

文章编号 1004-924X(2007)02-0230-07

PZT 薄膜驱动的全光纤相位调制器数学模型

吴亚雷, 吴有金, 朱龙洋, 刘 芳, 褚家如

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

摘要:提出了一种简单、高效的 PZT 压电陶瓷薄膜覆膜驱动的全光纤相位调制器数学模型, 该模型计入了 PZT 压电陶瓷薄膜侧向压电常数 d_{31} 对相位调制效率的影响, 结果表明, 对于 PZT 压电陶瓷薄膜覆膜驱动的全光纤相位调制器, 这种影响是不能忽略的, 由侧向压电常数 d_{31} 引起的相位调制相当于由压电常数 d_{33} 引起的相位调制的 15%。应用此模型计算了 PZT 压电陶瓷薄膜、内电极以及外电极的机械与压电性能等参数对于全光纤相位器的相位调制效率的影响。该模型可应用于全光纤相位调制器的设计与优化。

关键词:全光纤相位调制器; 频率响应; PZT 薄膜

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Mathematical model of all-fiber phase modulators with lead zirconate titanate coating

WU Ya-lei, WU You-jin, ZHU Long-yang, LIU Fang, CHU Jia-ru

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A theoretical model of all-fiber phase modulators with Lead Zirconate Titanate (PZT) coating was proposed by simply considering radial strain in all-fiber phase modulators. It has been shown that piezoelectric coefficient d_{31} of PZT is as important as d_{33} to all-fiber phase modulators phase modulation of 15%. Effect of thickness and stiffness of the piezoelectric PZT films on the phase modulation efficiency is calculated. Results show that the materials properties of inner and outer electrodes of all-fiber phase modulators can be optimized with this model. This model is suitable for the design and optimization of all-fiber phase modulators.

Key words: all-fiber phase modulator; frequency response; PZT films

1 引言

光纤相位调制器是光纤激光器、光纤谐振腔、光纤干涉仪等系统的重要器件¹⁻³。传统的光纤相

位调制器体积大, 难以消除二次折射, 耦合结构复杂, 耦合损耗大^[4,5], 因而全光纤相位调制器受到越来越多的关注。全光纤相位调制器是在光纤表面沉积一层具有压电性的薄膜制成, 它利用电场作用下压电薄膜的体积变化引起光纤内部应变,

收稿日期: 2006-07-03; 修订日期: 2006-08-24.

基金项目: 教育部博士点基金 (No. 20030358018); 优秀青年教师资助计划项目; 中国科学技术大学研究生创新基金

从而改变光纤的折射率,实现相位调制。全光纤相位调制器具有体积小,驱动电压低,易于集成到全光纤系统中等诸多优点。但是由于光纤表面压电薄膜制备技术尚不成熟,不同的制备工艺与压电材料在光纤表面获得的压电薄膜的性能与尺寸存在很大的差异,因此,如何通过工艺优化,制备出性能优异的全光纤相位调制器成为研究的热点。而通过建立数值模型,分析压电薄膜的各项性能参数与相位调制性能的关系,对于优化工艺过程,明确优化方向有着重要的意义。

J. Jarzynski 针对基于压电聚合物 PVF₂ 的全光纤相位调制器建立了一种数值模型,用于计算全光纤相位调制器内部应力状态,并得到了相应的光纤相位调制效率^[6]。D. A. Barrow 等人进一步发展了该模型,并将其应用于基于 PZT 的全光纤相位调制器^[7]。但是 D. A. Barrow 的模型当中并没有考虑 PZT 材料的重要参数侧向压电常数 d_{31} (等效于 h_{31}),同时该模型用于计算 PZT 压电陶瓷薄膜覆膜内部电位移的公式当中存在一个未知常数 D_0 ,需要由实验测得。A. Bhatti 等人使用有限元方法,分别对基于压电聚合物和压电材料 AlN 的全光纤相位调制器进行了数值模拟^[8,9]。虽然有限元方法计算结果与实验结果吻合比较好,但是有限元方法计算速度慢,计算过程比较复杂。针对以上情况,本文提出了一种简单、高效的计算方法,并在所建立的模型当中充分考虑了压电常数 d_{31} ,给出了电位移常数 D_0 的计算方法。

