

07;12

Модуляция разности фаз поляризационных мод в одномодовых волоконных световодах

© О.И. Котов, Л.Б. Лиокумович, С.И. Марков, А.В. Медведев, А.В. Хлыбов

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: kotov@radio.rphf.spbstu.ru

(Поступило в Редакцию 3 июля 2003 г.)

Рассмотрены механизмы поляризационной модуляции в одномодовых волоконных световодах, приводящие к модуляции разности фаз поляризационных мод без изменения их амплитуд. Введен коэффициент, характеризующий эффективность цилиндрических пьезокерамических модуляторов, не зависящий от их резонансных свойств. Получены аналитические выражения введенного коэффициента для разных механизмов модуляции. Показано, что наибольшую эффективность обеспечивает поперечное давление на световод. В случае изотропного волокна исследован модулятор с обжимающей обкладкой, что позволяет существенно повысить его эффективность. Для анизотропного волокна наиболее подходящим механизмом, обеспечивающим модуляцию разности фаз, является продольное растяжение, не требующее согласования осей двулучепреломления. В большинстве случаев измеренные в экспериментах величины эффективности волоконных модуляторов разных типов хорошо согласуются с теоретическими оценками.

Введение

В одномодовых волоконных световодах, обладающих линейным двулучепреломлением, изменение поляризации световой волны анализируют на основе рассмотрения суперпозиции двух ортогональных линейно поляризованных мод [1,2]. В общем случае состояния поляризации на выходе световода может модулироваться путем изменения амплитуд и фаз поляризационных мод, однако для ряда приложений необходимо модулировать только разность их фаз, сохраняя неизменным соотношение амплитуд [3,4]. В данной работе проанализированы методы создания такой модуляции за счет механических воздействий на световод в виде изменения радиуса изгиба волокна, растяжения и сдвигания световода. На рис. 1 приведены характерные структуры модуляторов, реализующих указанные воздействия: серым цветом выделен световод, штриховкой — неподвижные части, черным цветом — элемент преобразователя, создающий переменное механическое возмущение, вертикальной штриховкой — закрепляющий клей. Приведенный анализ основан на данных ряда известных работ [1,5–9], а также на результатах проведенных нами дополнительных расчетов и экспериментов.

Теоретический анализ

Двулучепреломление в одномодовых световодах характеризуют разностью постоянных распространения ортогональных поляризационных мод E_x и E_y [1,10]

$$\beta = \beta_x - \beta_y = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) = \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (1)$$

где λ — длина волны света в вакууме; n_x, n_y — эффективные коэффициенты преломления сердцевины световода

да для ортогонально поляризованных мод; Λ — длина поляризационных биений.

Направления плоскости поляризации собственных поляризационных мод, ортогональные друг другу, часто называют осями двулучепреломления световода. Модуляция разности фаз поляризационных мод определяется как изменением двулучепреломления $\delta\beta$, так и изменением геометрической длины δL волокна

$$\delta\varphi = L \cdot \delta\beta + \beta \cdot \delta L. \quad (2)$$

Эффективность работы поляризационных модуляторов обычно характеризуют отношением индекса модуляции разности фаз $\delta\varphi$ к амплитуде приложенного

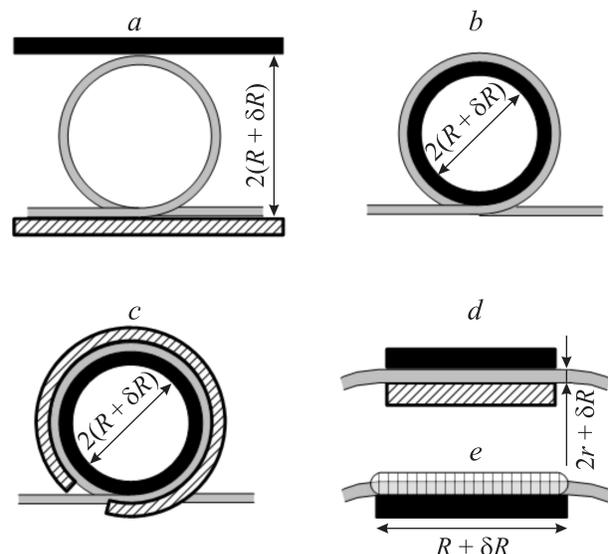


Рис. 1. Разновидности пьезокерамических волоконно-оптических модуляторов разности фаз поляризационных мод.

