

ВЫСОКОТОЧНАЯ ИК ПОЛЯРИМЕТРИЯ ВОЛНОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ© 2007 г. **М. С. Ерофеева**, доктор техн. наук; **А. Л. Дмитриев**, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

Рассмотрены основные физические факторы, влияющие на точность измерений поляризационных характеристик волноводных оптических элементов: искажения поляризации при вводе (фокусировке) излучения в оптические волноводы, упругие деформации волоконных световодов при их закреплении, деполяризация излучения на неоднородностях и дефектах волноводов. Описана экспериментальная установка для поляриметрических исследований волоконных и интегрально-оптических устройств с точностью оценки относительной мощности поляризационной помехи до 10^{-5} на длине волны 1,32 мкм. Измерено распределение степени поляризации ИК излучения в поперечном сечении пучка света на выходе одномодового световода, приведены результаты измерений деполяризации ИК излучения в локально-деформируемых одно- и многомодовых световодах, волоконном катушечном поляризаторе, прямом и изогнутом канальных интегрально-оптических волноводах.

Коды OCIS: 130.6750.

*Поступила в редакцию 13.11.2006.***Введение**

Оптические измерительные устройства и датчики физических полей часто работают в ближней ИК области спектра длин волн 0,8–1,6 мкм. Достижение предельных чувствительности и качества таких измерителей, как, например, волоконно-оптических гироскопов, возможно лишь при тщательном контроле поляризационных характеристик применяемых в них волноводных оптических элементов – волоконных световодов, микро- и интегрально-оптических согласующих элементов, оптических разветвителей, фазовых модуляторов, поляризаторов и др. [1–3]. В прецизионных оптических измерительных приборах относительная мощность излучения, преобразуемого в нежелательную ортогональную моду поляризации, не должна превышать уровень 35–40 дБ. Поэтому сегодня большую актуальность приобрели вопросы высокоточных измерений поляризационных характеристик волноводных оптических элементов в ИК диапазоне волн и их устойчивости к внешним механическим, температурным и электромагнитным воздействиям [4, 5]. Проблемам ИК поляриметрии волноводов до последнего времени уделялось сравнительно мало внимания. Преобладали теоретические исследования и практически отсутствовали количественные экспериментальные данные в средней, около 1,3 мкм, рабочей области ИК диапазона длин волн. Настоящая работа частично восполняет данный пробел. В статье рассмотрены искажения поляризации, создаваемые фокусирующими линзами, применяемыми при вводе излучения в оптические волноводы, описано устройство специального ИК поляриметра и приве-

дены экспериментальные результаты измерений поляризационных помех, возникающих в различных волоконных и интегрально-оптических элементах.

Поляризационные искажения, вносимые линзой

Ввод излучения в оптические волноводы часто производится с применением фокусирующих устройств – шариковых линз, микрообъективов, градапов. Искажения поляризации вводимого в волновод излучения и возбуждение нежелательных ортогонально поляризованных мод волновода создаются уже при фокусировке излучения в волновод вследствие поляризационных искажений, вносимых фокусирующими элементами. При создании оптических волноводных устройств предельной точности, например высокочувствительных волоконных гироскопов, необходимы учет и коррекция подобных искажений. Поляризационная структура светового поля в окрестности фокуса собирающей линзы теоретически исследовалась в связи с проблемами флуоресцентной микроскопии в [6–8]. К сожалению, полученные в них расчетно-графические результаты неудобны для использования в теоретических оценках. Рассмотрим вывод формулы, количественно описывающей искажения поляризации излучения, вносимые тонкой собирающей линзой. Основные геометрические обозначения показаны на рис. 1.

Отношение амплитудных коэффициентов пропускания сферической поверхности в области азимутальных углов ($0 \leq \alpha \leq \pi/4$) для параллельной ($T_{\parallel}$) и перпендикулярной ($T_{\perp}$) к плоскости падения луча составляющих вектора электрического поля [9]

