

УДК 535.512

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА ПОЛИРОВКИ ТОРЦОВ АНИЗОТРОПНЫХ ВОЛНОВОДОВ НА ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В.А. Шулепов<sup>а</sup>, С.М. Аксарин<sup>а</sup>, В.Е. Стригалева<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: [Shulepov\\_Vladimir@mail.ru](mailto:Shulepov_Vladimir@mail.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 02.02.16, принята к печати 21.04.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-444-450

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Шулепов В.А., Аксарин С.М., Стригалева В.Е. Исследование влияния угла полировки торцов анизотропных волноводов на преобразование состояния поляризации излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 444–450. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-444-450

### Аннотация

Предложена оптическая схема для исследования преобразования состояния поляризации на стыке анизотропных волноводов. Схема состоит из источника излучения, контроллера поляризации, многофункциональной интегрально-оптической схемы, одномодового волокна для ввода и вывода излучения из интегрально-оптической схемы и поляризационного сканирующего интерферометра Майкельсона. Излучение от источника вводится через контроллер поляризации в один из портов многофункциональной интегрально-оптической схемы. На выходном порту это излучение принимается различными волокнами, углы скоса которых составляют 19°30', 10°30' или 0°. Прошедшее излучение вводится в поляризационный интерферометр Майкельсона. При различном смещении одного из плеч происходит анализ картины видности, на основе которой определяется величина преобразования поляризации на стыке. В работе получено, что при отклонении угла скоса волновода от оптимального преобразование поляризации на стыке увеличивается. Стыковка анизотропных волноводов является одной из ключевых задач при изготовлении любого типа волоконно-оптических датчиков, которые включают в себя интегрально-оптические элементы. Результаты работы представляют практический интерес для широкого круга специалистов в области применения оптических волноводов.

### Ключевые слова

фазовый интерферометрический датчик, многофункциональная интегрально-оптическая схема, поляризационный сканирующий интерферометр Майкельсона, двулучепреломляющее оптическое волокно

### Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам Лаборатории квантовой электроники Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН за предоставленные образцы многофункциональных интегрально-оптических схем. Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57815X0109, Соглашение № 14.578.21.0109).

## STUDY OF THE EFFECT OF ENDFACES POLISHING ANGLE FOR ANISOTROPIC WAVEGUIDES ON STATE CONVERSION OF LIGHT POLARIZATION

V.A. Shulepov<sup>а</sup>, S.M. Aksarin<sup>а</sup>, V.E. Strigalev<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: [Shulepov\\_Vladimir@mail.ru](mailto:Shulepov_Vladimir@mail.ru)

### Article info

Received 02.02.16, accepted 21.04.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-444-450

Article in Russian

**For citation:** Shulepov V.A., Aksarin S.M., Strigalev V.E. Study of the effect of endfaces polishing angle for anisotropic waveguides on state conversion of light polarization. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 444–450. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-444-450

### Abstract

The paper deals with optical scheme for research of polarization state transformation at the junction of anisotropic waveguides. It consists of a light source, polarization controller, multifunctional integrated optical scheme (MIOS), single-

mode fiber for input and output of optical radiation in MIOS and the polarization scanning Michelson interferometer. Optical radiation from the light source comes through the polarization controller in one of the MIOS ports. Further, in one of the opposite ports the radiation is received by different fibers, polished at the angles of  $19.5^\circ$ ,  $10.5^\circ$  and  $0^\circ$ . After that, the optical radiation gets into polarization Michelson interferometer. With that, the picture visibility is analyzed at different displacement of one arm upon which the value has been determined in the polarization conversion point connections. At the course of work it was obtained that the polarization state conversion at a splicing point rises with the slant angle deviation from its optimal value. Anisotropic waveguides splicing is one of the main tasks during fabrication of any fiber-optic sensor with integrated optical elements. The results of this work are of great interest for the wide range of specialists in the optical waveguides application field.

#### Keywords

phase interferometric detectors, multifunctional integrated optical scheme, polarization scanning Michelson interferometer, birefringent optical fiber

#### Acknowledgements

The authors acknowledge the specialists of Quantum Electronics Laboratory of The Ioffe Institute for provided samples of multifunction integrated optical schemes. This work was done in ITMO University and was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (The unique identifier of the project: RFMEFI57815X0109, Contract No14.578.21.0109).