напряжения U и длине взаимодействия L [5]

$$K' = \frac{\delta\varphi}{U \cdot L} \left[\frac{\text{rad}}{\text{V} \cdot \text{m}} \right]. \quad (3)$$

Однако этот параметр сильно зависит от частоты, что связано с резонансными свойствами конкретного электромеханического преобразователя (пьезокерамического цилиндра, электромеханической системы и т.д.). Для рассмотрения и сравнения эффективности волоконных модуляторов с разными видами возмущения световода представляется целесообразным использовать эффективность в виде отношения индекса модуляции к изменению радиуса пьезокерамического цилиндра δR , нормированное на длину взаимодействия L ,

$$K = \frac{\delta\varphi}{\delta R \cdot L} \left[\frac{\text{rad}}{\mu\text{m} \cdot \text{m}} \right]. \quad (4)$$

Отметим, что возможны и другие подходы рассмотрения эффективности модуляции, например по затрате энергии, относительной деформации и т.д., но в данной работе остановимся только на варианте (4) как наиболее удобном для практического применения результатов анализа.

При механическом возмущении одномодового световода могут проявляться несколько физических механизмов модуляции разности фаз поляризационных мод, которые существенно различаются по эффективности в зависимости от характера возмущения и типа световода. Ниже по отдельности рассмотрены четыре основных механизма: изгиб (присутствует в структуре, показанной на рис. 1, *a*), изгиб с натяжением (рис. 1, *b, c*), поперечное давление (рис. 1, *c, d*), растяжение (рис. 1, *b, c, e*).

1. Изгиб световода. Для изучения влияния деформации изотропного волокна типа „чистый изгиб“ на внутреннее двулучепреломление необходимо устранить другие виды деформации, в частности продольное растяжение. Для этого мы рассмотрели такую конструкцию: несколько витков волокна, скрепленные между собой в виде окружности, подвергались деформации „сплющивания“ в диаметральной направлении так, что при изменении ее радиуса R растяжения волокна не возникло [11, рис. 1]. Как известно [1,6], вследствие изгиба возникает статическое двулучепреломление β_1

$$\beta_1 = \frac{1}{2} C_S \frac{r^2}{R^2}, \quad (5)$$

где r — радиус волокна, коэффициент $C_S = \pi \cdot n_1^3 \times (p_{12} - p_{11})(1 + \mu)/\lambda$, μ — коэффициент Пуассона материала волокна, n_1 — коэффициент преломления сердцевины, p_{11} и p_{12} — упругооптические коэффициенты кварца.

Для $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ $C_S \approx 2.7 \cdot 10^6 \text{ rad/m}$. Оси наведенного двулучепреломления при этом всегда однозначно связаны с направлением оси витков волокна: быстрая

ось перпендикулярна ей, медленная параллельна. Зависимость $\beta_1(R)$ в виде (5) была проверена нами экспериментально.

Изменение радиуса катушки приводит к модуляции величины двулучепреломления. Используя (2) и (5), получим следующее выражение для эффективности K данного механизма модуляции:

$$K_1 = \frac{1}{2} C_S \frac{r^2}{R^3}. \quad (6)$$

В этой формуле учтено, что изменение радиуса изгиба катушки вызывает изменение длины деформированного участка волокна ($L = 2\pi RN$, N — число витков). Наведенное изгибом двулучепреломление содержит множитель второго порядка малости по отношению к (r/R) , что говорит о низкой эффективности модуляции посредством чистого изгиба.

2. Изгиб световода с продольным натяжением. Если световод намотан на цилиндр, то изменение радиуса цилиндра будет сопровождаться изменением продольного натяжения световода. Такой механизм модуляции разности фаз $\delta\varphi$ отличается от случая с чистым изгибом. Намотка волокна с натяжением наводит дополнительное линейное двулучепреломление β_2 , которое скалярно складывается с двулучепреломлением от чистого изгиба [7]

$$\beta_2 = C_S \frac{2 - 3\mu}{1 - \mu} \frac{r}{R} \varepsilon, \quad (7)$$

где ε — относительная продольная деформация волокна.

Направления оптических осей в намотанном волокне известны: они ориентированы так же, как и в случае чистого изгиба, и связаны с направлением оси цилиндра.

