

УДК 535.5

А.С. Петухов¹, А.С. Смирнов^{1,2}, В.В. Бурдин^{1,2}¹ Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия² Лаборатория фотоники Пермского научного центра
Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОННОЙ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОЙ ПЛАСТИНКИ МИНИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ

Основное назначение четвертьволновой пластинки – преобразование линейного состояния поляризации излучения в циркулярное, и наоборот. Такие преобразования требуются в схемах волоконно-оптических датчиков тока (ВОДТ). В частности, точность преобразования состояния поляризации влияет на точность детектирования величины тока в ВОДТ. В данной статье сравниваются волоконные четвертьволновые пластинки, изготовленные по двум различным методикам из оптического волокна, сохраняющего поляризацию, с точки зрения точности преобразования состояния поляризации при температурном воздействии.

Ключевые слова: волоконная четвертьволновая пластинка, анизотропные световоды, волоконно-оптический датчик тока, ВОДТ.

A.S. Petukhov¹, A.S. Smirnov^{1,2}, V.V. Burdin^{1,2}¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation² Photonics Laboratory of Perm Scientific Centre of Ural Branch of Russian
Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

THE TEMPERATURE PROPERTIES OF FIBER QUARTER-WAVE PLATE OF MINIMUM LENGTH

The main property of a quarter-wave plate is a linear transformation of the polarization state of light in circular polarization state and vice versa. Such transformations are required in the schemes of fiber-optic current sensors (FOCS). In particular, polarization state transformation accuracy affects the accuracy of current detection in FOCS. This paper compares the polarization state transformation accuracy under temperature influence of two fiber quarter-wave plates made by different methods from polarization-maintaining fiber.

Keywords: fiber quarter-wave plate, anisotropic optical fibers, optical fiber current sensor, FOCS.

Введение

Четвертьволновая пластинка [1] (ЧВП) является оптическим устройством, преобразующим линейно поляризованное излучение в циркулярно поляризованное. Этот оптический элемент широко использу-

ется в различных оптических системах, таких как системы связи, измерения, визуализации и т.д. Обычные ЧВП изготавливаются из двулучепреломляющих кристаллов с определенной фиксированной толщиной, но они громоздки и их трудно применять в волоконных системах. Во многих приложениях существует возможность применять волоконные ЧВП, сделанные на основе анизотропного волоконного световода (ВС) типа Panda.

Так, волоконная ЧВП является одним из ключевых элементов в интерферометрическом волоконно-оптическом датчике тока (ВОДТ). При этом температурная стабильность элементов интерферометрических датчиков напрямую влияет на погрешность [2, 3]. ВОДТ широко изучается и уже применяется в электрических сетях, особенно с высоким напряжением, из-за его устойчивости к электромагнитным помехам, малых габаритов, веса, хорошей электроизоляции. В данной работе предлагается методика изготовления волоконной четвертьволновой пластинки из анизотропного ВС типа Panda с использованием сварочного аппарата Fujikura 100P.

1. Теория

Оптическое излучение, распространяющееся в одномодовом анизотропном волоконном световоде, можно представить как сумму двух поляризационных мод (с линейной поляризацией), ортогональных друг другу. При этом каждая мода имеет свой эффективный показатель преломления сердцевины световода – n_x и n_y . Разность фаз, накапливаемая между двумя поляризационными модами на участке световода длиной L :

$$\delta = kL(n_x - n_y) = 2\pi(n_x - n_y)L/\lambda = 2\pi BL/\lambda = 2\pi L/L_b, \quad (1)$$

где $B = |n_x - n_y|$ – модовое двулучепреломление; L_b – длина биений состояния поляризации излучения.

При распространении излучения одновременно в двух ортогональных поляризационных модах состояние поляризации излучения испытывает биения. Если линейно поляризованное излучение вводится в световод под углом 45° к осям двулучепреломления, то на входе мощности в обеих поляризационных модах равны. Тогда при набеге разности фаз поляризация будет превращаться в эллиптическую, а при значении $\delta = \pi/2$ станет круговой. При дальнейшем увеличении δ поляризация снова станет эллиптической, при $\delta = \pi$ – линейной и т.д. Таким