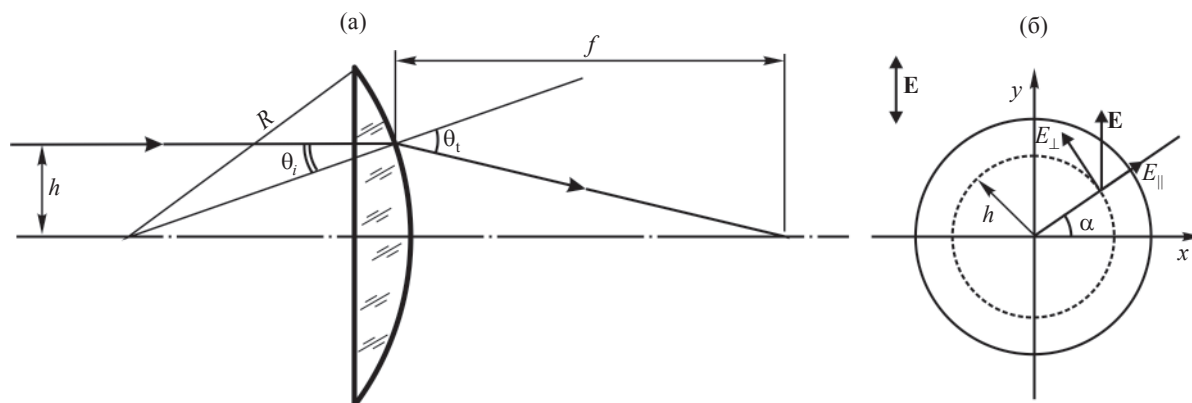


Рис. 1. а – геометрические обозначения: h – полярный радиус направляемого луча, R – радиус кривизны поверхности линзы, f – фокусное расстояние, θ_i и θ_t – углы падения и преломления лучей света соответственно; б – ориентация векторов поляризации излучения света в плоскости линзы: α – азимутальный угол, $E_{\perp}$ и $E_{\parallel}$ – азимутальная и радиальная проекции вектора поляризации падающего излучения.

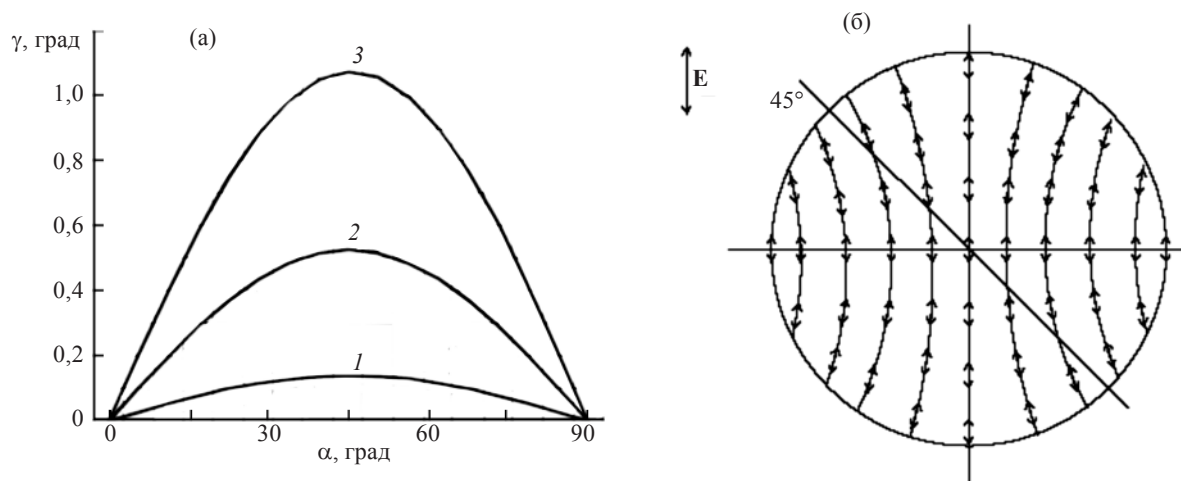


Рис. 2. а – расчетная зависимость угла вращения γ плоскости поляризации линзой от азимута α при отношении h/f равном 0,1 (1), 0,2 (2), 0,3 (3); б – ориентация электрических векторов линейной поляризации излучения в сечении пучка света, прошедшего плосковыпуклую линзу (для наглядности углы поворота увеличены); поляризация падающего на линзу излучения – вертикальная.

$$\frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} = \cos(\theta_i - \theta_t) \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

При малых ($\gamma \ll 1$) углах поворота плоскости поляризации преломленного света в рассматриваемой точке поверхности линзы выполняется равенство

$$\operatorname{tg}(\alpha + \gamma) = \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}}, \quad (2)$$

откуда с учетом (1) в области углов $\alpha \leq \pi/4$ следует

$$\gamma \approx -\frac{1}{4} \frac{h^2}{f^2} \operatorname{tg} \alpha. \quad (3)$$

Как видно, для угла вращения плоскости поляризации γ характерна квадратичная зависимость от радиальной координаты h точки наблюдения и фокусного расстояния f линзы.