Изменение суммарного двулучепреломления $(\beta_1 + \beta_2)$, вызываемое изменением радиуса пьезокерамики δR , с учетом (5) и (7) будет

$$\begin{aligned} \delta\beta &= C_S \frac{r}{R^2} \delta R \left[\frac{r}{R} - \frac{2 - 3\mu}{1 - \mu} (1 - \varepsilon) + \frac{2 - 3\mu}{1 - \mu} \varepsilon \right] \\ &\approx C_S \frac{2 - 3\mu}{1 - \mu} \frac{r}{R^2} \delta R. \end{aligned} \quad (8)$$

В (8) использованы условия $r \ll R$, $\varepsilon \ll 1$, поэтому в выражении осталось только слагаемое, связанное с динамическим продольным натяжением. Пренебрегая малым вкладом от геометрического удлинения волокна, получим эффективность модуляции

$$K_2 = C_S \frac{2 - 3\mu}{1 - \mu} \frac{r}{R^2}. \quad (9)$$

Как видно из (8) и (9), при данных приближениях модуляция двулучепреломления не зависит от величины начального статического натяжения волокна при намотке на цилиндр, поскольку не содержит ε . Этот факт согласуется с результатами работы [5], а также подтверждается в наших экспериментах.

3. Поперечное давление на световод. Для использования в цилиндрических пьезокерамических волоконных поляризационных модуляторах механизма поперечного давления слой волокна, намотанного на цилиндр, обжимался металлическими обкладками на стяжках (рис. 1, *c*). При подаче переменного напряжения на керамику она, изменяя свой радиус, оказывала поперечное давление на волокно по всей его длине. При этом поляризационная модуляция возникала за счет модуляции двулучепреломления $\delta\varphi = \delta\beta \cdot L$. Оси двулучепреломления, наведенного изгибом с начальным натяжением волокна, автоматически получались согласованными с осями двулучепреломления от поперечного давления. В этом случае к статической части наведенного двулучепреломления от изгиба с натяжением добавляется слагаемое β_3 , приближенно равное [8]

$$\beta_3 = \frac{4C_s P}{\pi r E}, \quad (10)$$

где E — модуль Юнга материала волокна (77 GPa), P — погонная сдавливающая сила (нормирована на длину, размерность N/m); справедливость формулы (10) проверена нами экспериментально.

Проблема в применении для вычисления эффективности формулы (10) состоит в том, что в ней присутствует трудно определяемый параметр P , который необходимо выразить через δR .

Используя методы теории упругости [12], мы нашли соотношение между полным смещением w крайних точек волокна, находящимся вдоль оси действия статической силы, и величиной погонной силы P

$$w(P) \approx \frac{2}{\pi E} P \ln \left(\frac{\pi r E}{4P} \right). \quad (11)$$

В этом выражении пренебрегли деформациями обкладок и пьезокерамики. Предполагая $\delta w = \delta R$, получаем связь между изменением радиуса пьезокерамики δR и приращением погонной силы δP

$$\delta R \approx \delta P \frac{2}{\pi E} \ln \left(\frac{\pi r E}{4P} \right). \quad (12)$$

Из (10) и (12) следует, что величину K для механизма поперечного давления на световод можно представить в виде

$$K_3 = \frac{2C_s}{r} \left[\ln \left(\frac{\pi r E}{4P} \right) \right]^{-1}. \quad (13)$$

Отметим также, что приведенные выше формулы не учитывают влияние защитных полимерных покрытий волокон, которые могут существенно ослабить модуляцию двулучепреломления от поперечного давления, поскольку их жесткость на 1–2 порядка ниже, чем кварцевого волокна.

В приведенном выше анализе рассматривалась модуляция двулучепреломления в изотропных одномодовых световодах. Для практических применений большой интерес представляет создание поляризационных

модуляторов на основе анизотропных сильнодвулучепреломляющих волокон (длина биений $\Lambda \leq 1$ cm). Такие волокна, как известно, обладают большим внутренним двулучепреломлением, создаваемым в процессе изготовления. Анизотропные волокна способны хорошо удерживать линейное состояние поляризации света в условиях случайных внешних воздействий, поэтому их широко используют в поляризационных датчиках.