2 原理

全光纤相位调制器由光纤、内电极、压电层、外电极四部分组成,如图 1 所示,其中 a 、 b 、 c 、 d 分别表示光纤的半径、内电极的外径、压电层的外径和外电极的外径。全光纤相位调制器的工作原理是,压电材料在内电极和外电极之间的电场作用下发生形变,对内部的光纤产生作用,改变光纤内部应变状态,使光纤的折射率发生变化。光纤内部折射率变化可以用下式表示^[6]:

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2}(p_{11}S_1 + p_{12}S_2 + p_{12}S_3), \quad (1)$$

其中, n 是光纤纤芯的折射率; S_1 、 S_2 、 S_3 是光纤在光线振动方向、与光线振动垂直方向和轴向的

应力; p_{11} 、 p_{12} 是光电系数。

波长为 λ_0 的光线通过长度为 l 的全光纤相位调制器后相位变化如下:

$$\Delta\varphi = knl \left\{ S_z - \frac{n^2}{2}(p_{11} + p_{12})S_r \right\}, \quad (2)$$

其中, k 表示波长为 λ_0 的光线在真空中的波数, $k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, S_r 表示光纤径向的应变。由于全光纤相位调制器的轴对称性, $S_1 = S_2 = S_r$ 。通常由于长度方向的变化引起的相位变化和相对于径向折射率变化引起的相位变化,在高频振动情况下是可以忽略的,所以上式还可写成下面的形式^[4]:

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda_0} l \frac{n^3}{2}(p_{11} + p_{12})S_r, \quad (3)$$

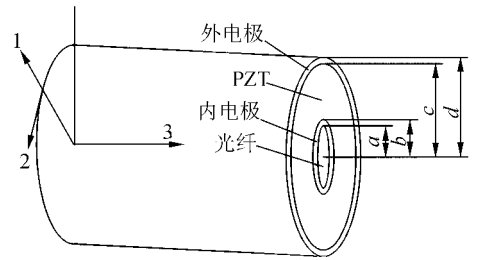


图 1 全光纤相位调制器工作原理

Fig. 1 Principle of all-fiber phase modulator

3 模型

基于压电材料的传感器与驱动器,材料内部弹性与介电性直接的耦合,可以由下面的方程表示^[10]:

$$T = c^D S - h^T D, \quad (4)$$

$$E = -hS + \beta^S D. \quad (5)$$

其中, T 和 E 分别表示应力和电场强度, S 和 D 分别表示应变和电位移。 c^D 表示弹性刚度常数矩阵, h 表示压电刚度常数矩阵, h^T 是 h 的逆矩阵, β^S 表示介电隔离常数矩阵。

由于全光纤相位调制器的轴对称性,我们采用柱坐标系来建立模型。全光纤相位调制器内部质点位移表示为 $u(r, t)$, 求出 $u(r, t)$ 就可以由式(5)求得全光纤相位调制器内部的应变,再代入式(2),即可以求出相应的相位调制效率。

$$S_1 = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad S_2 = \frac{u}{r}, \quad S_3 = \frac{\partial u_3}{\partial z}, \quad (6)$$

压电材料 PZT 层内部的应力-应变-电位移

关系式(4),在柱坐标系下可以简化成下面的形式^[8]:

$$T_1 = c_{11}S_1 + c_{12}S_2 + c_{13}S_3 - h_{11}D_1, \quad (7)$$

$$T_2 = c_{12}S_1 + c_{11}S_2 + c_{13}S_3 - h_{12}D_1, \quad (8)$$

$$T_3 = c_{13}S_1 + c_{13}S_2 + c_{33}S_3 - h_{13}D_1. \quad (9)$$

其中,下标 1、2、3 分别表示径向,切向和轴向。

3.1 平衡条件

当全光纤相位调制器在外部电压驱动下工作于稳定状态时,压电层内部应力必须满足如下平衡条件^[12],

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial T_5}{\partial z} + \frac{T_1 - T_2}{r} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