### Введение

Отрезок времени с 1962 по 1968 г.г. можно считать началом различных исследований по изучению явлений в тонких пленках. В 1965 г. Андерсон и его группа создали тонкопленочные волноводы, а также другие планарные компоненты и схемы для работы в инфракрасной области [1]. В настоящее время интенсивно развиваются методы получения волноводных устройств на подложках из ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ . Была продемонстрирована возможность создания целого ряда различных конструкций, в результате для таких применений волноводных структур на  $\text{LiNbO}_3$ , как, например, внешние модуляторы, были достигнуты хорошие результаты. Преимущество использования представленного кристалла заключается в том, что  $\text{LiNbO}_3$  обеспечивает электрически возбуждаемое двулучепреломление при невысоких значениях управляющего напряжения, а оптические волноводы изготавливают с низкими оптическими потерями. Для изготовления волноводов на вышеупомянутых подложках используют два различных метода: диффузия титана и метод ионного обмена. Основываясь на опубликованных результатах, можно заключить, что для большинства применений предпочтительно использовать волноводы, полученные методом диффузии титана. Внутренние оптические потери кристалла, изготовленного таким методом, составляют порядка 0,2 дБ/см, с учетом потерь на стыках с оптическим волокном около 1 дБ на каждом из-за различных модовых пятен кристалла и волокна, суммарные потери составляют около 4 дБ (на длине волны 1550 нм и длине кристалла 5 см), что для многих применений является приемлемой величиной. Например, у волноводов, изготовленных методом протонного обмена, потери в волноводе кристалла доходят до 1,5 дБ/см. При длине кристалла 5 см суммарные внутренние оптические потери составят 7,5 дБ, и это без учета оптических потерь на стыке с волокном [2]. В работах [3, 4] описаны основные этапы создания канальных волноводов из  $\text{Ti}$  на  $\text{LiNbO}_3$ .

На основе канальных волноводов создают интегрально-оптические модуляторы, которые используются, в том числе в волоконно-оптических датчиках. Интегрально-оптическая схема, представленная в данной работе, является фазовым модулятором в волоконно-оптическом гироскопе, схему которого можно подробно изучить в работах [5, 6]. Поскольку интегрально-оптическая схема используется в волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиках, то очень важно свести к минимуму все преобразования поляризации в оптическом тракте, так как они приводят к возникновению ошибок и искажению сигнала интерферометра [7].

Целью настоящей работы является определение величины поляризационных преобразований в зависимости от углов скоса волноводов и выявление оптимальных значений углов скоса, при которых удастся уменьшить суммарные поляризационные помехи в оптическом тракте. Актуальность работы заключается в необходимости использования интегрально-оптических схем в волоконно-оптических датчиках.

### Экспериментальная установка

Многофункциональная интегрально-оптическая схема (МИОС) представляет собой интегрально-оптическую схему, включающую канальные волноводы на кристалле  $\text{LiNbO}_3$ , выполненные методом диффузии титана и имеющие топологию X-образного разветвителя. Помимо этого, МИОС включает в себя поляризатор и электроды фазового модулятора.

Использование интегрально-оптических фазовых модуляторов на  $\text{LiNbO}_3$  обусловлено высокой эффективностью модуляции фазы световодной моды [4, 8].

Так как показатели преломления волокна ( $n_b=1,47$ ) и кристалла ( $n_o=2,21$ ,  $n_e=2,14$ ) различаются, то на торцах кристалла возникают френелевские отражения от точек  $C$  и  $D$  (рис. 1) [9], что приводит к возникновению дополнительных паразитных интерферометров, сигналы которых вносят ошибку в измеряемый полезный сигнал. С этим частично борются за счет создания скосов торцов кристалла под углом

больше  $6^\circ$  [5]. Благодаря этому обратные отражения световой волны, распространяющейся по волноводу, возникающие на границе кристалла, частично выводятся в подложку. Дополнительно, для уменьшения величины паразитной интерференции между отраженными волнами, разницу длин волноводов  $C$  и  $D$  делают больше, чем длина деполяризации излучения в  $\text{LiNbO}_3$ . Вышеописанных особенностей образца МИОС добиваются за счет скосов торцов кристалла под углом  $10^\circ$ , а также разводением волноводов как можно дальше относительно друг друга, что отображено на рис. 2.

