

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

С.А. Матюнин<sup>1</sup>, О.Г. Бабаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

### Аннотация

В настоящее время в волоконно-оптических датчиках поляризационного типа оптическое волокно используется как в качестве чувствительного элемента, так и в качестве волоконно-оптических линий передач. В таких датчиках существует необходимость согласования осей поляризации источника оптического излучения и чувствительного элемента. Однако элементы волоконно-оптических линий передач, расположенные между источником оптического излучения и чувствительным элементом, вносят собственные поляризационные искажения из-за анизотропии оптических свойств волокна, возникающей в результате изгибных деформаций и носящей случайный характер. Это приводит к снижению точности и повторяемости измерений поляризационного датчика. Предлагаемый метод «деполяризации» излучения источника оптического излучения состоит в преобразовании его поляризации в круговую путём размещения между источником оптического излучения и чувствительным элементом катушки с оптическим волокном с определёнными параметрами: диаметром катушки, числом витков и углом поворота катушки относительно плоскости поляризации источника оптического излучения. Данный метод позволяет исключить из оптического тракта дорогостоящие оптические элементы (например, четвертьволновые пластины) и упростить конструкцию датчика/измерительного прибора. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что таким образом можно уменьшить поляризационные искажения с исходных 17 дБ до 0,14 дБ.

**Ключевые слова:** волоконно-оптические датчики; волоконно-оптические линии передач; волоконные измерения; поляризационный датчик; коррекция поляризации; полупроводниковый лазер; оптическое волокно; изгибные деформации.

**Цитирование:** Матюнин, С.А. Экспериментальное исследование деполаризации лазерного излучения элементами волоконной оптики / С.А. Матюнин, О.Г. Бабаев // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 385-390. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-385-390.

### Введение

В волоконно-оптических поляризационных датчиках оптическое волокно используется как в качестве чувствительного элемента датчика, так и качестве линии передачи оптического сигнала. В качестве источника оптического излучения (ИОИ) достаточно часто используется полупроводниковый лазерный диод, имеющий эллиптическую поляризацию, часто близкую к линейной.

Основной сложностью в изготовлении поляризационных датчиков является согласование осей поляризации ИОИ и поляризаторов чувствительного элемента (ЧЭ) датчика. Кроме того, изменение поляризации элементами, не входящими в состав измерительного тракта, например, в результате изгибных деформаций оптического волокна волоконно-оптических линий передач (ВОЛП), ЧЭ и ИОИ, снижает точность и повторяемость измерений. Следовательно, возникает необходимость их минимизации или полного устранения.

Известно, что поляризационные характеристики оптоволоконка зависят от степени его деформации [1–5]. Поэтому суммарное изменение поляризации в ВОЛП определяется трассировкой оптического волокна до объекта контроля и носит случайный характер.

Выходом из данной ситуации является «деполяризация» (преобразование в круговую поляризацию) оптического излучения до ЧЭ. Как правило [6–9], оптическое излучение с круговой поляризацией из излуче-

ния с произвольной поляризацией или естественного света получают следующим способом: сначала преобразуют излучение в линейно-поляризованное, а затем, например, с помощью четвертьволновой пластины, – в излучение с круговой поляризацией. Обычно в качестве четвертьволновой пластины используют анизотропные кристаллы, обладающие свойством двойного лучепреломления.

Недостатками такого метода являются высокая стоимость четвертьволновых пластин, необходимость точного центрирования источника и приёмника света и вынужденный вывод света из волокна в воздушную среду, что приводит к дополнительным потерям мощности оптического излучения и увеличению габаритно-массовых показателей ЧЭ.

Другой путь – использование в качестве четвертьволнового элемента катушки механически напряжённого оптического волокна [1] с определённым диаметром и количеством витков оптоволоконка, в котором вследствие деформации возникает анизотропия оптических свойств и, как следствие, двулучепреломление [6].

Данный способ также не получил широкого распространения в силу недостаточных экспериментальных исследований и неудовлетворительного совпадения результатов теоретических расчётов и результатов экспериментов.