其中 $u = u(r, t)$, 表示压电层内部质点位移。

压电层内没有自由电荷,所以 $\nabla \cdot D = 0$ 。又只有沿径向的电位移非零,所以

$$\begin{aligned} \nabla \cdot D &= \frac{1}{r} \frac{\partial(rD_1)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial D_2}{\partial \theta} + \frac{\partial D_3}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial(rD_1)}{\partial r} &= 0, \\ D_1 &= \frac{D_0}{r}, \end{aligned} \quad (12)$$

假设相位调制器的长度足够长,即忽略在 z 方向上的应力变化, $\partial T_5 / \partial z = 0$ 。式(10)可以化作

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_{11} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right) + \frac{h_{12}D_0}{r^2}, \quad (13)$$

其中, ρ 表示压电材料的密度。对 u, D_1, D_0 进行

分离变量,令 $u = U_1 \cdot e^{j\omega t}, D_1 = D_1 \cdot e^{j\omega t}, D_0 = D_0 \cdot e^{j\omega t}$, 则式(13)和式(7)~(9)化作下列方程:

$$\frac{d^2 U_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_1}{dr} + \left(\omega^2 \frac{\rho}{c_{11}} - \frac{1}{r^2} + \frac{h_{12}D_0}{c_{11}r^2} \right) U_1 = 0, \quad (14)$$

$$T_1 = c_{11} \frac{dU_1}{dr} + c_{12} \frac{U_1}{r} - h_{11}D_1, \quad (15)$$

满足式(14)的解是一阶 Bessel 函数的线性组合,即

$$U_1 = A \cdot J_1(g \cdot r) + B \cdot Y_1(g \cdot r) + \frac{h_{12}D_0}{c_{11}}, \quad (16)$$

其中, A 和 B 是未知系数, $g = \omega \sqrt{\frac{\rho}{c_{11}}}$ 。

同理,全光纤相位调制器的光纤、内电极、外电极三层的内部平衡条件的推导与上面类似,仅压电系数为零。

3.2 边界条件

为了求得未知系数 A 和 B , 必须考虑适当的边界条件。由于光纤、内电极、压电层和外电极四层之间的位移与应力连续,即(1) $U_1(r=0) = 0$; (2) U_1, T_1 在层间连续; (3) $T_1(r=d) = 0$; (4) 内电极和外电极之间的电压为 1 V, 即 $\int_b^c E_1 dr = 1$ 。

由式(4)得

$$E_1 = -h_{11} \frac{\partial u}{\partial r} - h_{12} \frac{u}{r} + \beta_1 \frac{D_0}{r}, \quad (17)$$

代入边界条件(4) $\int_b^c E_1 dr = 1$, 得

$$\begin{aligned} A \cdot \left[-h_{11} (J_1(g \cdot c) - J_1(g \cdot b)) - h_{12} \int_b^c \frac{J_1(g \cdot r)}{r} dr \right] + \\ B \cdot \left[-h_{11} (Y_1(g \cdot c) - Y_1(g \cdot b)) - h_{12} \int_b^c \frac{Y_1(g \cdot r)}{r} dr \right] + D_0 \cdot \left(-\frac{h_{12}^2}{C_{11}} + \beta_1 \right) \cdot \ln \frac{c}{b} = 1, \end{aligned} \quad (18)$$

3.3 系统方程组

将式(14)、(15)、(16)代入以上边界条件,可以得到描述整个系统工作状态的方程组。

$$\begin{bmatrix} s_{11} & \cdots & s_{18} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{81} & \cdots & s_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{(1)} \\ A^{(2)} \\ B^{(2)} \\ A^{(3)} \\ B^{(3)} \\ D_0^{(3)} \\ A^{(4)} \\ B^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_8 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

通过求解上面的方程组,可以求出 $A^{(i)}, B^{(i)}$ 和 $D_0^{(3)}$, 进而求得全光纤相位调制器在 1 V 的驱动电压下的折射率变化,代入式(2),即可求得相应的相位调制特性。