Анализ указанных механизмов модуляции $\delta\varphi$ справедлив и для анизотропного световода, однако надо иметь в виду, что рассогласование осей собственного двулучепреломления по отношению к осям наведенного двулучепреломления может привести к нежелательной связи поляризационных мод и изменению их амплитуд. Использование всех рассмотренных механизмов в модуляторах с двулучепреломляющими световодами возможно только при обеспечении ориентрированной намотки световода (например, при применении специальных световодов с эллиптическим поперечным сечением [13], согласованным с осями собственных поляризационных мод).

Просто реализуемым методом модуляции разности фаз в анизотропном световоде является поперечное сдавливание ровных участков волокна (рис. 1, *d*), но при этом необходимо согласование собственных осей двулучепреломления с направлением действия силы P .

4. Продольное растяжение. В анизотропных волокнах в отличие от изотропных механизм продольного растяжения световода может быть эффективен для модуляции разности фаз поляризационных мод [9]. В [14] показано, что такая модуляция эффективна вследствие неоднородного распределения коэффициента Пуассона μ и коэффициента теплового расширения α в поперечном сечении анизотропного волокна. В большинстве случаев в оболочке, окружающей сердцевину, можно выделить две области с разными параметрами α_1, μ_1 и α_2, μ_2 , механические напряжения в которых и определяют собственное двулучепреломление. При продольном растяжении волокна длиной L на малую величину δL внутреннее двулучепреломление β изменяется приближенно на величину [14]

$$\delta\beta = Q \cdot \beta \frac{\delta L}{L}, \quad (14)$$

где безразмерный коэффициент Q показывает, насколько фазовый сдвиг, связанный с изменением собственного двулучепреломления, больше, чем фазовый сдвиг от увеличения геометрической длины волокна, $Q = (\delta\beta \cdot L) / (\delta L \cdot \beta)$.

Величину Q можно определить экспериментально. Она зависит от типа анизотропного волокна и максимальна для волокон „*bow-tie*“, достигая значения 20–25.

Индекс модуляции разности фаз мод для данного механизма модуляции определяется

$$\delta\varphi = (1 + Q)\beta \cdot \delta L. \quad (15)$$

Выражение для эффективности имеет вид

$$K_4 = \frac{(1 + Q)\beta}{R}, \quad (16)$$

где R — исходная длина растягивающего элемента (рис. 1, *e*) либо радиус растягивающего цилиндра (рис. 1, *b, c*).

В случае изготовления модулятора на основе пьезоцилиндра отсутствует необходимость в соблюдении ориентации волокна при намотке, поскольку способ создания поляризационной модуляции зависит только от чистого растяжения. Наведенное двулучепреломление от изгиба с натяжением малое и имеет случайное направление относительно осей собственного двулучепреломления, поэтому не влияет на эффективность модуляции. Если намотка анизотропного волокна ориентирована, то можно получить дополнительное увеличение эффективности.

Эксперименты

Структурная схема экспериментальной установки по исследованию эффективности волоконных модуляторов разности фаз поляризационных мод показана на рис. 2. Линейно поляризованное излучение He–Ne лазера вводилось в одномодовый световод и после волоконного модулятора (M) подавалось на фотодетектор (D), сигнал которого наблюдался осциллографом. Перед фотодетектором был установлен анализатор (A). Поляризация излучения на входе световода с помощью полуволновой пластинки ($\lambda/2$) подбиралась таким образом, чтобы одинаково возбудить поляризационные моды световода. Модулятор управлялся гармоническим напряжением от генератора (G). При оптимальной настройке и гармонической модуляции разности фаз поляризационных мод $\delta\varphi(t) = \delta\varphi_m \sin(2\pi f \cdot t)$ такая схема формирует выходной сигнал фотоприемника $U_{FR}(t) = \cos(\varphi_0 + \delta\varphi_m \sin(2\pi f \cdot t))$. По осциллограмме такого сигнала нетрудно определить индекс модуляции $\delta\varphi_m$ (примеры осциллограмм показаны на рис. 2).

С использованием стандартного изотропного одномодового волокна проводились эксперименты по измерению эффективности модуляторов, показанных на рис. 1, *a–d*.

Модулятор, использующий механизм чистого изгиба (рис. 1, *a*), работал вследствие смещения сжимающих витки волокна пластин электромагнитным преобразователем (динамической излучающей головкой).