образом, для получения идеальной циркулярной поляризации необходимо, чтобы разность фаз δ составляла $\pi/2 + \pi l$. Из (1) следует, что минимальная длина волоконной ЧВП при этом должна быть

$$L_{\min} = \frac{L_b}{4} = \frac{\lambda}{4B}. \quad (2)$$

2. Методика изготовления волоконной ЧВП

В работе С.А. Тараканова [4] была предложена методика изготовления волоконной ЧВП. Согласно этой методике на первом этапе с использованием поляризационного интерферометра Майкельсона юстируются оси волоконного поляризатора и заготовки из однододового анизотропного ВС так, чтобы между ними было 45° . На втором этапе эта заготовка волоконной ЧВП последовательно укорачивается до длины, необходимой для преобразования линейно поляризованного света в циркулярно поляризованный. Метод позволяет достаточно точно получить циркулярную поляризацию, однако он имеет ряд недостатков. Во-первых, процесс изготовления является достаточно сложным с использованием объемных оптических компонентов и точной механики. Во-вторых, качество получаемой циркулярной поляризации напрямую зависит от длины заготовки с точностью до 1 мкм, следовательно, укорачивание необходимо производить очень точно, что является дополнительной сложностью в изготовлении. В-третьих, при использовании такой методики длина волоконной ЧВП получается большой (порядка 10 см) и, следовательно, влияние температурных факторов, приводящих к ухудшению циркулярной поляризации, будет сильнее, что будет рассмотрено далее.

В данной работе предлагается методика изготовления волоконной ЧВП на основе анизотропного ВС с минимальной длиной. Метод изготовления волоконной ЧВП с минимальной длиной подробно описан в патенте [5]. Для реализации метода был применен сварочный аппарат Fujikura 100P. К образцу анизотропного ВС типа Panda подваривается световод типа *spun* [6]; в данном случае он применяется в качестве световода, сохраняющего циркулярную поляризацию, и используется для подведения излучения к измерителю поляризационного состояния. Затем сваренные ВС сдвигаются сварочным аппаратом от места сварки 5 (рис. 1) на расстояние $L = L_{\min}$ и скручиваются один относительно другого на угол $\varphi = 45^\circ$.

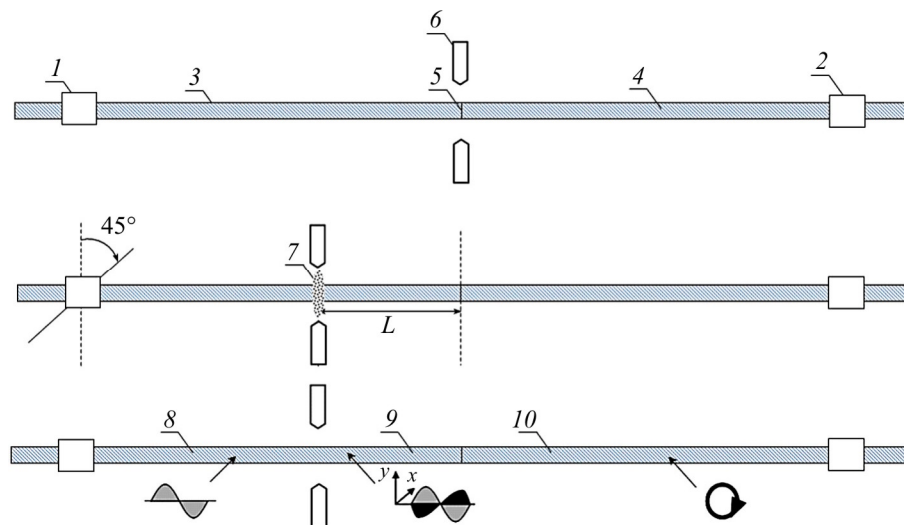


Рис. 1. Схема изготовления волоконной ЧВП: 1, 2 – держатели волокна; 3 – ВС типа Panda; 4 – ВС типа spun; 5 – сварное соединение; 6 – электрод; 7 – электрическая дуга; 8 – входной конец волоконной ЧВП; 9 – волоконная ЧВП; 10 – выходной конец волоконной ЧВП

После скрутки подается электрическая дуга 7, что приводит к расплавлению ВС и релаксации скрученного образца на угол скрутки $\varphi = 45^\circ$. В итоге получаем отрезок ВС, в котором линейно поляризованное излучение раскладывается на две ортогональные поляризации на входе 8, которые, проходя участок 9, претерпевают фазовый сдвиг $\pi/2$ относительно друг друга и на выходе 10 составляют необходимую круговую поляризацию, т.е. получена волоконная четвертьволновая пластинка.