Расчетная зависимость от α и общая картина ориентации электрических векторов поляризации световой волны в плоскости пучка непосредственно за линзой показаны на рис. 2. Полученные результаты согласуются с данными поляризационных aberrаций линз, приводимыми в [10, 11].

При прохождении линейно поляризованного излучения через тонкую двояковыпуклую линзу с одинаковыми радиусами кривизны поверхностей угол поворота плоскости поляризации удваивается. При использовании сложных фокусирующих объективов поляризация света в разных участках их апертуры, вообще говоря, становится эллиптической и общая картина поляризационных aberrаций, создаваемых такими объективами, существенно усложняется.

Оценим относительную мощность излучения, преобразуемого тонкой линзой в оптическую моду

с ортогональной формой поляризации. Для компонентов вектора поляризации прошедшей волны выполняется $E_{\parallel}^2 + E_{\perp}^2 = E_0^2$ и при $\gamma \ll 1$ амплитуда ортогонально поляризованной моды $E_{\perp} \approx \gamma E_0$. Мощность излучения, переходящего в ортогональную моду в точке с координатами (h, α) ,

$$dP_{\perp} = |E_{\perp}|^2 dS = E_0^2 \gamma^2 dS, \quad (4)$$

где $dS = h dh d\alpha$. Относительная мощность излучения, преобразуемого плосковыпуклой линзой со световым диаметром D в ортогональную поляризационную моду, равна

$$\eta = \frac{E_0^2 \int \gamma^2 dS}{E_0^2 \int dS} = \frac{\int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} \gamma^2(h, \alpha) h dh d\alpha}{\pi (D/2)^2}. \quad (5)$$

Подстановкой (3) в (5) находим

$$\eta \approx \frac{\pi}{12} \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{D}{2f}\right)^4 = 3,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{f}\right)^4. \quad (6)$$

Расчетные значения поляризационных искажений ($\tilde{\eta} = -10 \lg \eta$), приведены в табл. 1.

Приведенные данные показывают, что поляризационные искажения, вносимые фокусирующими объективами, существенны при сравнительно больших (свыше 0,5) величинах относительного отверстия объективов.

Эксперимент

Принципиальная схема ИК поляриметра, предназначенного для измерения поляризационных искажений, вносимых оптическими волноводами, приведена на рис. 3. Излучение полупроводникового лазерного диода мощностью 10 мВт с длиной волны 1,32 мкм коллимируется, проходит линейный поляризационный фильтр и фокусируется на входной поверхности исследуемого волновода 6. Степень линейной поляризации прошедшего поляризатора 4 ИК излучения не хуже 0,99995. Числовая апертура на выходе объектива 5 пучка света меньше или близка к 1, при этом согласно (6) относительная мощность деполаризованной составляющей прошедшего объектив излучения с типичным гауссовским распределением интенсивности в поперечном сечении пучка не превышает 3×10^{-3} . Механи-

Таблица 1. Относительная мощность $\tilde{\eta}$ ортогонально поляризованной составляющей излучения, на выходе плосковыпуклой линзы

D/f	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\tilde{\eta}$, дБ	52,5	40,5	33,4	28,4	24,6

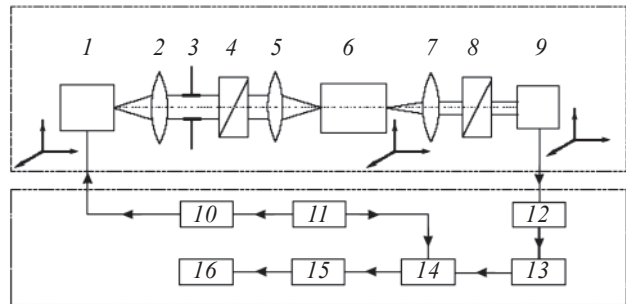


Рис. 3. Оптоэлектронная схема ИК поляриметра. 1 – лазерный диод (LFO-401), 2, 5, 7 – микрообъективы (20°); 3 – ирисовая диафрагма, 4, 8 – линейные поляризаторы (призмы Томпсона); 6 – исследуемый волновод, 9 – фотодиод (PD1180), 10 – модулятор амплитуды тока лазерного диода, 11 – генератор синусоидального напряжения, 12 – преобразователь ток-напряжение, 13 – селективный усилитель, 14 – синхронный детектор, 15 – фильтр низких частот, 16 – цифровой вольтметр.

