

07;12

## Эффективный волоконно-оптический поляризационный модулятор

© О.И. Котов, А.В. Хлыбов, С.И. Марков, А.В. Кудряшов

С.-Петербургский государственный политехнический университет

Поступило в Редакцию 2 октября 2003 г.

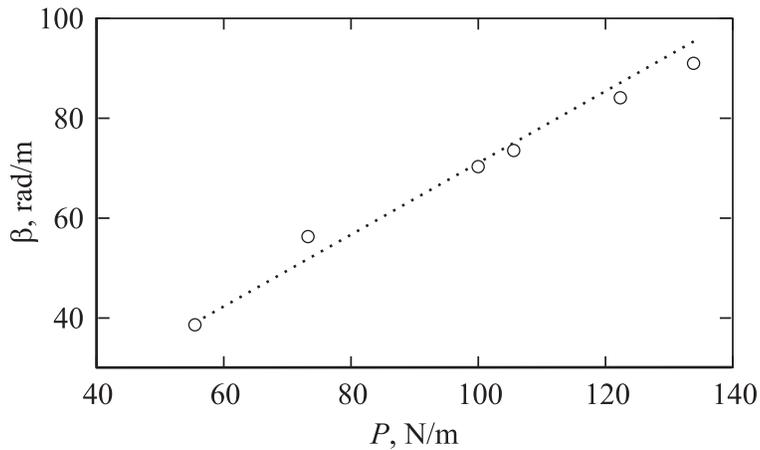
Рассматривается волоконный поляризационный модулятор на основе пьезокерамического преобразователя, принцип действия которого обусловлен эффектом фотоупругости. Модуляция поляризации света в волокне возникает за счет изменения двулучепреломления, наведенного от поперечного давления на волокно. Получено аналитическое выражение эффективности модулятора, экспериментальные данные подтверждают его высокую эффективность.

На основе пьезокерамических резонаторов возможно создание недорогих и эффективных модуляторов поляризации излучения, распространяющегося в одномодовом волокне. Эти устройства наводят в световоде линейное двулучепреломление, которое обычно анализируют на основе рассмотрения двух ортогональных линейно-поляризованных мод. Такие модуляторы могут применяться для управления добротностью оптических резонаторов, для создания амплитудных модуляторов, поляриметрических датчиков [1,2]. При этом часто требуется, чтобы модулятор изменял разность фаз собственных мод волокна, сохраняя постоянными их амплитуды.

В системе „пьезокерамика–волокно“ электрическое напряжение, приложенное к обкладкам пьезокерамики, может вызывать модуляцию разности фаз поляризационных мод как за счет изменения длины волокна, так и вследствие фотоупругого эффекта при возникновении в нем внутренних механических напряжений, приводящих к модуляции двулучепреломления волокна. Будем характеризовать эффективность поляризационных волоконных модуляторов на основе пьезокерамических резонаторов величиной

$$K = \frac{\delta\varphi}{\delta l \cdot L} [\text{rad}/\mu\text{m} \cdot \text{m}], \quad (1)$$

где  $\delta\varphi$  — амплитуда изменения разности фаз поляризационных мод волокна,  $\delta l$  — амплитуда колебаний пьезокерамики,  $L$  — длина волокна



**Рис. 1.** Расчетная зависимость  $\beta(P)$  по формуле (2) обозначена пунктирной линией, экспериментально полученные значения — точками.

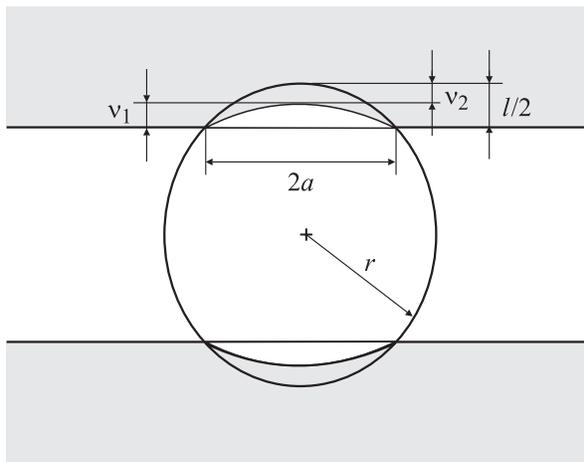
в модуляторе. Введенный таким образом коэффициент эффективности практически не зависит от амплитудно-частотных свойств пьезокерамики, поэтому наиболее удобен для модуляторов такого типа.

Рассмотрев разнообразные варианты конструкции пьезокерамических поляризационных модуляторов, мы выбрали наиболее эффективную, использующую модуляцию наведенного двулучепреломления от поперечного давления на волокно.