Использование для «деполяризации» излучения стандартных изделий, например, рефлектометрической вставки, применительно к волоконно-оптическим датчикам не только малоэффективно, но и не це-

лесообразно из-за больших габаритно-массовых показателей таких элементов.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию возможности коррекции поляризации (деполаризации) оптического излучения путём включения в оптический тракт до ЧЭ датчика отрезка деформированного оптического волокна.

**1. Экспериментальный стенд для исследования поляризации оптического излучения**

Для исследования поляризационных эффектов был разработан универсальный стенд (рис. 1а, б), позволяющий исследовать поляризационные характеристики как отдельных элементов, так и комплекса элементов датчика.

Стенд состоит из источника питания лазерного диода (PS); лазерного диода (LD) с волоконным выводом (LDI-650-FP-20 производства ООО «LasersCom»); двух отрезков соединительного оптического волокна типа патч-корд (CF1, CF2), оконцованных с одной стороны оптическим коннектором FC/UPC, а с другой – коллимирующей градиентной линзой (GRIN1, GRIN2) для вывода/ввода излучения; вращающегося с помощью шагового двигателя (SM1), плёночного поляризатора (FP), закреплённого на внешнем кольце подшипника (внутреннее кольцо подшипника установлено на втулке, неподвижно закреплённой на оптической плите); закреплённой на моторизованной поворотной платформе (SM2) катушки (CI) с определёнными диаметром и количеством витков оптического волокна; контроллера шаговых двигателей (SMC) поворотной платформы и вращающегося плёночного поляризатора; измерителя мощности оптического излучения (OPM) (FOD1202 производства «Fiber Optical Devices»); фотодиода (PD), подключённого к осциллографу (OSC).

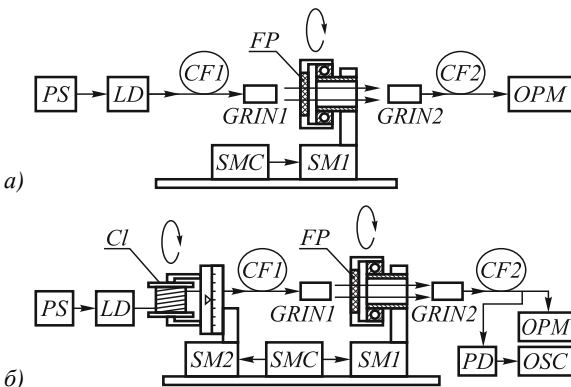


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда: (а) для исследования поляризации оптического излучения LD и изменения поляризации оптического излучения в ВОЛП; (б) для исследования изменения поляризации оптического излучения в деформированном оптическом волокне

Для исследования поляризационных характеристик LD использовался вариант компоновки стенда, представленный на рис. 1а. Излучение LD вводится непосредственно в GRIN1 и проходит через вращающийся с помощью шагового двигателя поляризатор FP, где модулируется по амплитуде. Изменение мощности из-

лучения регистрируется измерителем мощности OPM и с помощью фотодиода PD осциллографом OSC.

Результаты экспериментального исследования зависимости выходной оптической мощности полупроводникового LD (длина волны оптического излучения – 650 нм) от угла поворота плёночного поляризатора FP приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, оптическое излучение полупроводникового LD существенно поляризовано, а изменение оптической мощности в зависимости от угла установки поляризатора достигает 17 дБ.

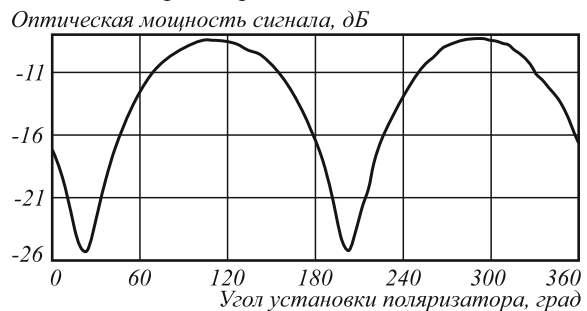


Рис. 2. Поляризация оптического излучения LD

**2. Исследование деполаризации излучения лазерного диода длинными ВОЛП**

Принято считать, что при значительной длине ВОЛП оптическое излучение становится неполяризованным [10–12].