4 结果与讨论

全光纤相位调制器的纤芯材料通常选用标准单模光纤^[6,7]。标准单模光纤去掉外面的保护层后,剩下部分的纤芯直径为 9 μm , 总直径为 125 μm 。电极材料通常选用真空镀膜制备的 Al、Au/Cr 或者磁控溅射制备的 Pt/Ti, 其中 Cr 和 Ti

的作用是增加 Au 和 Pt 与光纤直接的粘附力,厚度一般只有几十纳米,在计算当中可以忽略不计。由于 Pt 与 PZT 的晶格非常接近,有利于 PZT 晶粒的生长以及择优取向^[13],所以 Pt/Ti 是 PZT 压电陶瓷薄膜覆膜驱动的全光纤相位调制器内电极的首选材料。外电极的主要作用是决定全光纤相位调制器起作用的压电层的形状与长度,一般选用真空镀膜制备的 Al 或 Au/Cr,也有人将银胶涂附在压电层的外表面作为外电极^[14,15]。这里选用 Pt/Ti 作为内电极材料、Au/Cr 作为外电极材料,相应的材料参数如表 1 所示。

表 1 全光纤相位调制器材料参数

Tab. 1 Material properties of all-fiber phase modulators

	光纤	Pt	PZT	Au
密度(10^3 kg/m^3)	2.21	21.44	7.7	19.3
杨氏模量(GPa)	72	170		80.9
泊松比	0.14~0.17	0.2		0.2
拉梅系数 λ (GPa)	16.1			
G (GPa)	31.2			
Pockels 系数 P_{11}	0.121			
P_{12}	0.270			
刚度系数 c_{11} (GPa)			150	
c_{12} (GPa)			65.6	
压电系数 h_{11} (10^8 V/m)			26.88	
h_{12} (10^8 V/m)			-9.257	

4.1 d_{31} 的相位调制作用

压电材料的侧向压电常数 d_{31} 对于全光纤相位调制器的相位调制效率具有非常大的影响。在低于一阶共振频率的频率范围内,压电材料的侧向压电常数 d_{31} 的相位调制效率与 d_{33} 的相位调制效率的比值是 $\frac{c_{12}}{c_{11}} \cdot \frac{h_{12}}{h_{11}}$ 。以表 1 中 PZT 压电陶瓷

薄膜性能参数为例, $\frac{c_{12}}{c_{11}} \cdot \frac{h_{12}}{h_{11}} \approx 15.1\%$ 。PZT 压电陶瓷薄膜覆膜驱动的全光纤相位调制器的相位调制效率的频率响应特性,如图 2 所示。可以看出, d_{31} 不仅影响全光纤相位调制器的相位调制效率,还对反共振频率位置产生影响,这种反共振现象通常发生在压电层厚度刚好等于压电层内部弹性波波长 $1/4$ 时^[16,17]。

4.2 D_0 的频率响应特性

D_0 可以通过测量全光纤相位调制器驱动电

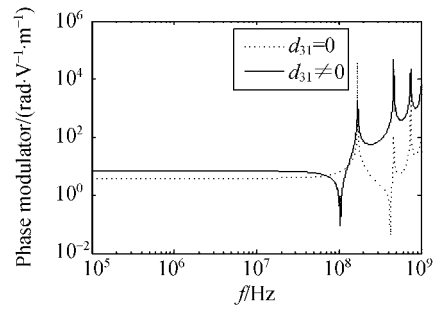


图 2 PZT 压电陶瓷薄膜覆膜驱动的全光纤相位调制器调制效率频率响应特性(实线和点划线分别表示 $d_{31} \neq 0$ 和 $d_{31} = 0$ 时的频率响应特性)

Fig. 2 Frequency response of the all-fiber phase modulator coated PZT. (the solid line and the dashed line are the frequency response when $d_{31} \neq 0$ and $d_{31} = 0$, respectively)