ческие узлы поляриметра установлены на амортизированной массивной плите-основании, элементы 1, 6 и 9 закреплены на трехкоординатных микропозиционерах. Точность отсчета азимутальных углов вращений поляризатора 4 и анализатора 8 не менее 0,3°. Устройство регистрации уровня выходного сигнала при частоте модуляции тока излучателя 12 кГц обеспечивало линейный динамический диапазон измерений мощности оптического сигнала величиной свыше 45 дБ. При времени интегрирования сигналов около 1 с данное устройство позволяет увеличить линейный диапазон измерений мощности сигнала до уровня 50–55 дБ.

Степень поляризации P ИК излучения, прошедшего исследуемый образец оптического волновода, рассчитывалась согласно выражению

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (7)$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – соответственно максимальный и минимальный выходные сигналы, регистрируемые фотоприемником 9 при вращении анализатора 8 [12]. Для большинства практических приложений определение на основе (7) относительной мощности $(1 - P)$ излучения, переходящего в ортогональную поляризационную моду, достаточно полно характеризует качество исследуемого волновода.

Исследуемыми образцами оптических волноводных устройств являлись одно- и многомодовые волоконные световоды, волоконный катушечный поляризатор, прямой и изогнутый интегрально-оптические волноводы – элементы, наиболее часто при-

меняемые в высокоточных оптических гироскопах и измерителях физических полей.

При закреплении оптических волокон в корпусе измерительного устройства неизбежны локальные деформации световода, вызывающие механические напряжения в его объеме. В результате эффекта фотоупругости в сердцевине световода возникает искусственное двулучепреломление, обуславливающее изменение постоянных распространения мод волновода и состояния поляризации распространяющегося излучения [2, 13]. Например, в одномодовых световодах с радиусом сердцевины r разность постоянных распространения ортогонально-поляризованных мод напряженного волновода [14]

$$\Delta\beta = \frac{4CF}{\pi r E}, \quad (8)$$

где C – коэффициент, характеризующий фотоупругие свойства оптоволокна, F – погонная сдвигивающая сила (в Н/м), E – модуль Юнга материала волокна. Измерения относительной мощности ортогонально поляризованной помехи при разных азимутах вектора линейной поляризации света, вводимого в световод, проводились при установке грузов (гирь) различной массы на горизонтально расположенный участок оптоволокна длиной 10 мм на расстоянии 80 мм от входного торца световода; во избежание повреждения волокна защитная полимерная оболочка световода диаметром 350 мкм на участке деформации волокна не удалялась.

Определено изменение степени поляризации излучения на выходе прямолинейного отрезка многомодового волокна с диаметром сердцевины 55 мкм, диаметром оболочки 125 мкм и длиной 170 мм от массы грузов, вызывающих локальные механические напряжения в оптоволокне. Степень поляризации излучения, прошедшего дециметровый участок многомодового волокна, сравнительно невелика и существенно зависит от азимута поляризации вводимого излучения. Механические напряжения,

создаваемые грузами массой в несколько единиц или десятков грамм, изменяют величину P на 5–6%. Аналогичные измерения проведены для одномодового волоконного световода с однородной сердцевиной диаметром 9 мкм, внешней оболочкой диаметром 125 мкм и длиной 5000 мм. Основная часть световода была уложена на цилиндре (катушке) диаметром 190 мм. Измеренная степень поляризации ИК излучения на выходе такого световода превышает 0,975, и влияние локальных искусственных деформаций оптоволокна сравнительно невелико при ортогональной ориентации вектора деформации и азимута плоскости поляризации вводимого света. Максимальное относительное изменение степени поляризации при действии грузов массой 100–150 г составляет 0,2–2%. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Представленные в табл. 2 результаты соответствуют усредненному в плоскости поперечного сечения оптоволокна (интегральному) значению степени поляризации света на выходе световода. Распределение степени поляризации излучения в разных точках сечения оптоволокна, вообще говоря, может носить сложный характер, особенно в многомодовых световодах. На рис. 4 приведено экспериментально измеренное распределение степени поляризации в поперечном сечении пучка света, выходящего из одномодового (длина волны 1,32 мкм) оптоволокна длиной 5000 мм. Характерно уменьшение степени поляризации света в направлении от центра к периферии пучка, что согласуется с результатами расчетов, приводимыми в [10, 11].