Согласно расчетам [3], величина наведенного двулучепреломления от поперечного давления описывается с хорошей точностью формулой

$$\beta = \frac{4C_S P}{\pi r E_1}, \quad (2)$$

где  $C_S$  — коэффициент, характеризующий фотоупругие свойства волокна (на длине волны света  $0.633 \mu\text{m}$  равен  $2.7 \cdot 10^6 \text{ rad/m}$ ),  $P$  — погонная сжимающая сила (в ньютонах на метр длины волокна),  $E_1$  — модуль Юнга материала волокна,  $r$  — его радиус. Зависимость (2)  $\beta(P)$  была проверена нами экспериментально (рис. 1). Изменение разности фаз поляризационных мод в таком модуляторе, следовательно, определяется



**Рис. 2.** Деформирование стеклянных пластин и волоконного световода.

выражением

$$\delta\varphi = \delta\beta \cdot L = \frac{4C_S \cdot \delta P}{\pi r E_1} \cdot L, \quad (3)$$

где пренебрегли малым слагаемым изменения фазы, связанным с геометрическим удлинением волокна.

Основная трудность вычисления эффективности пьезокерамического модулятора, использующего поперечное давление, заключается в том, что, как правило, известна только амплитуда колебаний пьезокерамики  $\delta l$ , и требуется найти соотношение между изменением приложенной силы  $\delta P$  и величиной  $\delta l$ .

В связи с этим была рассмотрена следующая модельная задача теории упругости. Цилиндрическое тело (волокно) длиной  $L$  сдавливается под действием статической силы  $P$  между двумя плоскопараллельными пластинами. При этом полное перемещение  $l$  данной механической системы складывается из перемещения точек волокна  $v_1$  и пластин  $v_2$  вдоль оси действия силы (рис. 2):

$$l = 2v_1 + 2v_2. \quad (4)$$

Используя методы контактной теории упругости цилиндрических тел [4], были найдены выражения для зависимостей  $v_1(P)$  и  $v_2(P)$ :

$$v_1 = \frac{2(1 - \mu_1^2)P}{\pi E_1} \left\{ \ln \left( \frac{r}{a} \right) + \ln 2 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2(1 - \mu_1)} \right\}, \quad (5)$$

$$v_2 = \frac{2(1 - \mu_2^2)P}{\pi E_2} \left\{ \ln \left( \frac{r}{a} \right) + \ln 2 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2(1 - \mu_2)} \right\}, \quad (6)$$

где  $\mu_1, \mu_2, E_1, E_2$  — коэффициенты Пуассона и модули Юнга материалов цилиндра и пластин соответственно,  $a$  — полуширина пятна контакта цилиндра и пластины,

$$a = \sqrt{\frac{4P \cdot r}{\pi} \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}. \quad (7)$$

Выражения (5) и (6) были получены при условии малости  $a$  относительно радиуса цилиндра  $r$ .

Таким образом, после дифференцирования зависимости  $l(P)$  получаем коэффициент эффективности для модулятора, использующего поперечное давление, в виде

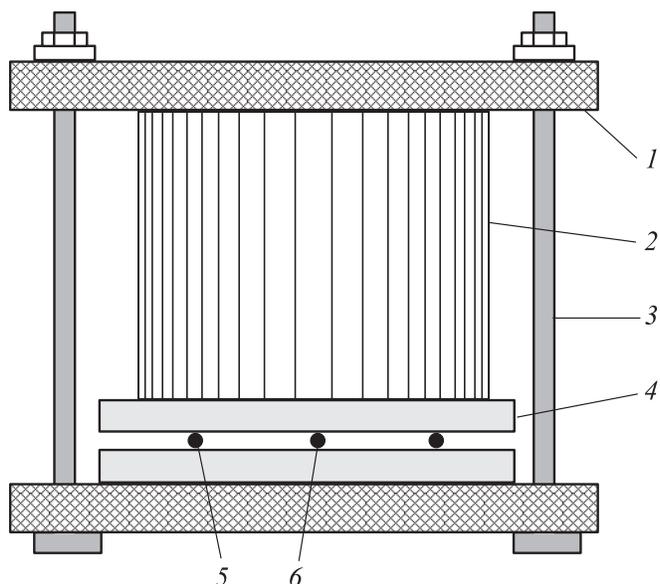
$$K = \frac{2C_S}{r} \cdot \frac{1}{A(P)}, \quad (8)$$

где  $A(P)$  — безразмерный коэффициент пропорциональности между  $\delta l$  и  $\delta P$ :

$$\delta l = \delta P \cdot \frac{2}{\pi E_1} \cdot A(P),$$

$$A(P) = \left( 1 - \mu_1^2 + \frac{E_1}{E_2} (1 - \mu_2^2) \right) \cdot \ln \left[ \frac{\pi r \cdot E_1 E_2}{P(E_1 + E_2 - \mu_1^2 E_1 - \mu_2^2 E_2)} \right] - \left[ 1 + \mu_1 + \frac{E_1}{E_2} (1 + \mu_2) \right]. \quad (9)$$

Из выражения для эффективности следует очевидный результат, что  $K$  увеличивается при уменьшении жесткости волокна и при увеличении жесткости пластин. Также можно видеть, что для работы модулятора необходимо начальное статическое давление  $P$ , однако зависимость  $K(P)$  слабая (имеет логарифмический характер).



