

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

С.А. Матюнин¹, О.Г. Бабаев¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований «деполяризации» излучения полупроводникового источника оптического излучения (ИОИ) - лазерного диода. «Деполаризация» ИОИ устраняет необходимость согласования осей поляризации ИОИ и элементов поляризационных волоконно-оптических датчиков. Экспериментально исследовалась остаточная степень поляризации оптического излучения ИОИ для четвертьволновой катушки многомодового оптического волокна (Corning OM3 Fiber optical cable LSZH type CO-PD-23) без и с кручением прямого участка оптического волокна. Экспериментально установлено, что использование четвертьволновой катушки с кручением прямого участка оптического волокна позволяет уменьшить поляризационные искажения с исходных 17дБ до 0,14дБ.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики; ВОЛП; 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, № 4. – С. 385-390. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-385-390.

Введение

В настоящее время в поляризационных волоконно-оптических датчиках (ПД) оптическое волокно используется как в качестве чувствительного элемента (ЧЭ), так и в качестве волоконно-оптических линий передач (ВОЛП) для передачи оптического сигнала [1–7]. В качестве ИОИ достаточно часто используется полупроводниковые лазерные диоды, имеющие эллиптическую поляризацию, часто близкую к линейной. В таких ПД существует необходимость согласования осей поляризации источника оптического излучения и элементов ЧЭ, что является конструктивно сложной задачей.

Кроме того, элементы ВОЛП, расположенные между ИОИ и ЧЭ и не входящие в состав измерительного тракта, вносят собственные поляризационные искажения из-за анизотропии оптических свойств волокна, возникающей в результате изгибных деформаций, определяющиеся трассировкой оптического волокна до ПД и носящие случайный характер [1, 8, 9]. Это приводит к снижению точности и повторяемости измерений поляризационными датчиками. Следовательно, возникает необходимость минимизации или полного устранения поляризации ИОИ и ВОЛП.

Выходом из данной ситуации является «деполяризация» (преобразование в круговую поляризацию) оптического излучения до ЧЭ. Как правило [1, 7–11], оптическое излучение с круговой поляризацией из излучения 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 приемника 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 деполаризирующего устройства элементов дифракционной оптики, наносимых, возможно, непосредственно на торцы оптического волокна [12–15]. С точки зрения габаритно-массовых показателей эффективный вариант. Однако экспериментально эффективность такого подхода практически не исследовалась.

Третий вариант – использование в качестве четвертьволнового элемента катушки механически напряженного оптического волокна [1] с определенным диаметром и количеством витков оптоволоконка, в котором вследствие деформации возникает анизотропия оптических свойств, и, как следствие, двулучепреломление [1, 16].

Данный способ также не получил широкого распространения в силу недостаточной повторяемости и отсутствия элементов индивидуальной подстройки ЧЭ ПД.

Использование для «деполяризации» излучения стандартных изделий, например, рефлектометрической вставки, применительно к волоконно-оптическим датчикам не только малоэффективно, но и не целесообразно из-за больших габаритно-массовых показателей таких элементов [17, 18].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию возможности коррекции поляризации (деполяризации) оптического излучения путем включения в оптический тракт до ЧЭ датчика отрезка деформированного оптического волокна в виде четверть волной катушки, установленной перед ЧЭ ПД, и скручиванием прямого участка оптического волокна этой катушки.

1. Экспериментальный стенд для исследования поляризации оптического излучения

Для исследования поляризационных эффектов был разработан универсальный стенд (рис. 1а, б),

позволяющий исследовать как поляризационные характеристики отдельных элементов, так и комплекса элементов датчика [5, 19–21].

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) пленочного поляризатора (FP), закрепленного на внешнем кольце подшипника (внутреннее кольцо подшипника установлено на втулке, неподвижно закрепленной на оптической плите); закрепленной на моторизованной поворотной платформе (SM2) катушки (CI) с определенными диаметром и количеством витков оптического волокна; контроллера шаговых двигателей (SMC) поворотной платформы и вращающегося пленочного поляризатора; измерителя мощности оптического излучения (OPM) (FOD1202 производства «Fiber Optical Devices»); фотодиода (PD), подключенного к осциллографу (OSC).