Для исследования этого явления в оптическую цепь связи LD с PD варианта компоновки экспериментального стенда, рассмотренного выше (рис. 1а), вместо CF1 включалось одномодовое (optical fiber cable PVC SM 9/125 2,0 mm OFNR) или многомодовое волокно (Corning OM3 Fiber optical cable LSZH type CO-PD-23) длиной 50 м, свёрнутое для устранения влияния деформации волокна на поляризацию излучения в бухту большого диаметра (40 см). В качестве источника оптического излучения использовался полупроводниковый LD (длина волны оптического излучения 650 нм).

На рис. 3 приведены результаты экспериментального исследования. Там же для сравнения приведена поляризационная характеристика LD.

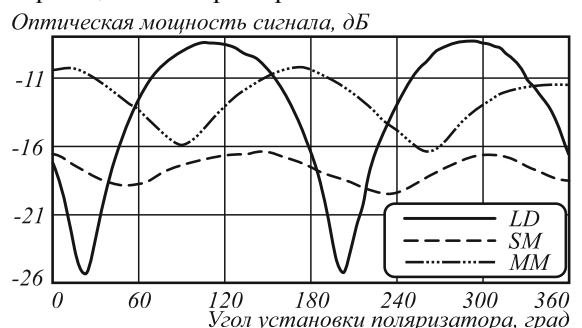


Рис. 3. Деполаризация оптического излучения в ВОЛП, где LD – поляризация оптического излучения лазерного диода, SM – изменение поляризации в бухте одномодового волокна, MM – изменение поляризации в бухте многомодового волокна

Здесь кривая LD отображает поляризационную характеристику лазерного диода, полученную в первом эксперименте, кривая SM – поляризационную характеристику излучения после прохождения через бухту одномодового волокна, кривая MM – поляризационную характеристику излучения после прохождения через бухту многомодового волокна.

Из сравнения зависимостей видно, что прохождение излучения через бухту оптического волокна снижает степень поляризации излучения, но не столь сильно, как ожидалось.

Для бухты одномодового волокна длиной 50 м изменение оптической мощности в зависимости от угла установки поляризатора достигает 3,02 дБ, а для многомодовой ВОЛП длиной 50 м – 6,1 дБ.

Очевидно, что подобный способ устранения поляризации излучения мало эффективен для использования в поляризационных датчиках в силу больших габаритно-массовых показателей и низкой эффективности.

### 3. Исследование деполаризации излучения лазерного диода четвертьволновыми волоконно-оптическими катушками

Для исследования влияния деформации оптического волокна (без деформации кручения) на изменение поляризации излучения в оптическую связь LD с фотодиодом (рис. 1б) включается катушка с оптическим волокном CI, зафиксированная на не вращающейся в данном случае моторизованной платформе. Намотанное на катушку оптоволокно оснащено оптическим коннектором с одной стороны и коллимирующим градианом GRIN1 с другой стороны. Отсутствие микротрещин оптоволокна, намотанного на катушку, после намотки катушки контролировалось оптическим рефлектометром EXFO FTB-7200D-12CD-23B-EI-EUI-89 со стандартной рефлектометрической вставкой.

Принцип действия устройства заключается в следующем: оптическое излучение от LD поступает в волокно, намотанное на катушку. В результате деформации оптического волокна, возникающей при его намотке на катушку без деформации кручения, возникает двулучепреломление и происходит изменение поляризации излучения [6–9]. Световой поток, проходя через вращающийся с помощью шагового двигателя поляризатор FP, модулируется по амплитуде, затем модулированный световой поток вводится в GRIN2 и поступает на измеритель OPM и фотодиод PD, подключенный к осциллографу OSC.

Изменяя диаметр катушки и количество витков оптического волокна, можно по амплитуде периодического сигнала, фиксируемого осциллографом, определить степень поляризации оптического излучения.