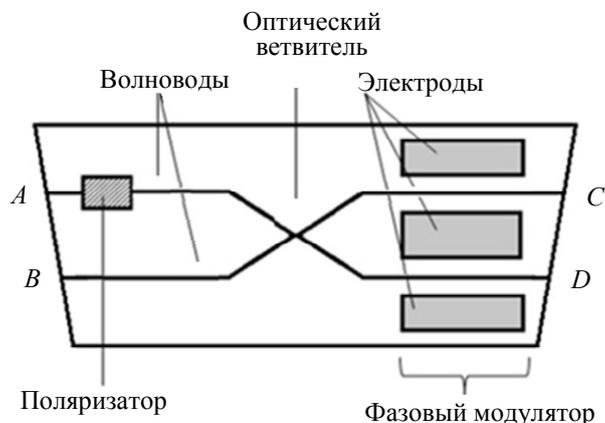


Рис. 1. Схема многофункциональной интегрально-оптической схемы.  
*A, B, C, D* – входные/выходные порты X-образного разветвителя

Из-за различных показателей преломления волокна и кристалла, а также скоса торца, исходя из закона Снеллиуса [10, 11], возникает различие оптимальных углов скоса волокна и кристалла, которые соответственно отображены ниже:  $10^\circ 30'$  –  $7^\circ$ ;  $19^\circ 30'$  –  $13^\circ$ .

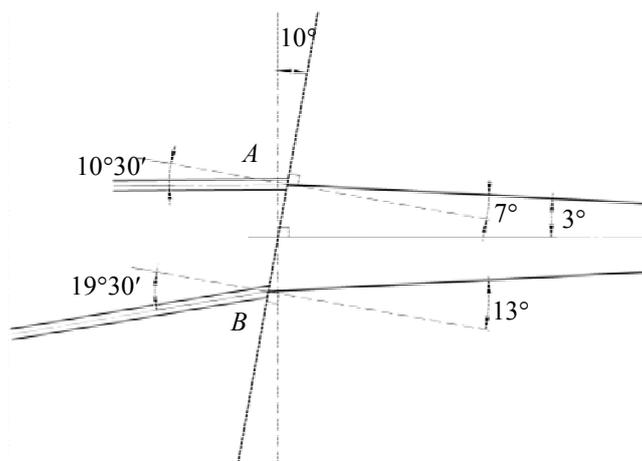


Рис. 2. Схематическое изображение углов стыковки многофункциональной интегрально-оптической схемы с волокном

Поляризационные преобразования, возникающие на локальных дефектах оптического тракта, местах стыковок и сварок в волокнах с двулучепреломлением и переходах на оптических средах с разными показателями преломления, а также неидеальность структуры волокон можно рассматривать как источник возбуждения вторичных поляризационных мод. Инструментом исследования может служить метод, основанный на широкополосной интерферометрии [12]. Преимущество использования данного метода заключается в возможности дифференцировать и анализировать каждый дефект по отдельности в одном оптическом тракте, чего классические методы (к примеру, метод скрещенных поляризаторов) не могут позволить. Методика основана на использовании широкополосного источника излучения и сканирующего интерферометра с анализатором на входе для выделения обеих ортогональных компонент оптического волокна.

Для исследования преобразования состояния поляризации излучения собрана схема (рис. 3), в которой использовался поляризационный сканирующий интерферометр Майкельсона (ПИМ) для исследования оптического тракта, состоящий из волоконного коллиматора, поляризатора, светоделительного кубика, двух зеркал, одно из которых закреплено на линейном микропозиционере, и фотоприемника. Поляризованное оптическое излучение от широкополосного источника проходит через контроллер поляризации, необходимый для выставления нужной ориентации вектора напряженности электрического поля в пространстве, в волоконный поляризатор, и далее излучение вводится с помощью микропозиционе-

ра в волновод. На другом конце интегрально-оптической схемы излучение вводится с помощью шести-координатного микропозиционера с минимальным поступательным шагом 0,1 мкм и минимальным вращательным шагом 0,2 мкрад, в двулучепреломляющее оптическое волокно, торец которого имеет скосы под углами 0°, 10°30' и 19°30', полученные путем полировки. После этого излучение поступает на ПИМ. В работе использовалось анизотропное одномодовое оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой производства «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

