от угла упругого кручения φ (сплошная кривая) для s-pm-волокна с длиной биений встроенного линейного ДЛП $L_b = 0.9$ мм; шагом спирали $L_{tw} = 3$ мм и длиной волокна $z = 1$ м. Точки – эксперимент.

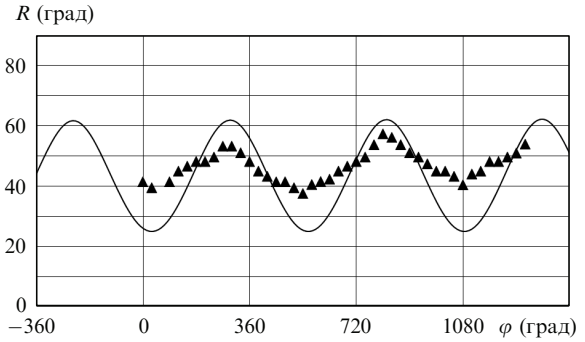


Рис.10. Расчетная зависимость фазовой задержки R от угла упругого кручения φ (сплошная кривая) для s-pm-волокна с длиной биений встроенного линейного ДЛП $L_b = 0.48$ мм; шагом спирали $L_{tw} = 3$ мм и длиной волокна $z = 1$ м. Точки – эксперимент.

два значения: $L_b \approx 0.9$ и 3 мм. Имеет смысл уточнить этот результат, исходя из измерения периода упругого кручения. Экспериментальное значение периода $\Delta\varphi$ для этого волокна равно 286° . Расчет по формуле (17) дает $L_b \approx 1.08$ мм. Таким образом, начиная с длины биений $L_b \sim 1$ мм, более точное значение L_b получается из измерений периода упругого кручения.

Предлагаемый метод измерения длины биений встроенного линейного ДЛП в s-pm-волокнах был применен для микроструктурированного s-pm-волокна с сильным встроенным линейным ДЛП. Результат измерений приведен на рис.10. Экспериментальное значение периода $\Delta\varphi$ для этого волокна равно 525° . Расчет по формуле (17) дает $L_b = 0.5$ мм. Следует отметить, что амплитуда колебаний оказалась существенно меньше предсказываемой теорией. Длина измеряемого волокна составляла ~ 1.5 м, и, возможно, здесь проявились деполаризующие свойства s-pm-волокна [15]. Действительно, для измерений использовался инжекционный лазер с шириной спектра излучения ~ 0.1 нм, что, по оценкам работы [15], дает при $L_b = 0.5$ мм длину когерентности ~ 3.7 м.

Возможно, деполаризация сказалась и на результатах для предыдущего образца: оценка длины L_b по амплитуде колебаний фазовой задержки ($L_b \approx 0.9$ мм) дает заниженное значение по сравнению с оценкой по периоду упругого кручения ($L_b \approx 1.08$ мм), что можно объяснить частичной деполаризацией.

4. Выводы

Фазовая задержка одной из ортогональных мод с линейной поляризацией относительно другой моды в s-pm-волокнах, подвергнутых упругому кручению вокруг оси волокна, подчиняется теории спиральной структуры осей встроенного линейного ДЛП, изложенной в работах [4–7]. Встроенное в волокно циркулярное ДЛП согласно этой теории отсутствует. Слабое циркулярное ДЛП появляется только в результате упругого кручения волокна вокруг его оси. Это подтверждается экспериментальными данными.

Длину биений встроенного линейного ДЛП в s-pm-волокне можно экспериментально определять как по амплитуде колебаний фазовой задержки в зависимости от угла упругого кручения волокна вокруг его оси, так и по периоду этих колебаний.

Недостатки метода определения по амплитуде колебаний, заключаются в следующем:

1) при длинах биений L_b , малых по сравнению с шагом спиральной структуры L_{tw} , возникает неоднозначность в определении L_b (см. рис.4);

2) при малых длинах биений L_b длина волокна, необходимая для эксперимента, становится соизмеримой с длиной когерентности источника излучения, что приводит к погрешности в определении L_b (из-за деполяризации уменьшается амплитуда колебаний фазовой задержки).

Недостаток метода определения L_b по периоду колебаний фазовой задержки заключается в том, что при больших длинах биений ($L_b > 10$ мм) период колебаний слабо зависит от L_b , и поэтому данный метод проигрывает в точности методу определения L_b по амплитуде.

Комбинируя оба метода можно определять длины биений линейного встроенного в s-pun-волокно ДЛП в очень широком диапазоне: от ~ 0.01 до ~ 100 мм.

- Laming R.I., Payne D.N. *J. Lightwave Technol.*, **7**, 2084 (1989).
- Blake J., Tantaswadi P., de Carvalho A. *IEEE Trans. Power Delivery*, **11**, 116 (1996).
- Short S.X., Tselikov A.A., de Arruda J.U., Blake J.N. *J. Lightwave Technol.*, **16**, 1212 (1998).
- Губин В.П., Исаев В.А., Моршнев С.К., Сазонов А.И., Старостин Н.И., Чаморовский Ю.К., Усов А.И. *Квантовая электроника*, **36**, 287 (2006).
- Моршнев С.К., Губин В.П., Исаев В.А., Старостин Н.И., Чаморовский Ю.К. *Фотон-экспресс*, **6**, 64 (2007).
- Morshnev S.K., Gubin V.P., Isaev V.A., Starostin N.I., Sazonov A.I., Chamorovsky Yu.K., Korotkov N.M. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, **17**, 258 (2008).
- Моршнев С.К., Губин В.П., Воробьев И.Л., Старостин Н.И., Сазонов А.И., Чаморовский Ю.К., Коротков Н.М. *Квантовая электроника*, **39**, 287 (2009).
- Rashleigh S.C. *J. Lightwave Technol.*, **1**, 312 (1983).
- Аззам Р., Башара Н. *Эллипсометрия и поляризованный свет* (М.: Мир, 1981).
- Аксенов В.А., Моршнев С.К., Иванов Г.А., Чаморовский Ю.К. *Сб. трудов 13-й Междунар. научн. конф. ММТТ-2000* (С.-Петербург, 2000, т. 7, с. 53).
- Michie A., Canning J., Bassett J., Haywood J., Digweed K., Aslung M., Ashton B., Stevenson M., Digweed J., Lau A., Scandurra D. *Opt. Express*, **15**, 1811 (2007).
- Chamorovsky Yu.K., Starostin N.I., Ryabko M.V., Sazonov A.I., Morshnev S.K., Gubin V.P., Vorob'ev I.L., Nikitov S.A. *Opt. Commun.*, **282**, 4618 (2009).
- Чаморовский Ю.К., Старостин Н.И., Моршнев С.К., Губин В.П., Рябко М.В., Сазонов А.И., Воробьев И.Л. *Квантовая электроника*, **39**, 1074 (2009).
- Morshnev S.K., Ryabko M.V., Ghamorovsky Yu.K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6594**, 6594OR (2007).
- Губин В.П., Моршнев С.К., Старостин Н.И., Сазонов А.И., Чаморовский Ю.К., Исаев В.А. *Радиотехника и электроника*, **53**, 971 (2008).