В качестве примера определим радиус катушки, на которую намотано оптоволокно, обладающее свойствами четвертьволновой пластины. Разность фаз на выходе такого световода рассчитывается по формуле [1]:

$$\delta = 2\pi^2 aNd^2 / D\lambda, \tag{1}$$

где  $a$  – коэффициент фотоупругости;  $N$  – число витков;  $d$  – диаметр оболочки волокна;  $D$  – диаметр катушки;  $\lambda$  – длина волны.

Выразим отсюда диаметр катушки:

$$D = 2\pi^2 aNd^2 / \lambda\delta. \tag{2}$$

Учитывая, что разность фаз для четвертьволновой пластины составляет  $\pi/2$ , найдём диаметр катушки, а результаты расчётов сведём в таблицу.

Табл. 1. Расчетное значение диаметров катушек

Количество витков	Расчётный диаметр катушки для длины волны, мм							
	650 нм		850 нм		1330 нм		1550 нм	
	S	M	S	M	S	M	S	M
0,5	0,1	2,5	0,04	1,92	0,03	1,2	0,02	1,1
1	0,2	10,0	0,2	3,84	0,05	2,5	0,04	2,1
2	0,4	20,1	0,3	7,68	0,1	4,9	0,09	4,2
3	0,6	30,1	0,5	11,5	0,2	7,4	0,1	6,3
4	0,8	40,2	0,6	15,4	0,2	9,8	0,2	17
5	1,0	50,2	0,8	19,2	0,3	24,5	0,22	21
100	21	1000	8	384	5,1	491	4,4	421

В таблице приняты следующие сокращения: S – одномодовое волокно (optical fiber cable PVC SM 9/125 2,0 mm OFNR), M – многомодовое волокно (Corning OM3 Fiber optical cable LSZH type CO-PD-23).

Согласно данным табл. 1 и рис. 3 использование одномодового волокна требует либо очень малых диаметров катушки, либо большого числа витков, что практически не реализуемо.

Экспериментальные исследования проводились на длине волны 650 нм с катушками диаметром от 19,2 до 24,5 мм с количеством витков многомодового оптического волокна согласно табл. 1. Исходное изменение поляризации LD принималось равным 17 дБ (рис. 2).

Зависимость выходной оптической мощности от количества витков оптоволокна представлена на рис. 4.

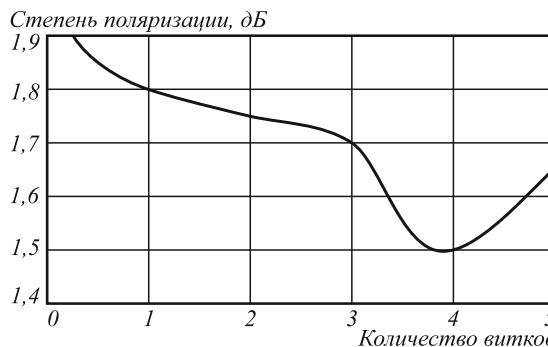


Рис. 4. Зависимость степени изменения поляризации от параметров катушки

Минимальная величина степени поляризации излучения (1,48 дБ) достигнута при четырёх витках оптоволокна на катушке диаметром 20 мм.

Как видно из результатов экспериментальных исследований, можно добиться существенного снижения поляризации излучения до 1,52 дБ. Однако для практического использования в поляризационных датчиках излучение такой степени поляризации ещё мало пригодно.

#### 4. Исследование деполаризации деформированным кручением оптического волокна

Для исследования влияния деформации кручения оптического волокна на изменение поляризации также используется стенд, приведённый на рис. 1б. Отличие от предыдущего опыта заключается в том, что задействуется моторизованная поворотная платформа, которая задаёт угол скручивания оптического волокна, намотанного на катушку. При этом диаметр катушки выбирается значительно больше диаметров, указанных в табл. 1, а количество витков оптического волокна равно одному. Это позволяет исключить влияние деформации оптического волокна на результаты исследований (см. п. 3). Отсутствие микротрещин оптоволоконна после намотки катушки и скрутки периодически контролировалось оптическим рефлектометром EXFO FTB-7200D-12CD-23B-EI-EUI-89 со стандартной рефлектометрической вставкой.