路的相关量,并计算得到^[18],但是通过求解方程组(19)获得 D_0 的方法显然要更简单一些,不需要复杂的测量电路与昂贵的设备。PZT 压电陶瓷薄膜内的电位移常数 D_0 在单位电压的驱动下的频率响应特性如图 3 所示。 D_0 在非共振频率区域内基本保持为常数,这是全光纤相位调制器工作区域,因此使用 J. Jarzynski 和 D. A. Barrow 的模型,即假定 D_0 为常数,计算结果与实验数据在远离共振频率的区域偏差不大。

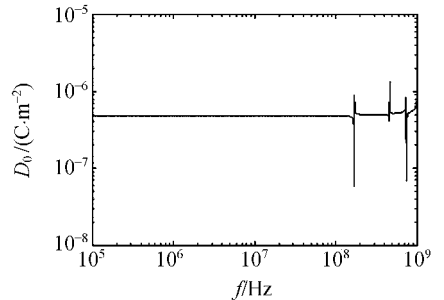


图 3 电位移常数 D_0 的频率响应特性

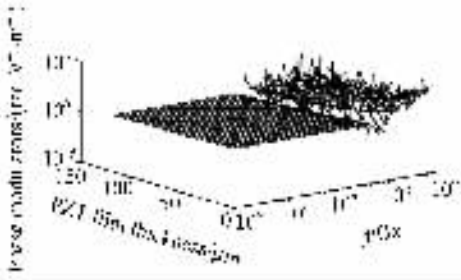
Fig. 3 Frequency response of electric displacement constant D_0

5 全光纤相位调制器的参数优化

5.1 PZT 压电陶瓷薄膜的厚度与刚度

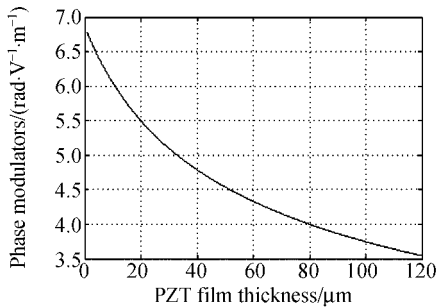
PZT 压电陶瓷薄膜厚度对于全光纤相位调制器频率响应特性的影响如图 4(a) 所示。当 PZT 压电陶瓷薄膜的驱动频率低于全光纤相位

调制器的 1 阶共振频率时,相位调制效率基本保持为常数,而且相位调制效率随 PZT 压电陶瓷薄



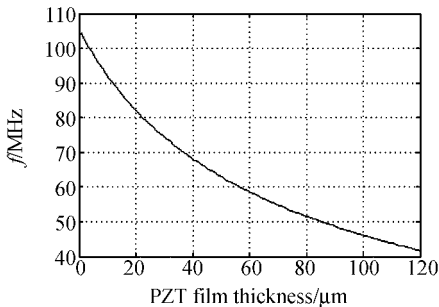
(a) PZT 压电陶瓷薄膜厚度对于全光纤相位调制器频率响应特性的影响

(a) Effect of PZT film thickness on frequency response of all-fiber phase modulators



(b) PZT 压电陶瓷薄膜的厚度对工作于 100 kHz 的全光纤相位调制器的相位调制效率的影响

(b) Effect of PZT film thickness on efficiency when the all-fiber phase modulators working at the typical frequency of 100 kHz



(c) PZT 压电陶瓷薄膜的厚度对全光纤相位调制器的最高工作频率的影响

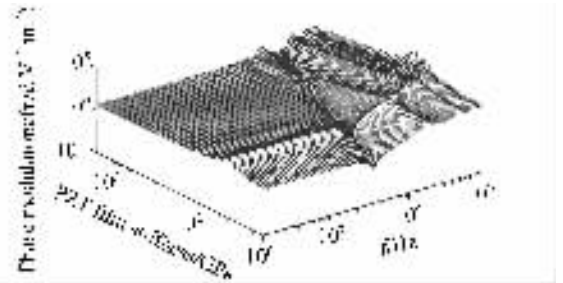
(c) Effect of PZT film thickness on working frequency upper limit of the all-fiber phase modulators