3. Эксперимент

Важным показателем для фазовой пластинки является стабильность величины вносимой фазовой задержки δ при изменении температуры. Для прямого измерения величин ухода δ при изменении температуры были проведены экспериментальные исследования волоконной ЧВП, сделанной на основе анизотропного волоконного световода типа Panda с минимальной длиной. Для этого была собрана измерительная установка, схема которой представлена на рис. 2.

В результате эксперимента было выявлено, что зависимость эллиптичности состояния поляризации от температуры близка к линейной в диапазоне от 20 до 100 °С (рис. 3).

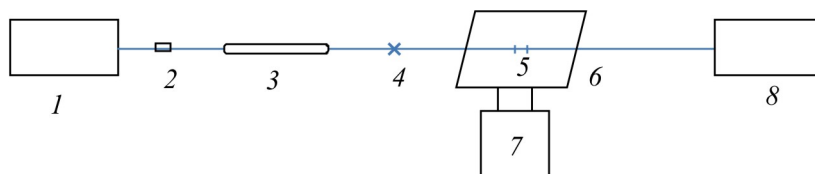


Рис. 2. Схема измерительной установки: 1 – источник излучения; 2 – проходная розетка; 3 – волоконный поляризатор (величина поляризационной экстинкции 30 дБ); 4 – сварка с сохранением поляризации; 5 – волоконная ЧВП; 6 – элемент Пельтье; 7 – источник тока; 8 – анализатор поляризации (Thorlabs, PAX External Sensor Head)

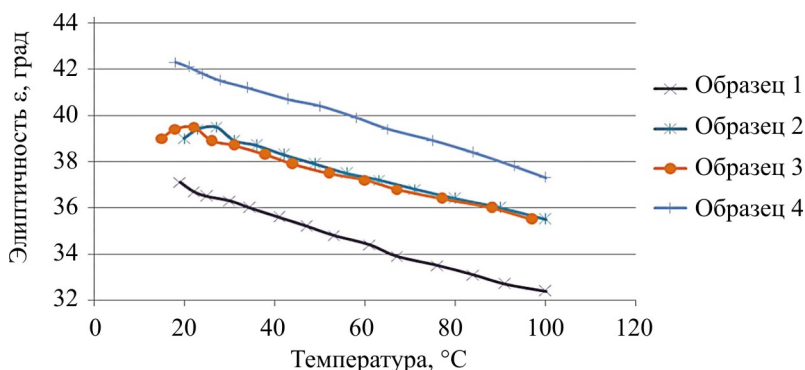


Рис. 3. Температурные зависимости эллиптичности состояния поляризации излучения после прохождения фазовой пластинки

Как видно из приведенных зависимостей (см. рис. 3), относительные изменения эллиптичности для рассмотренных образцов отрицательны и примерно составляют $C_\epsilon = -0,0015$ 1/К. Очевидно, что разность фаз между двумя поляризационными модами после прохождения ЧВП равна удвоенному значению эллиптичности: $\delta = 2\epsilon$, т.е. относительные изменения величин δ и ϵ равны:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}. \quad (3)$$

4. Обсуждение полученных результатов

Согласно формуле (1) для фазовой задержки, вносимой волновой пластинкой, разность фаз между поляризационными модами δ может изменяться в зависимости от температуры за счет изменения величин двулучепреломления B и длины ЧВП L :

$$\Delta\delta(\Delta T) = \frac{2\pi}{\lambda}(B\Delta L + L\Delta B). \quad (4)$$

Запишем относительные изменение величин B и L от температуры, ограничившись членами первого порядка по ΔT :

$$\begin{cases} \frac{\Delta B}{B} = C_B \Delta T, \\ \frac{\Delta L}{L} = C_L \Delta T, \end{cases} \quad (5)$$

где C_B , C_L – термические коэффициенты линейного изменения величин – соответственно B и L . Тогда, с учетом формул (4) и (5), изменение разности фаз при изменении температуры можно выразить следующим образом:

$$\Delta\delta(\Delta T) = \delta_0(C_B + C_L)\Delta T = \delta_0 C_\delta \Delta T, \quad (6)$$

где $\delta_0 = \frac{2\pi}{\lambda}BL$. Исходя из (3) следует: $C_\delta = C_\varepsilon = -0,015$ 1/К, поэтому

$$\Delta\delta(\Delta T) = \delta_0 C_\varepsilon \Delta T. \quad (7)$$

Формула (7) подтверждает линейный характер зависимости эллиптичности от температуры, представленный на рис. 3, поэтому введенные соотношения (5) можно считать корректными.