Зависимость выходной оптической мощности от угла наклона катушки с оптоволоконном представлена на рис. 5, где точками обозначены экспериментальные значения, кривыми линиями – аппроксимация экспериментальных значений полиномами шестой степени. Экспериментальные исследования проводились для катушки радиусом 50 мм с одним витком оптоволоконна. В качестве источника оптического излучения использовался полупроводниковый лазерный диод с длиной волны 650 нм.

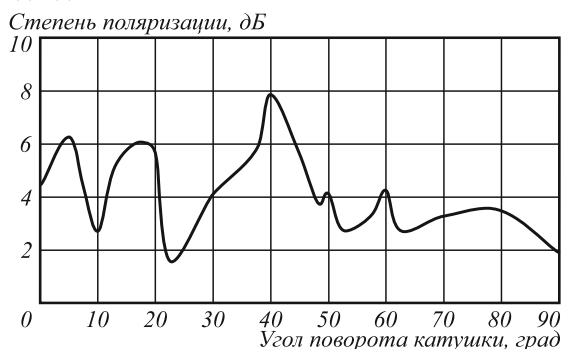


Рис. 5. Поляризационные характеристики оптического излучения для различных катушек с оптическим волокном

Минимальная величина степени поляризации излучения 1,6 дБ достигнута при величине угла кручения 23 град.

#### 5. Исследование «деполаризации» излучения четвертьволновым оптическим волокном, деформированным кручением

Согласно данным вышеприведенных опытов в практических целях возможно совместное использование четвертьволновой катушки с оптическим волокном и скручивания свободного участка волокна.

Экспериментально исследовалась остаточная степень поляризации оптического излучения ИОИ для четвертьволновой катушки многомодового оптического волокна (Corning OM3 Fiber optical cable LSZH type CO-PD-23) с параметрами:

диаметр катушки – 20 мм, количество витков оптического волокна – 4.

Оптимальный угол скручивания свободного конца оптоволоконна оказался равен 65 градусов, что позволило снизить остаточную степень поляризации оптического излучения с 17 дБ до величины 0,14 дБ.

#### Заключение

Экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Полупроводниковые LD обладают существенной (порядка 17 дБ) поляризацией излучения.
2. Длинные ВОЛП (длиной до 50 м) позволяют снизить поляризацию излучения с 17 до 3...6 дБ.
3. Использование четвертьволновой оптической катушки позволяет снизить поляризацию излучения с 17 дБ до 1,52 дБ.
4. Кручение отрезка оптического волокна более эффективно влияет на поляризацию излучения по сравнению с четвертьволновой оптической катушкой и позволяет снизить поляризацию излучения с 17 дБ до 1,6 дБ.
5. Совместное использование длинной ВОЛП, четвертьволновой катушки с оптическим волокном и её оптимальное скручивание позволяет снизить поляризацию излучения с 17 дБ до величины 0,14 дБ (расчетное значение).

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки. Уникальный идентификатор: ПНИЭР RFMEF157816X0209.

#### Литература

1. **Udd, E.** Fiber optic sensors: An introduction course for engineers and scientists / E. Udd, W.B. Spillman, Jr. – New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2011. – 512 p. – ISBN: 978-0-470-12684-4.
2. **Yin, Shizhuo.** Fiber optic sensors / S. Yin, P.B. Ruffin, F.T.S. Yu. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 496 p. – ISBN: 978-1-420-05365-4.
3. **López-Higuera, J.M.** Handbook of optical fiber sensing technology / J.M. López-Higuera. – New York: John Wiley & Sons Ltd, 2002. – 828 p. – ISBN: 978-0-471-82053-6.
4. **Thévenaz, L.** Advanced fiber optics: Concepts and technology / L. Thévenaz. – Lausanne: EPFL Press, 2011. – 393 p. – ISBN: 978-1-439-83517-3.
5. **Gholamzadeh, B.** Fiber optic sensors / B. Gholamzadeh, H. Nabovati // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2008. – Vol. 42. – P. 297-307.
6. **Rashleigh, S.C.** Polarimetric sensors: Exploiting the axial stress in high birefringence fibers / S.C. Rashleigh // Proceedings of First International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-1), London, April 1983. – P. 210-212.
7. **Gisin, N.** Polarization mode dispersion of short and long single-mode fibers / N. Gisin, J.-P. Von der Weid, J.-P. Pel-laux // Journal of Lightwave Technology. – 1991. – Vol. 9, Issue 7. – P. 821-827. – DOI: 10.1109/50.85780.
8. **Poole, C.D.** Statistical treatment of polarization dispersion in singlemode fiber / C.D. Poole // Optics Letters. – 1988. – Vol. 13, Issue 8. – P. 687-689. – DOI: 10.1364/OL.13.000687.