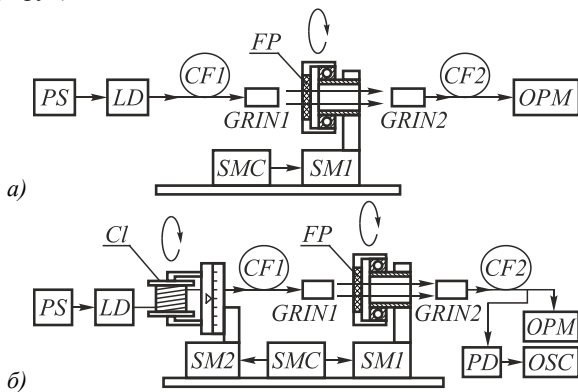


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда: (а) для исследования поляризации оптического излучения LD и изменения поляризации оптического излучения в ВОЛП; (б) для исследования изменения поляризации оптического излучения в деформированном оптическом волокне

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 излучения 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 пленочного 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.

2. Исследование деполаризации излучения лазерного диода длинными ВОЛП

Принято считать, что при значительной длине ВОЛП оптическое излучение становится неполяризованным [8–9].

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, свернутое для устранения влияния деформации волокна на поляризацию излучения в бухту диаметром 40 см. В качестве источника оптического излучения использовался полупроводниковый LD (длина волны оптического излучения 650 нм).

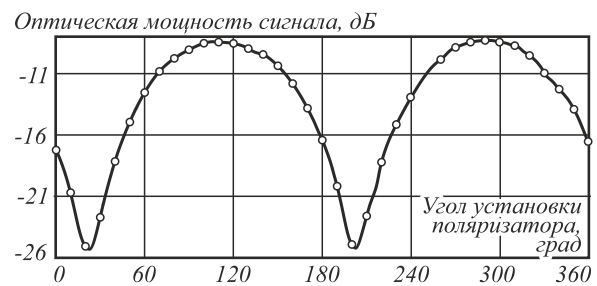


Рис. 2. Поляризация оптического излучения LD

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

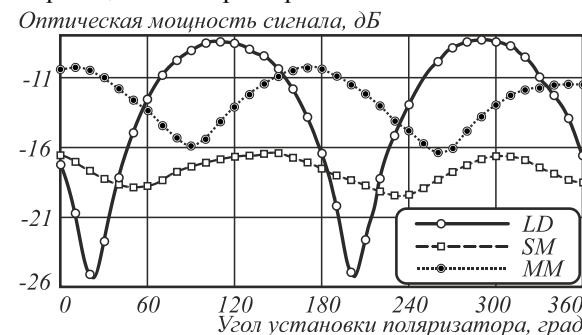


Рис. 3. Деполаризация оптического излучения в ВОЛП, где LD – поляризация оптического излучения лазерного диода, SM – изменение поляризации в бухте одномодового волокна, MM – изменение поляризации в бухте многомодового волокна

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 С1, зафиксированная на не вращающейся в данном случае моторизованной платформе. Намотанное на катушку оптоволокно оснащено оптическим коннектором с одной стороны и коллимирующим граданом GRIN1 с другой стороны. Отсутствию 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; λ – длина волны.

Выразим отсюда диаметр катушки:

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

Учитывая, что разность фаз для четвертьволновой пластины составляет $\pi/2$, найдем диаметр катушки, а результаты расчетов сведем в табл. 1.

В табл. 1 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 (до 0,1...0,02 мм), что практически не реализуемо, либо большого числа витков (1000), что увеличивает габаритно-массовые показатели ПД.

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).

Табл. 1. Расчетное значение диаметров катушек

Количество витков	Расчетный 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

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

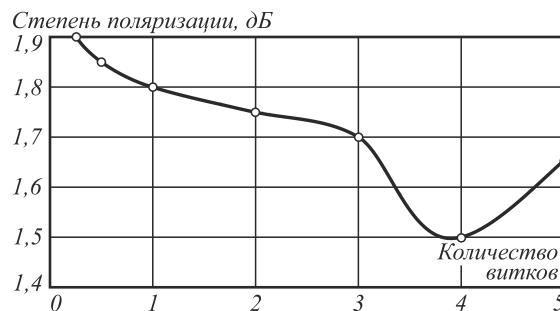


Рис. 4. Зависимость степени изменения поляризации от параметра катушки

Минимальная величина степени поляризации излучения (1,48 дБ) достигнута при четырех 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 еще мало пригодно.

4. Исследование деполаризации деформированным кручением оптического волокна

Для исследования влияния деформации кручения оптического волокна на изменение поляризации также используется стенд, приведенный на рис. 1б. Отличие от предыдущего опыта заключается в том, что задействуется моторизованная поворотная платформа, которая задает 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). Отсутствию микротре-

щин 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. На рис. 5 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.