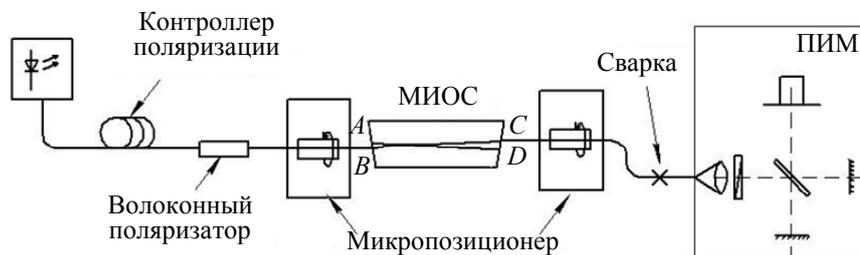


Рис. 3. Оптическая схема для измерения преобразования состояния поляризации излучения

### Исследование преобразования состояния поляризации излучения

При сканировании оптического тракта с использованием ПИМ получаем распределение видности интерференционной картины от смещения плеча интерферометра.

Для исключения влияния на результаты измерений паразитных интерференционных пиков, вызванных источником, было получено распределение видности интерференционной картины от смещения плеча интерферометра при прохождении излучения через схему, изображенную на рис. 4, где видность интерференционной картины – это отношение разности между максимальным и минимальным значениями интенсивностей на интерферограмме к их сумме.

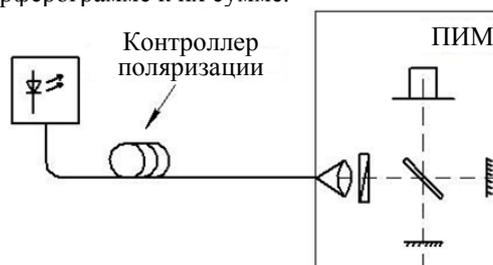


Рис. 4. Схема для калибровки измерений

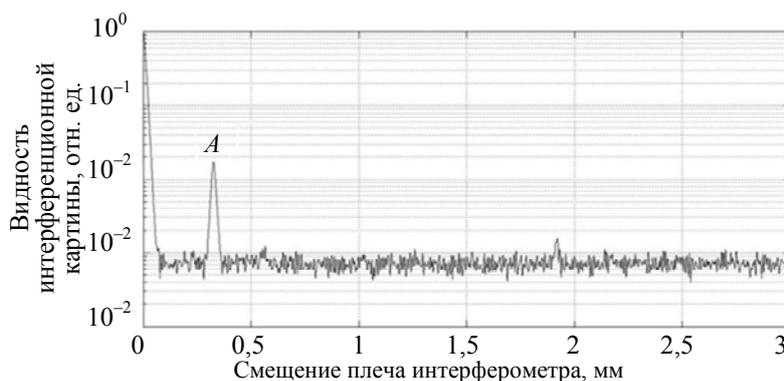


Рис. 5. Распределение видности интерференционной картины от смещения плеча интерферометра при прохождении света от источника излучения через схему на рис. 4

На рис. 5 пик в точке *A* – паразитная интерференция от источника.

Для оценки величины преобразования поляризации в волноводе кристалла были измерены и получены распределения видности интерференционной картины от смещения плеча интерферометра при прохождении излучения через оптическую схему, изображенную на рис. 3, были проведены измерения с волокнами с различным углом скоса, а также с использованием иммерсионного геля в точке стыковки волокна и волновода МИОС и без геля. Оценка величины коэффициента экстинкции (*ER*) на стыке волноводов производилась по формуле

$$ER = \frac{4 \cdot V_c^2}{(\sqrt{1 - 4 \cdot V_c^2} + 1)^2},$$

где  $V_c$  – значение видности интерференционной картины в точке преобразования состояния поляризации на стыке. В качестве примера результата сканирования при прохождении излучения через порты  $B$ ,  $C$  волновода МИОС (рис. 3) показано распределение видности на рис. 6.