9. **Palmieri, L.** Distributed polarimetric measurements for optical fiber sensing / L. Palmieri // *Optical Fiber Technology*. – 2013. – Vol. 19, Issue 6, Part B. – P. 720-728. – DOI: 10.1016/j.yofte.2013.07.015.
10. **Rogers, A.J.** Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions / A.J. Rogers // *Applied Optics*. – 1981. – Vol. 20, Issue 6. – P. 1060-1074. – DOI: 10.1364/AO.20.001060.
11. **Grattan, L.S.** Optical fiber sensor technology: Advanced applications – Bragg gratings and distributed sensors / L.S. Grattan, B.T. Meggitt. – New York: Springer, 2000. – 385 p. – ISBN: 978-0-7923-7946-1.
12. **Gordon, J.P.** PMD fundamentals: polarization mode dispersion in optical fibers / J.P. Gordon, H. Kogelnik // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2000. – Vol. 97, No. 9. – P. 4541-4550. – DOI: 10.1073/pnas.97.9.4541.

### *Сведения об авторах*

**Матюнин Сергей Александрович**, 1951 года рождения, в 1973 году окончил Куйбышевский политехнический институт по специальности «Информационно-измерительная техника», в 2002 присуждена учёная степень «Доктор технических наук» по специальности «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», работает профессором кафедры автоматических систем энергетических установок и ведущим научным сотрудником лаборатории НИЛ-53 Самарского университета. Область научных интересов: волоконно-оптические датчики, сенсорные системы антропоморфных роботов, оптические, волоконно-оптические и оптоэлектронные методы и средства автоматизации технологических процессов. E-mail: [S.A.Matyunin@yandex.ru](mailto:S.A.Matyunin@yandex.ru).

**Бабаев Орхан Гаджибаба оглы**, 1990 года рождения, в 2013 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности 220500 «Конструирование и технология электронно-вычислительных средств», работает младшим научным сотрудником лаборатории НИЛ-53 Самарского университета. Область научных интересов: волоконно-оптические датчики, сенсорные системы антропоморфных роботов, оптические, волоконно-оптические и оптоэлектронные методы и средства автоматизации технологических процессов. E-mail: [orbaev@yandex.ru](mailto:orbaev@yandex.ru).

ГРПТИ: 47.35.41

*Поступила в редакцию 30 марта 2017 г. Окончательный вариант – 18 апреля 2017 г.*

## EXPERIMENTAL STUDY OF DEPOLARIZATION OF LASER RADIATION BY FIBER OPTIC ELEMENTS

S.A. Matyunin<sup>1</sup>, O.G. Babaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

### *Abstract*

At present, in polarization-based optical fiber sensors the optical fiber is used both as a sensitive element (SE) and as fiber-optic communication lines (FOCL) for transmission of an optical signal. In such sensors, the polarization axes of the optical radiation source (ORS) and SE need to be aligned. However, FOCL elements located between the ORS and SE introduce their own polarization distortions due to the anisotropy of the optical properties of the fiber resulting from bending deformations of a random nature. This leads to a decrease in the accuracy and repeatability of the polarization sensor (PS) measurements. The proposed method of polarization correction consists in depolarization (transformation into circular polarization) of optical radiation by placing coils with an optical fiber between the ORS and SE, and certain parameters: the diameter of the coil, the number of turns and the angle of rotation of the coil relative to the plane of polarization of the ORS. This method allows one to exclude from the optical setup expensive optical elements (for example, quarter-wave plates) and simplify the design of the sensor / measuring device. In the course of experimental studies it was found that in this way it is possible to reduce the polarization distortion from the initial 17 dB to 1.6 dB.