Массив волокна Panda выполнен из чистого кварцевого стекла, коэффициент температурного расширения которого мал и составляет величину $C_L \sim 5 \cdot 10^{-7}$ 1/К [7], значит, основной вклад в C_ε вносит термический коэффициент двулучепреломления, т.е. $C_\varepsilon \approx C_B$.

Как отмечалось выше, в случае изготовления волоконной ЧВП по методике, описанной в работе С.А. Тараканова [4], используются отрезки анизотропного волокна достаточно большой длины $L = 0,1$ м. Тогда, при таком же, как в рассмотренном эксперименте температурном изменении ΔT и других прочих равных параметрах, изменение фазовой задержки согласно формуле (7) будет определяться отношением длин волоконных ЧВП:

$$\Delta\delta_2(\Delta T) = \frac{L}{L_{\min}} \Delta\delta(\Delta T).$$

В эксперименте исследовались волоконные ЧВП длиной $L_{\min} = 0,0017$ м и наблюдалось изменение на $\Delta\delta = -5^\circ$, тогда расчетное изменение фазовой задержки волоконной ЧВП, изготовленной по методике С.А. Тараканова, при $L = 0,1$ м составит $\Delta\delta_2 = -29^\circ$.

Выводы

Предложенная методика позволяет создавать полностью волоконный компонент – четвертьволновую пластинку, которую можно легко встраивать в различные волоконные системы. Особенности данной методики являются ее быстрота и хорошая точность изготовления. Использование в ВОДТ волоконной ЧВП, сделанной с использованием описанной методики, позволит свести к минимуму влияние температурных факторов за счет короткой длины ЧВП.

Показано, что при увеличении температуры разность фаз, вносимая ЧВП, изменяется, главным образом, вследствие изменения двулучепреломления анизотропного световода. Проведенные эксперименты позволили определить термический коэффициент ДЛП анизотропного световода Panda.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Пермского края и Пермской научно-производственной приборостроительной компании в рамках научного проекта № 14-42-08009 p_офи_м.

Список литературы

1. Савельев И. Курс общей физики. Т. 3. Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука (Гл. ред. физ-мат. лит.), 1970. – 537 с.
2. Wuest R., Frank A. Influence of residual fiber birefringence and temperature on the high-current performance of an interferometric fiber-optic current sensor // Optical Sensors. – 2009.
3. Павлов Д.В. Математическая модель волоконно-оптического гироскопа для статической системы // Прикладная фотоника. – 2014. – № 2. – С. 99–106.
4. Тараканов С. Новый интерферометрический метод измерения электрического тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2010.

5. Patent US 6628869 B2. Method for producing a fiberoptic waveguide / K. Bohnert, H. Brandle, Ph. Gabus. Sep. 30, 2003.

6. Laming R.I., Payne D.N. Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers // *J. Lightwave Technol.* – 1989. – Vol. 7, no. 12.

7. Труфанов А.Н., Труфанов Н.А. О моделях формирования напряженного состояния в анизотропных оптических волокнах // *Прикладная фотоника.* – 2014. – № 1. – С. 97–111.

References

1. Savel'ev I. Kurs obshchei fiziki. Tom 3. Optika, atomnaia fizika, fizika atomnogo iadra i elementarnykh chastits [Course of General physics. Vol. 3. Optics, atomic physics, nuclear physics and elementary particle]. Moscow: Nauka, 1970. 537 p.

2. Wuest R., Frank A. Influence of residual fiber birefringence and temperature on the high-current performance of an interferometric fiber-optic current sensor. *Optical Sensors*, 2009.

3. Pavlov D.V. Matematicheskaiia model' volokonno-opticheskogo giroskopa dlia staticheskoi sistemy [Mathematical model of a fiber-optical gyroscope for static system]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 2, pp. 99-106.

4. Tarakanov S. Novyi interferometricheskii metod izmereniia elektricheskogo toka [A new interferometric method of measurement of electric current]. Abstract of the Thesis of the Ph.D. of Technical Sciences, Saint-Petersburg, 2010.

5. Bohnert K., Brandle H., Gabus Ph. Method for producing a fiberoptic waveguide. *Patent US 6628869 B2*.

6. Laming R.I., Payne D.N. Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1989, vol. 7, no. 12.

7. Trufanov A.N., Trufanov N.A. O modeliakh formirovaniia napriazhennogo sostoianiia v anizotropnykh opticheskikh voloknakh [Models of the formation of the stress state in PM optical fibers]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 97-111.

Получено 6.03.2015