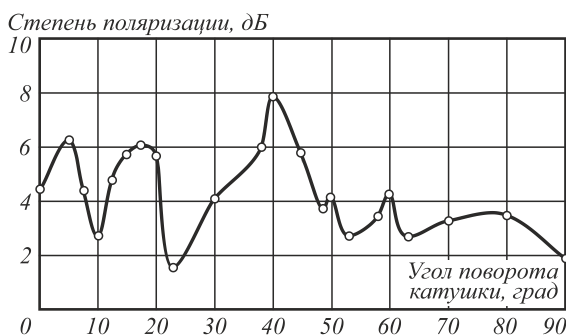


Рис. 5. Поляризационные характеристики оптического излучения для различных катушек с оптическим волокном

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

5. Исследование «деполяризации» излучения четвертьволновой оптическим волокном, деформированным кручением

Согласно данным вышеприведенных опытов, в практических целях, возможно совместное использование как четвертьволновой катушки с оптическим волокном, так 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. 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 относительно длинной ВОЛП, четвертьволновой катушки с оптическим волокном и ее оптимальное скручивание позволяет снизить поляризацию излучения с 17 дБ до величины 0,14 дБ, позволяет исключить из оптического тракта дорогостоящие оптические элементы (например, четвертьволновые пластины) и упростить конструкцию ПД.

6. Проведенные экспериментальные исследования показали возможность значительного снижения степени поляризации оптического излучения ИОИ сравнительно простыми методами, что позволяет улучшить метрологические характеристики ПД.

7. В дальнейшем планируется расширить ассортимент исследуемых оптических волокон, провести исследование температурной стабильности поляризационных характеристик, разработать уточненные математические модели поляризационных эффектов в механически деформированном оптическом волокне, совмещенном с его кручением, и методику проектирования рассмотренных «деполяризатором» оптического излучения.

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, S.** 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. **Gholamzadeh, B.** Fiber optic sensors / B. Gholamzadeh, H. Nabovati // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2008. – Vol. 42. – P. 297-307.
5. **Matyunin, S.A.** Fiber-optical sensors based on mono-crystal films of garnet ferrites for mechatronic systems / S.A. Matyunin, O.G. Babaev // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 106. – P. 202-209. - DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.025.
6. **Matyunin, S.A.** Contactless fiber-optic vibration sensors for explosive manufacturing / S.A. Matyunin, O.G. Babaev // Proceedings of 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV 2015). – 2015. – Vol. 6. – P. 150-151.
7. **Thévenaz, L.** Advanced fiber optics: Concepts and technology / L. Thévenaz. – Lausanne: EPFL Press, 2011. – 393 p. – ISBN: 978-1-439-83517-3.
8. **Gisin, N.** Polarization mode dispersion of short and long single-mode fibers / N. Gisin, J.-P. Von der Weid, J.-P. Pelloux // Journal of Lightwave Technology. – 1991. – Vol. 9, Issue 7. – P. 821-827. – DOI: 10.1109/50.85780.

9. **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.
10. **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.
11. **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. – 1983. – P. 210-212.
12. **Alferov, S.V.** Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate / S.V. Alferov, S.N. Khonina, S.V. Karpeev // *Journal of Optical Society of America A*. – 2014. – Vol. 31, Issue 4. – P. 802-807. – DOI: 10.1364/JOSAA.31.000802.
13. **Karpeev SV.** Fibre sensors based on transverse mode selection / S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, A.V. Gavrilo, V.A. Erolov // *Journal of Modern Optics*. – 2007. – Vol. 54, Issue 6. – P. 833-844. – DOI: 10.1080/09500340601066125.
14. **Garitchev, V.P.** Experimental investigation of mode coupling in a multimode graded-index fiber, caused by periodic microbends using computer-generated spatial filters / V.P. Garitchev, M.A. Golub, S.V. Karpeev, S.G. Krivoshlykov, N.I. Petrov, I.N. Sissakian, V.A. Soifer, W. Haubenreisser, J.-U. Jahn, R. Willsch // *Optics Communication*. – 1985. – Vol. 55, Issue 6. – P. 403-405. – DOI: 10.1016/0030-4018(85)90140-3.
15. **Карпеев, С.В.** Анализ и формирование многомодовых лазерных пучков методами дифракционной оптики / С.В. Карпеев. – М.: Радио и связь, 2005. – 120 с. – ISBN: 5-256-01789-6.
16. **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.
17. **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.
18. **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.
19. **Matyunin, S.A.** Simulation of the characteristics of a magneto-optical displacement transducer / S.A. Matyunin, M.V. Stepanov, O.G. Babaev // *Measurement Techniques*. – 2016. – Vol. 59, Issue 8. – P. 832-837.
20. **Babaev, O.G.** Simulation of contactless fiber-optic system for valve status monitoring / O.G. Babaev, S.A. Matyunin, M.V. Stepanov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 176. – P. 2-11. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.266.
21. **Matyunin, S.A.** Research on characteristics of fiber optic sensors for anthropomorphic robots / S.A. Matyunin // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 176. – P. 128-136. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.280.