**Keywords:** fiber optic sensors, fiber optic communications, fiber measurements, polarization sensor, polarization correction, semiconductor lasers, optical fiber, bending deformations.

**Citation:** Matyunin SA, Babaev OG. Experimental study of depolarization of laser radiation by fiber optic elements. *Computer Optics* 2017; 41(3): 385-390. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-385-390.

**Acknowledgements:** The work is executed at financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Unique ID: Applied research and experimental work RFMEF157816X0209.

### References

- [1] Udd E, William BS, Jr. Fiber optic sensors: An introduction course for engineers and scientists. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.; 2011. ISBN: 978-0-470-12684-4.
- [2] Yin S, Ruffin PBR, Yu FTS. Fiber optic sensors. Boca Raton: CRC Press; 2008. ISBN: 978-1-420-05365-4.
- [3] López-Higuera JM. Handbook of optical fiber sensing technology. NY: John Wiley & Sons Ltd; 2002. ISBN: 978-0-471-82053-6.
- [4] Thévenaz L. Advanced fiber optics: Concepts and technology. Lausanne: EPFL Press; 2011. ISBN: 978-1-439-83517-3.
- [5] Gholamzadeh B, Nabovati H. Fiber optic sensors. World Academy of Science, Engineering and Technology 2008; 42: 297-307.
- [6] Rashleigh SC. Polarimetric sensors: Exploiting the axial stress in high birefringence fibers. First International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-1), London, 1983; 210-212.
- [7] Gisin N, Von der Weid J-P, Pellaux J-P. Polarization mode dispersion of short and long single-mode fibers. J Lightw Technol 1991; 9(7): 821-827. DOI: 10.1109/50.85780.
- [8] Poole CD. Statistical treatment of polarization dispersion in singlemode fiber. Opt Lett 1988; 13(8): 687-689. DOI: 10.1364/OL.13.000687.
- [9] Palmieri L. Distributed polarimetric measurements for optical fiber sensing. Optical Fiber Technology 2013; 19(6): 720-728. DOI: 10.1016/j.yofte.2013.07.015.
- [10] Rogers AJ. Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions. Appl Opt 1981; 20(6): 1060-1074. DOI: 10.1364/AO.20.001060.
- [11] Grattan LS, Meggitt BT. Optical fiber sensor technology: Advanced applications – Bragg gratings and distributed sensors. NY: Springer; 2000. ISBN: 978-0-7923-7946-1.
- [12] Gordon JP, Kogelnik H. PMD fundamentals: polarization mode dispersion in optical fibers. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2000; 97(9): 4541-4550. DOI: 10.1073/pnas.97.9.4541.

### Authors' information

**Sergey Aleksandrovich Matyunin** (b. 1951) graduated from Kuibyshev Polytechnical Institute in 1973 with a degree in "Information and Measuring Technology", in 2002 he was awarded the degree of Doctor of Technical Sciences in the field of "Elements and Devices of Computer Engineering and Control Systems", he works as a professor at the of Automatic Systems of Power Plants department and a leading researcher of the laboratory NIL-53 of Samara University. Research interests: fiber optic sensors, sensor systems of anthropomorphic robots, optical, fiber optic and optoelectronic methods and means of automation of technological processes. E-mail: [S.A.Matyunin@yandex.ru](mailto:S.A.Matyunin@yandex.ru).

**Orkhan Gadjibaba ogli Babaev** (b.1990), graduated from Samara State Aerospace University (presently, Samara National Research University, short – Samara University) with a degree in "Design and Technology of Electronic Computing Means", works as a junior researcher of the laboratory NIL-53 of the Samara University. Research interests: fiber optic sensors, sensor systems of anthropomorphic robots, optical, fiber optic and optoelectronic methods and means of automation of technological processes. E-mail: [orbaev@yandex.ru](mailto:orbaev@yandex.ru).

*Received March 30, 2017. The final version – April 18, 2017.*