图 4 全光纤相位调制器的调制效率随 PZT 压电陶瓷薄膜的厚度变化的规律

Fig. 4 PZT film thickness vs phase modulation efficiency of all-fiber phase modulators

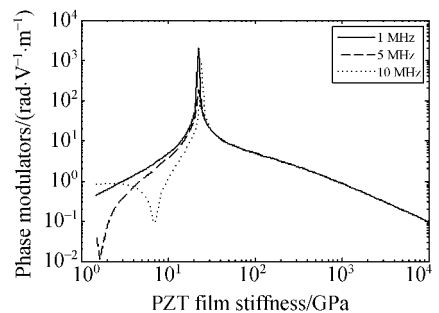
膜的厚度增加而减小,如图 4(b)所示。最高工作频率亦随 PZT 压电陶瓷薄膜的厚度增加而减小,如图 4(c)所示。全光纤相位调制器的这种特性主要是由其结构的对称性决定。PZT 压电陶瓷薄膜覆膜驱动的全光纤相位调制器的最大相位调制幅度由相位调制效率与 PZT 压电陶瓷薄膜的击穿电压决定。PZT 压电陶瓷薄膜厚度为 $1 \mu\text{m}$ 时,其相位调制效率为 $6.5 \text{ rad/V} \cdot \text{m}$,如果驱动器长度为 10 mm,要实现 π 的相位调制幅度,驱动电压只需要 16 V。

不同的 PZT 压电陶瓷薄膜制备工艺得到的 PZT 压电陶瓷薄膜在性能上的差异较大,其中 PZT 薄膜刚度对全光纤相位调制器调制效率的影响尤为显著,如图 5 所示。当全光纤相位调制



(a) PZT 压电陶瓷薄膜刚度对于全光纤相位调制器频率响应特性的影响

(a) Effect of PZT film stiffness on the frequency response of all-fiber phase modulators



(b) PZT 压电陶瓷薄膜的刚度对工作于 1 MHz、5 MHz 和 10 MHz 的全光纤相位调制器的相位调制效率的影响

(b) Effect of PZT film stiffness on efficiency of all-fiber phase modulators working at the typical frequency of 1 MHz, 5 MHz and 10 MHz

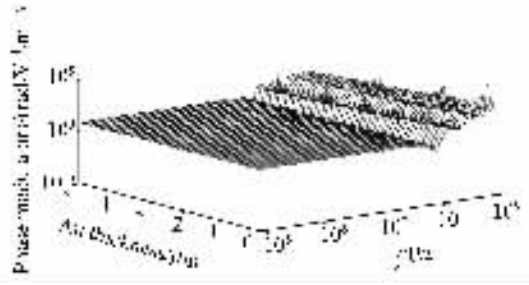
图 5 全光纤相位调制器的调制效率随 PZT 压电陶瓷薄膜的刚度变化的规律

Fig. 5 PZT film stiffness vs phase modulation efficiency of all-fiber phase modulators

器的驱动频率低于 10 MHz 时,相位调制效率随 PZT 薄膜刚度变化的最大值出现在 PZT 薄膜的刚度为 39 GPa 附近。

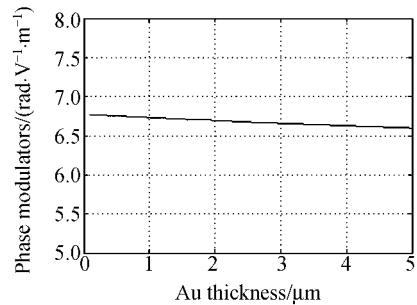
5.2 内、外电极的厚度

以磁控溅射方法制备的 Pt 薄膜和以真空蒸发镀膜制备的 Au 薄膜的厚度通常在 200 nm 左右,因此在一些模型当中常常忽略内外电极的作用^[18],而以真空蒸发镀膜制备的 Al 厚度要厚得多,其厚度的影响也是不可忽略的^[7]。因此,分别以 Pt、Au 为全光纤相位调制器的内外电极,分析内外电极的厚度对于全光纤相位调制效率的影响。内电极越厚,则内电极对 PZT 压电陶瓷薄膜的驱动力的屏蔽作用越明显,相应的相位调制频率越小,同样,外电极也会抵消一部分 PZT 压电陶瓷薄膜的驱动作用。PZT 压电陶瓷薄膜的内电极的厚度对全光纤相位调制器的调制效率的影响比外电极的影响大,如图 6。