Описанный ИК поляриметр использовался при измерениях качества промышленного волоконно-оптического катушечного поляризатора, выполненного в виде катушки диаметром 40 мм. Экспериментальная зависимость степени поляризации света на выходе такого поляризатора от азимутального угла вектора линейной поляризации вводимого ИК излучения представлена на рис. 5. Обращает на себя внимание симметричный характер полученной за-

Таблица 2. Влияние механических деформаций на степень поляризации P излучения

Тип волокна	Масса груза, г	Азимут входного линейно поляризованного излучения (относительно вектора деформации)		
		45°	90°	135°
Многомодовый световод	0	0,290 ± 0,001	0,803 ± 0,001	0,427 ± 0,004
	5	0,291 ± 0,002	0,795 ± 0,006	0,431 ± 0,003
	10	0,295 ± 0,003	0,774 ± 0,002	0,422 ± 0,002
	20	0,296 ± 0,002	0,750 ± 0,002	0,458 ± 0,002
Одномодовый световод	0	0,99882 ± 0,00007	0,99890 ± 0,00010	0,99884 ± 0,00007
	100	0,99120 ± 0,00010	0,99820 ± 0,00020	0,99014 ± 0,00008
	150	0,97700 ± 0,00020	0,99710 ± 0,00010	0,97590 ± 0,00020

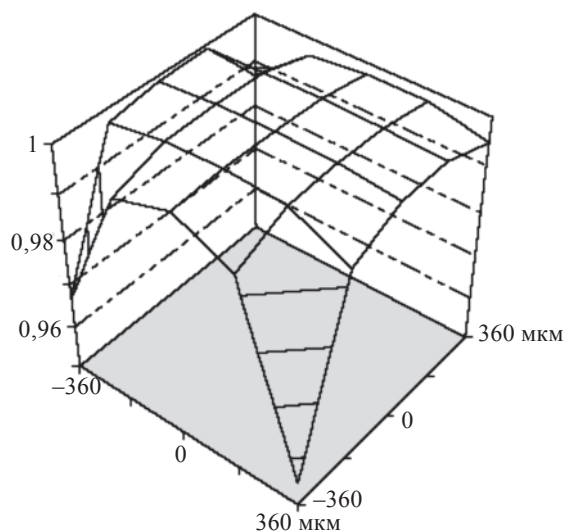


Рис. 4. Пространственное распределение степени поляризации излучения в поперечном сечении пучка света на выходе одномодового волоконного световода.

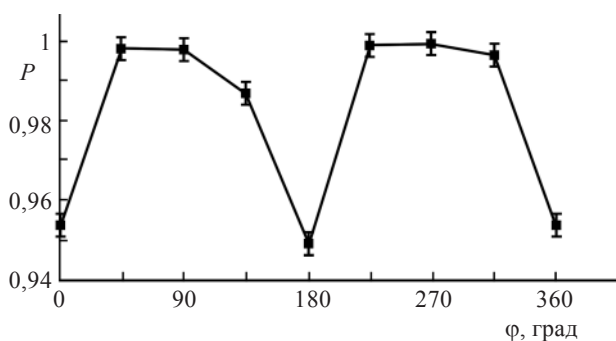


Рис. 5. Степень поляризации излучения P на выходе катушечного поляризатора при различных азимутах φ поляризации входящего линейно поляризованного света.

висимости. Максимальная степень поляризации ($P = 0,9994$) выходного излучения волоконно-оптического катушечного поляризатора изменяется периодически с периодом π рад.

Интегрально-оптические (ИО) волноводы нередко используются в оптических разветвителях, датчиках и измерительных устройствах с контролем состояния поляризации света. Измерена степень поляризации ИК излучения на выходе канальных ИО волноводов, изготовленных по методу ионного обмена в расплаве азотнокислого калия в кварцевом стекле [15]. Исследовались прямой канальный оптический волновод длиной 70 мм и изогнутый волновод с радиусом кривизны 20 мм, соединенный с ИО ответвителем, выполненным на основе связанных волноводов с длиной взаимодействия 1,5 мм [15]. Ширина канальных волноводов 5 мкм, эффек-

Таблица 3. Степень поляризации ИК излучения на выходе канальных ИО волноводов

Ориентация плоскости поляризации входного излучения	Прямой ИО волновод	Изогнутый волновод
Горизонтальная (ТЕ)	$0,926 \pm 0,005$	$0,81 \pm 0,02$
Вертикальная (ТМ)	$0,942 \pm 0,002$	$0,89 \pm 0,01$

тивная толщина волноводов 3 мкм. Результаты измерений степени поляризации излучения на выходе ИО волноводов при их возбуждении линейно поляризованным излучением с длиной волны 1,32 мкм и направлениями векторов поляризации, параллельном (ТЕ) и перпендикулярном (ТМ) базовой поверхности ИО волновода, приведены в табл. 3.