При использовании пьезокерамического цилиндра, на который намотано волокно, была реализована модуляция за счет изгиба с натяжением (рис. 1, *b*).

Применение жестких внешних обкладок со стяжками (рис. 1, *c*) позволило задействовать механизм поперечного давления, который, согласно теоретическим оценкам и результатам измерений, в данной конструкции давал основной вклад в модуляцию.

Конструкция, сдавливающая ровный участок волокна без защитной оболочки (рис. 1, *d*), также создавалась

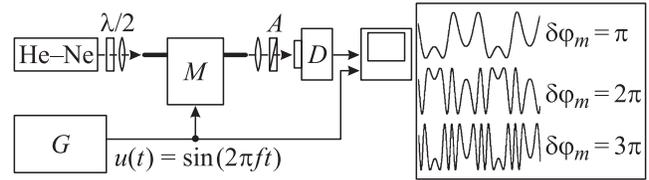


Рис. 2. Схема экспериментальной установки и примеры осциллограмм дифференциально-фазомодулированных сигналов.

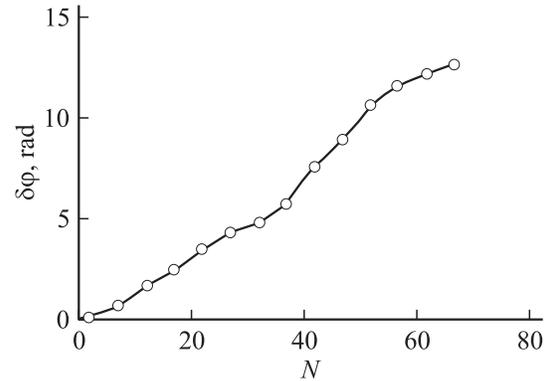


Рис. 3. Зависимость индекса поляризационной модуляции от числа витков (N) анизотропного волокна на пьезокерамическом модуляторе ($R = 1.6$ cm, $\delta R = 7.3 \cdot 10^{-8}$ m, $\Lambda = 3$ mm).

с помощью пьезокерамического преобразователя. При этом за δR в формуле для эффективности принималось смещение поверхностей, сдавливающих волокно.

Для экспериментов с анизотропными световодами использовались волокна с напрягающей эллиптической оболочкой с длиной биений $\Lambda = 3$ и 1.7 mm (коэффициент $Q \approx 11$).

Эксперименты проводились с использованием нескольких пьезокерамических цилиндров различного радиуса (9.5, 14, 16 и 37 mm) и пьезокерамических брусков ($100 \times 17 \times 10$ mm). Пьезокерамические преобразователи возбуждались гармоническим напряжением на частотах в диапазоне 1 kHz (вне областей собственных резонансов). Поскольку для определения эффективности модуляторов необходимо знать величину геометрического смещения, обеспечиваемого преобразователем, была проведена отдельная серия измерений по калибровке колебаний пьезокерамических элементов. Измерения проводились с помощью интерферометра Майкельсона (одно из зеркал смещалось пьезокерамикой), а также волоконных интерферометров Фабри–Перо (световод закреплялся на пьезокерамике). Полученные значения эффективности модуляторов приведены в таблице.

Все модуляторы на основе пьезокерамики имели практически линейную амплитудную характеристику в диапазоне амплитуд напряжений до нескольких десятков вольт.

Некоторые следствия экспериментов можно отметить дополнительно.