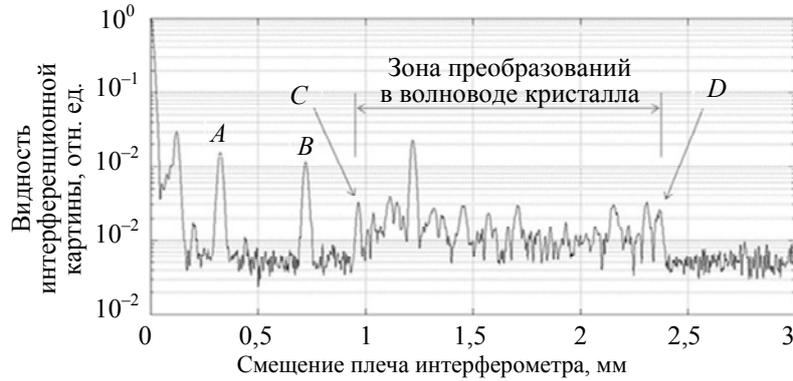


Рис. 6. Распределение видности интерференционной картины от смещения плеча интерферометра при прохождении света через оптическую схему, использованную в исследовании

На рис. 6 пик в точке  $A$  – паразитная интерференция от источника (соответствует пику в точке  $A$  на рис. 5), в точке  $B$  – преобразование поляризации на сварке оптических анизотропных волокон, в точке  $C$  – преобразование поляризации на исследуемом стыке волновода с волокном, а отрезок  $CD$  характеризует преобразование поляризации в волноводе кристалла (распределенный  $H$ -параметр) [13].

Из результатов исследования, представленных в таблице, можно сделать вывод, что значение коэффициента экстинкции ухудшается при отклонении угла скоса от оптимального, при котором наблюдается максимальная эффективность ввода излучения.

Наличие иммерсионной среды	Угол скоса волновода кристалла	Угол скоса полировки волокна	Коэффициент экстинкции на стыке волокна и волновода, дБ
С иммерсией	13°	0°	-45,8
		19°30'	-57,1
Без иммерсии	13°	0°	-45,2
		19°30'	-50,5
С иммерсией	7°	0°	-46,2
		10°30'	-45,8
Без иммерсии	7°	0°	-39,8
		10°30'	-48,4

Таблица. Коэффициент экстинкции на стыке волокна и волновода при различных углах скоса полировки торцов

Поскольку  $H$ -параметр является аддитивной величиной преобразований, связанных с равномерно распределенными неоднородностями в волокне [5], то для расчета величины распределенного  $H$ -параметра используется выражение (1):

$$H = \frac{V_c^2}{L_d}, \tag{1}$$

где  $V_c$  – среднее значение видности интерференционной картины на всей длине распределенного преобразования;  $L_d$  – длина деполяризации волокна, получаемая по формуле (2):

$$L_d = \frac{\lambda^2}{\Delta n \cdot \Delta \lambda} = 0,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \tag{2}$$

где  $\lambda$  – центральная длина волны источника излучения ( $\lambda=1575$  нм) [14];  $\Delta \lambda$  – ширина спектра источника излучения ( $\Delta \lambda=45$  нм);  $\Delta n$  – величина двулучепреломления (для данного кристалла:  $\Delta n=0,073$ ).

На основе формул (1)–(2) была рассчитана величина распределенного  $H$ -параметра для кристалла  $\text{LiNbO}_3$ , которая составила:  $H = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ .

### Обсуждение результатов

В настоящей работе было проведено исследование преобразования состояния поляризации излучения. Для этого была разработана и собрана схема, изображенная на рис. 4. С ее помощью для каждого случая исследуемых углов скоса волокон были получены картины видности, аналогичные рис. 6, и результаты занесены в таблицу. Из данных таблицы видно, что значение коэффициента экстинкции в точке стыковки волокна с волноводом МИОС при оптимальных условиях находится в промежутке от -45 до -57 дБ. Для

сравнения рассмотрим точечные преобразования поляризации в часто используемых волоконно-оптических соединениях и компонентах. Так, например, в пассивных оптических компонентах с сохранением поляризации, производимых в промышленных масштабах, таких как волоконно-оптические разветвители и циркуляторы на волокне типа Panda, величина коэффициента экстинкции составляет не менее – 25 дБ [15]. На оптических соединениях посредством коннекторов типа FC/APC волокон типа Panda значение коэффициента экстинкции находится в пределах от –25 до –35 дБ, а на сварных соединениях оптических волокон с двулучепреломлением коэффициент экстинкции достигает от –30 дБ до –40 дБ [16]. На практике для производства волоконно-оптических интерферометрических датчиков для подавления эффектов, вызванных паразитными поляризационными модами, требуется производить согласование оптических осей с высокой точностью. К примеру, для волоконно-оптического гироскопа навигационного класса точности требуется производить подавление ортогональных паразитных мод до величины не менее – 40 дБ [5].