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 «Автоматические системы 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.

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.

ГРНТИ: 47.35.41

Поступила в редакцию 23 марта 2017 г. Окончательный вариант – 15 мая 2017 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF DEPOLARIZATION OF LASER RADIATION BY FIBER OPTIC ELEMENTS

S.A. Matyunin¹, O.G. Babaev¹
¹ Samara University, Samara, Russia

Abstract

Results of experimental studies of depolarization of radiation of a semiconductor optical radiation source (ORS) - also known as laser diode - are discussed. "Depolarization" of the ORS eliminates the need to align the polarization axes of the ORS and polarization fiber optic sensor components. We experimentally study the degree of residual polarization of the ORS radiation when using a quarter-wave coil of a multimode optical fiber (Corning OM3 Fiber optical cable LSZH type CO-PD-23) with twisted and non-twisted straight segment of the optical fiber. It is

experimentally established that the use of a quarter-wave coil with twisted straight section of an optical fiber allows one to reduce the polarization distortions from the initial 17 dB to 0.14 dB.

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

Citation: Matyunin S.A., Babaev O.G. 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 was financially supported by 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*. New York: John Wiley & Sons Ltd; 2002. ISBN: 978-0-471-82053-6.
- [4] Gholamzadeh B, Nabovati H. *Fiber optic sensors*. World Academy of Science, Engineering and Technology 2008; 42: 297-307.
- [5] Matyunin SA, Babaev OG. Fiber-optical sensors based on mono-crystal films of garnet ferrites for mechatronic systems. *Procedia Engineering* 2015; 106: 202-209. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.025.
- [6] Matyunin SA, Babaev OG. Contactless fiber-optic vibration sensors for explosive manufacturings. *Proc 22nd International Congress on Sound and Vibration 2015*; 6: 150-151.
- [7] Thévenaz L. *Advanced fiber optics: Concepts and technology*. Lausanne: EPFL Press; 2011. ISBN: 978-1-439-83517-3.
- [8] Gisin N, Von der Weid J-P, Pelloux 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.
- [9] Poole CD. Statistical treatment of polarization dispersion in singlemode fiber. *Opt Lett* 1988; 13(8): 687-689. DOI: 10.1364/OL.13.000687.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Alferov SV, Khonina SN, Karpeev SV. Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate. *J Opt Soc Am A* 2014; 31(4): 802-807. DOI: 10.1364/JOSAA.31.000802.
- [13] Karpeev SV, Pavelyev VS, Khonina SN, Kazanskiy NL, Gavrilov AV, Erolov VA. Fibre sensors based on transverse mode selection. *J Mod Opt* 2007; 54(6): 833-844. DOI: 10.1080/09500340601066125.
- [14] Garitchev VP, Golub MA, Karpeev SV, Krivoslykov SG, Petrov NI, Sissakian IN, Soifer VA, Haubenreisser W, Jahn J-U, Willsch R. Experimental investigation of mode coupling in a multimode graded-index fiber, caused by periodic microbends using computer-generated spatial filters. *Opt Commun* 1985; 55(6): 403-405. DOI: 10.1016/0030-4018(85)90140-3.
- [15] Karpeev SV. Analysis and formation of multimode laser bunches by methods of diffraction optics [In Russian]. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 2005. ISBN: 5-256-01789-6.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Grattan LS, Meggitt BT. *Optical fiber sensor technology: Advanced applications – Bragg gratings and distributed sensors*. New York: Springer; 2000. ISBN: 978-0-7923-7946-1.
- [19] Matyunin SA, Stepanov MV, Babaev OG. Simulation of the characteristics of a magneto-optical displacement transducer. *Measurement Techniques* 2016; 59(8): 832-837.
- [20] Babaev OG, Matyunin SA, Stepanov MV. Simulation of contactless fiber-optic system for valve status monitoring. *Procedia Engineering* 2017; 176: 2-11. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.266.
- [21] Matyunin SA. Research on characteristics of fiber optic sensors for anthropomorphic robots. *Procedia Engineering* 2017; 176: 128-136. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.280.

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 Department of "Automatic systems of power plants" 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.

Babaev Orkhan Gadjibaba ogli (b.1990), graduated from the 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.

Received March 30, 2017. The final version – May 15, 2017.