Световод	Структура модулятора и основной механизм модуляции	Эффективность K , rad/($\mu\text{m} \cdot \text{m}$)		
		расчет	эксперимент	параметры расчета и эксперимента
Изотропный	рис. 1, <i>a</i> , чистый изгиб	$2.79 \cdot 10^{-3}$	$2.51 \cdot 10^{-3}$	$r = 50 \mu\text{m}; L = 0.35 \text{ m},$ $R = 1.1 \text{ cm}$
	рис. 1, <i>b</i> , изгиб с натяжением	2.68	2.2	$\mu = 0.17; R = 0.95 \text{ cm},$ $r = 50 \mu\text{m}, L = 2.21 \text{ m}$ $P = 30 \text{ N/m};$
	рис. 1, <i>c</i> , поперечное давление	7300	12.6*	$E = 7.7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2;$ $r = 62.5 \mu\text{m}; L = 2.21 \text{ m}$ $P = 120 \text{ N/m};$
	рис. 1, <i>d</i> , поперечное давление	8300	2000	$E = 7.7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2;$ $r = 62.5 \mu\text{m}, L = 0.08 \text{ m}$
Анизотропный	рис. 1, <i>b</i> , продольное растяжение	2.65	2.6	$Q = 11; \Lambda = 3 \text{ cm};$ $R = 0.95 \text{ cm}; L = 2.45 \text{ m}$
	рис. 1, <i>e</i> , продольное растяжение	0.055	0.051	$Q = 11; \Lambda = 1.7 \text{ cm};$ $R = 8 \text{ cm}$
	рис. 1, <i>d</i> , поперечное давление	10^4	1700	$P = 100 \text{ N/m};$ $E = 7.7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2;$ $r = 50 \mu\text{m}; L = 0.08 \text{ m}$

* Волокно с полимерной защитной оболочкой.

Эксперименты подтвердили слабую зависимость эффективности механизма поперечного давления от величины статического поперечного давления. В связи с этим оказалось, что вместо обжима цилиндра с волокном металлическими обкладками можно использовать, например, покрытие волокна воском (на частотах выше 1 kHz воск обладает достаточной жесткостью для создания эффекта жесткой внешней обкладки).

В конструкции с анизотропным световодом, намотанным на пьезокерамический цилиндр, преимущественным является механизм продольного растяжения. Индекс дифференциально-фазовой модуляции в этом случае должен линейно возрастать при увеличении длины волокна в модуляторе. На практике же вследствие случайно ориентированной намотки в волокне дополнительно наводится малое двулучепреломление от изгиба с натяжением, направление которого случайно относительно собственного двулучепреломления. Поэтому экспериментально снятые зависимости индекса модуляции от числа витков N представляют собой кривые с переменным наклоном, средний наклон которых определяется чистым растяжением волокна (пример на рис. 3). Для уменьшения проявления паразитной нерегулярной модуляции от изгиба необходимо подбирать для поляризационных модуляторов пьезокерамические цилиндры по возможности большего радиуса. Здесь также можно отметить, что защитная оболочка практически не снижает эффективность такого модулятора. При растяжении композитного материала внутренние напряжения в его слоях пропорциональны жесткости слоя и кварцевая часть волокна, имеющая величину модуля Юнга в 10–100 раз выше, чем защитное покрытие, принимает на себя основную нагрузку.

Список литературы

- [1] *Rachleigh S.C.* // J. of Lightwave Technology. 1983. Vol. LT-1. N 2. P. 312–331.
- [2] *Ярин А., Юх П.* Оптические волны в кристаллах / Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 616 с.
- [3] *Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И.* и др. Материалы V Международной НТК „Радиолокация, навигация, связь“. Воронеж, 1999. Т. 3. С. 1377–1388.
- [4] *Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 10. С. 28–34.
- [5] *Boyain A.R., Martinez-Leon L., Cruz J.L.* et al. // Applied Optics. 1999. Vol. 38. N 30. P. 6278–6283.
- [6] *Ulrich R., Rashleigh S.C., Eickhof W.* // Opt. Lett. 1980. Vol. 5. P. 273–275.
- [7] *Rashleigh S.C., Ulrich R.* // Opt. Lett. 1980. Vol. 5. P. 354–356.
- [8] *Sakai J.-I., Kimura T.* // J. of Quantum Electronics. 1981. Vol. QE-17. N 6. P. 1041–1051.
- [9] *Rashleigh S.C.* // Proc. 1st Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors. The Institution of Electrical Engineers. London, 1983. P. 210–213.
- [10] *Кульчин Ю.Н.* Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 272 с.
- [11] *Котов О.И., Марусов О.Л., Николаев В.М.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 10. С. 48–52.
- [12] *Кац А.М.* Теория упругости. СПб.: Лань, 2002. 208 с.
- [13] *Арутюнян З.Э., Грудинин А.Б., Гурьянов А.Н.* и др. // Квантовая электрон. 1990. Т. 17. № 10. С. 1363–1368.
- [14] *Varnham M.P., Barlow A.J., Payne D.N., Okamoto K.* // Electron. Lett. 1983. Vol. 19. N 17. P. 699–700.