**Рис. 3.** Устройство модулятора: 1 — металлическая пластина; 2 — пьезокерамический цилиндр; 3 — стягивающие стержни; 4 — стеклянная пластинка; 5 — отрезки волокна без защитной оболочки; 6 — волоконный световод.

Исследованный образец модулятора, использующего механизм поперечного давления, представлял собой следующую механическую систему (рис. 3). Полый пьезокерамический цилиндр длиной 5 см, радиусом 3.7 см и толщиной стенок 0.4 см воздействовал на волокно без защитной оболочки. Величина статического прижима регулировалась. Длина воздействия  $L$  составляла 8 см. За  $\delta l$  принимали амплитуду продольных колебаний пьезокерамики. Эти колебания целиком передавались стеклянным пластинам, которые проминались под волокном, и волокну, которое сплющивалось.

Для численного расчета, соответствующего нашему модулятору, значения параметров в (9) были приняты следующими:  $r = 62.5 \mu\text{m}$ ,  $E_1 = 7.7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $E_2 \approx 6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $\mu_1 = 0.17$ ,  $\mu_2 = 0.25$ ,  $P \approx 100 \text{ N/m}$ . В результате было получено расчетное значение  $K = 4600 \text{ rad}/(\mu\text{m} \cdot \text{m})$ .

Эффективность различных поляризационных модуляторов на основе пьезокерамических резонаторов

Механизм создания поляризационной модуляции	Источник	Длина волокна в модуляторе $l, \text{m}$	Эффективность $K = \frac{\delta\varphi}{\delta l \cdot L}$ , $\text{rad}/\mu\text{m} \cdot \text{m}$
Изгиб с натяжением	[1]	4.6	$8 \cdot 10^{-4}$
	[5]	0.84	0.0367
Продольное растяжение анизотропного волокна	[6]	0.045	1.48
	[7]	0.125	0.67
Поперечное давление	Здесь	0.08	2000

Эксперименты подтвердили высокую эффективность устройства. В модуляторе было установлено изотропное волокно, ориентация его в модуляторе не требовалась. Индекс модуляции разности фаз поляризационных мод  $\delta\varphi$  вычислялся по показаниям осциллографа, а амплитуда колебаний пьезокерамики измерялась с помощью интерферометра Майкельсона, в одно из плеч которого был встроены модулятор с зеркалом на верхней стеклянной пластинке.

В широком диапазоне частот эффективность исследованного модулятора равнялась  $2000 \text{ rad}/(\mu\text{m} \cdot \text{m})$ , при этом на некоторых частотах достигался индекс модуляции  $5\pi \text{ rad}$  и выше. Кроме того, экспериментально была проверена слабая зависимость индекса модуляции  $\delta\varphi$  от величины постоянной составляющей давления  $P$ .

Для сравнения в таблице приведены экспериментальные значения эффективности для пьезокерамических модуляторов, использующих другие способы создания поляризационной модуляции в волокне. Эти данные были взяты из различных источников и приведены к виду  $\delta\varphi/(\delta l \cdot L)$ . Как видно из таблицы, модулятор, рассмотренный выше, значительно эффективнее аналогичных устройств на основе пьезокерамических резонаторов.

Поперечное давление можно использовать также для повышения эффективности модуляторов на основе пьезокерамик с намотанным на внешнюю поверхность пьезоцилиндра волокном. Для этого можно использовать металлическую обкладку, обжимающую слой волокна. Отметим, что в этом случае оси двулучепреломления, наведенного

изгибом с натяжением волокна при намотке на цилиндр, совпадают с осями двулучепреломления от поперечного давления. В экспериментах с волоконными световодами в защитных оболочках наблюдалось повышение эффективности в 15 раз для пьезокерамики радиусом 1.6 см. Подчеркнем, что если волокно имеет собственное двулучепреломление, то при намотке необходимо согласовывать его оси с направлением осей наведенного двулучепреломления для избежания связи мод.

## Список литературы

- [1] *Boyain A.R., Martinez-Leon L., Cruz J.L., Diez A., Andres M.V.* // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. N 30. P. 6278–6283.
- [2] *Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2000. Т. 26. В. 10. С. 28–34.
- [3] *Sakai J.-I., Kimura T.* // *J. of Quantum Electronics.* 1981. V. QE-17. N 6. P. 1041–1051.
- [4] *Кац А.М.* Теория упругости. СПб.: Изд-во „Лань“, 2002. 208 с.
- [5] *Rashleigh S.C.* // *Optics Letters.* 1980. V. 5. N 9. P. 392–394.
- [6] *Rashleigh S.C.* // *Pros. The First International Conference on Optical Fiber Sensors.* The institution of Electrical Engineers (London, 1983). P. 210–213.
- [7] *Verbandt Y., Van Vinckenroy G., Voet M.R.H.* „Polarimetric optical fibre sensors: aspects of sensitivity and practical implementation“. Presented at the OFS-11. Japan, 1996. We 3–42. P. 340–342.
- [8] *Rashleigh S.C.* // *Optics Letters.* 1981. V. 6. N 1. P. 19–21.