Измерение распределенного  $H$ -параметра для образца МИОС показало результат  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ . Для сравнения, стандартные волокна с двулучепреломлением имеют величину распределенного  $H$ -параметра в диапазоне  $10^{-5}$ – $10^{-6} \text{ м}^{-1}$  [17]. Однако, так как длина МИОС в среднем составляет 10 см, то вклад паразитных эффектов в сигнал будет незначительным.

### Заключение

Проведено исследование преобразования состояния поляризации излучения на стыке анизотропных волноводов при различных углах полировки. В ходе работы была разработана и собрана схема для проведения исследования поляризационных характеристик узла стыковки анизотропных волноводов.

Получено значение  $H$ -параметра для интегрально-оптического волновода на кристалле  $\text{LiNbO}_3$ , сформированного методом диффузии титана, которое равно  $H=1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ . Обнаружено, что при рассогласовании углов скоса волокна и волноводов многофункциональной интегрально-оптической схемы возникают дополнительные преобразования поляризации на стыке и, как следствие, коэффициент экстинкции ухудшается.

Проведенное исследование может оказаться полезным при создании всех видов волоконно-оптических датчиков, использующих в своей конструкции интегрально-оптические схемы.

### Литература

1. Тамир Т. Волноводная оптоэлектроника. М.: Мир, 1991. 575 с.
2. Аксарин С.М., Стригалева В.Е. Исследование влияния дисперсии двулучепреломления на точность углового согласования поляризационных мод оптических волноводов волоконно-оптического гироскопа // Сборник трудов VII международной конференции «Оптика-2011». СПб., 2011. С. 480–481.
3. Тамир Т. Интегральная оптика. М.: Мир, 1978. 344 с.
4. Серебрякова В., Дейнека Г. Канальные оптические волноводы. Моделирование. LAP Lambert Academic Publishing. 2012. 92 с.
5. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. London: Artech House, 1992. 303 p.
6. Алейник А.С., Стригалева В.Е., Мешковский И.К. Волоконно-оптический гироскоп. Патент РФ №2444704, 2012.03.21.
7. Окуси Т., Окамото К. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
8. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания "Сайрус системс", 1999. 664 с.
9. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том IV. Оптика. М.: Физматлит, 2005. 792 с.
10. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Том III. Волновые процессы. Оптика. Атомная и ядерная физика. М.: Высшая школа, 1979. 511 с.
11. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. 4-е изд. М.: БИНОМ, 2007. 263 с.
12. Аксарин С.М., Стригалева В.Е. Методика и аппарат исследования локальных преобразований в оптических волокнах с двулучепреломлением // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. СПб, 2012. Вып. 2. С. 44–45.
13. Шрамко О.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Аксарин С.М. Метод исследования зависимости  $h$ -параметра анизотропного световода от радиуса изгиба // Научно-технический вестник информационных технологий механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 26–31.
14. Мухтубаев А.Б., Аксарин С.М. Влияние величины ортогонально поляризованных обратных отражений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. №1. С. 65–69. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-65-69
15. Специальные системы. Каталог. Компоненты и приборы волоконной оптики [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sphotronics.ru/catalog/volokonnye-razvetviteli-s-sokhraneniem-polyarizatsii/pfc-98/>, своб. яз. рус. (дата обращения 30.04.2016).

16. Аксарин С.М., Герасимова М.М., Лавров В.С., Уткин А.А. Температурное влияние на оптические характеристики сварного соединения анизотропных оптических волокон [Электронный ресурс]. СПб., 2015. Режим доступа: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/1177/1177.pdf> (дата обращения 30.04.2016).
17. Ероньян М.А., Мешковский И.К. Основы нанотехнологии анизотропных одномодовых волоконных световодов. СПб.: Университет ИТМО, 2014. 80 с.

<i>Шулепов Владимир Андреевич</i>	–	студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Shulepov_Vladimir@mail.ru
<i>Аксарин Станислав Михайлович</i>	–	кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, staksar@gmail.com
<i>Стригалева Владимир Евгеньевич</i>	–	кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vstrglv@mail.ru
<i>Vladimir A. Shulepov</i>	–	student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Shulepov_Vladimir@mail.ru
<i>Stanislav M. Aksarin</i>	–	PhD, Head of laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, staksar@gmail.com
<i>Vladimir E. Strigalev</i>	–	PhD, Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vstrglv@mail.ru