Деполяризация излучения в канальных ИО волноводах существенно зависит от дефектов (шероховатости) границ волноводов и наличия неоднородностей в его объеме, прямо влияющих на величину оптических потерь волновода. Характерно и практически значимо, что вертикально поляризованные ТМ моды рассмотренных как прямого, так и изогнутого канальных волноводов менее деполаризованы, чем ТЕ моды. Значительная деполаризация излучения ТЕ и ТМ мод в изогнутом волноводе, по видимому, вызвана увеличением связи мод вследствие кривизны волновода и дефектами волноводного ИО ответвителя.

Минимальный регистрируемый сигнал на выходе электронного усилителя составлял несколько единиц или десятков мкВ, максимальная амплитуда выходного электрического сигнала 3,5 В. При сравнительно высокой (свыше 0,98) степени поляризации исследуемого ИК излучения абсолютная погрешность измерения степени поляризации достигала значения 10^{-5} . При уменьшении степени поляризации исследуемого излучения до уровня 0,6–0,8 точность измерения степени поляризации также уменьшалась до значений в пределах 10^{-4} – 10^{-3} . Дальнейшее увеличение точности поляриметрических измерений возможно при улучшении внешних условий эксперимента (снижении уровня механических вибраций измерительного стенда, флуктуаций температуры, давления и влажности окружающей среды), стабилизации мощности используемого лазерного излучателя, а также при использовании поляризационных фильтров более высокого качества.

Выводы

В высокоточных оптических волноводных поляриметрах поляризационная помеха возникает уже на стадии фокусировки поляризованного излучения

в волновод, при этом относительная мощность ортогонально поляризованной помехи, создаваемой фокусирующей линзой, пропорциональна четвертой степени относительного отверстия линзы.

Количественные поляриметрические измерения на длине волны 1,32 мкм подтверждают, что одномодовые волоконные световоды существенно устойчивее к влиянию локальных механических напряжений, чем многомодовые.

Степень поляризации ИК излучения в поперечном сечении пучка света на выходе одномодового световода, возбуждаемого линейно поляризованным ИК излучением, уменьшается на 5–6% от центра к периферии световода.

Деполяризация ИК излучения в изогнутом канальном волноводе больше, чем в прямом волноводе, при этом в обоих типах волноводов степень поляризации выходного излучения для ТМ-поляризации на 2–5% выше, чем для ТЕ-поляризации.

Максимальная степень поляризации излучения на выходе волоконного катушечного поляризатора достигается периодически с периодом π рад, в зависимости от азимута преимущественной поляризации вводимого излучения.

Авторы благодарят А.А. Ветрова за предоставление ИО волноводов и полезные консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jones J.D.C. Handbook of Opt. Fibre Sensing Tech. 2002. С. 227.
2. Гуляев Ю.В., Меш М.Я., Проклов В.В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. М.: Радио и связь, 1991. 152 с.
3. Котов О.И., Лиокумович Л.Б. // ПЖТФ. 2004. Т. 30. В. 12. С. 62.
4. Карпачева Т.А., Дмитриев А.Л. // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 11. С. 73.
5. Ерофеева М.С., Дмитриев А.Л. // Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сб. научн. тр. 2004. Т. 1. С. 36.
6. Bahmann K., Hell S.W. // Appl. Phys. Lett. 2000. Т. 77. № 5. С. 612.
7. Hell S.W., Lindek S., Stelzer E.H.K. // J. Mod. Opt. 1994. Т. 41. № 4. С. 675.
8. Sheppard C.J.R., Török P. // Bioimaging. 1997. Т. 5. С. 205.
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
10. Соколов А.Л. // Опт. и спектр. 2000. Т. 89. № 3. С. 512.
11. Соколов А.Л. // Опт. и спектр. 2003. Т. 95. № 5. С. 869.
12. Снопко В.Н. Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения. Минск: Наука и техника, 1992. 366 с.
13. Tai H., Rogowski R. // Opt. Fiber Tech. 2002. Т. 8. С. 162.
14. Котов О.И., Хлыбов А.В., Марков С.И. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 7. С. 7.
15. Ветров А.А., Волконский В.Б., Свистунов Д.В. // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 5. С. 57.