(c) 外电极 Au 薄膜的厚度对于全光纤相位调制器的频率响应特性的影响

(c) Effect of the thickness of Au outer electrode on the frequency response of all-fiber phase modulators

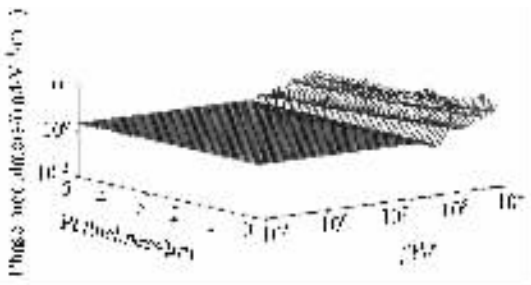


(d) 外电极 Au 薄膜厚度对工作于 100 kHz 的全光纤相位调制器的相位调制效率的影响

(d) Effect of the thickness of Au outer electrode on the phase modulation efficiency when all-fiber phase modulators working at the typical frequency of 100 kHz

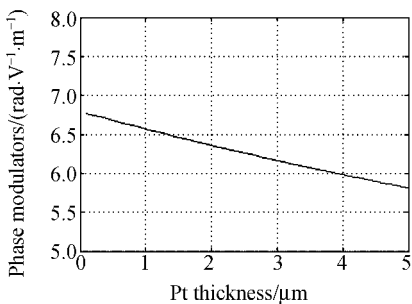
图 6 全光纤相位调制器的调制效率随 PZT 压电陶瓷薄膜的内外电极厚度变化的规律

Fig. 6 Inner and outer electrodes of the PZT film vs phase modulation efficiency of all-fiber phase modulators



(a) 内电极 Pt 薄膜的厚度对于全光纤相位调制器的频率响应特性的影响

(a) Effect of thickness of Pt inner electrode on the frequency response of all-fiber phase modulators



(b) 内电极 Pt 薄膜厚度对工作于 100 kHz 的全光纤相位调制器的相位调制效率的影响

(b) Effect of thickness of Pt inner electrode on the phase modulation efficiency when all-fiber phase modulators working at typical frequency of 100 kHz.

6 结 论

应用这种全光纤相位调制器的数值模型,可以准确地分析出 PZT 压电陶瓷薄膜的侧向压电常数 d_{31} 对全光纤相位调制器的相位调制效率的影响和 PZT 压电陶瓷薄膜内的电位移常数 D_0 的频率响应特性。对于 PZT 压电陶瓷薄膜覆膜驱动的全光纤相位调制器,由侧向压电常数 d_{31} 引起的相位调制相当于由压电常数 d_{33} 引起的相位调制的 15%。同时,应用该模型还分析了 PZT 压电陶瓷薄膜覆膜驱动的全光纤相位调制器的各种材料参数与尺寸对于相位调制效率的影响。结果

表明,这个模型不仅可以用于快速、准确计算全光纤相位调制器的相位调制效率,还可以应用于全光纤相位调制器的参数优化与设计。

参考文献:

- [1] 鲁怀伟,章宝歌,李敏芝,等. 基于双耦合器的平坦型全光纤波长交错滤波器[J]. 光学精密工程,2006,14(2):145-150.
LU H W, ZHANG B G, LI M Z, *et al.*. All-fiber flat-top interleaver based on double single mode couplers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):145-150. (in Chinese)
- [2] 刘伯晗,张健,吴丽莹,等. 液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J]. 光学精密工程,2006,14(2):213-217.
LU B H, ZHANG J, WU L Y, *et al.*. Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):213-217. (in Chinese)
- [3] 马晶,徐科华,谭立英,等. 基于相位相关的深空光通信扩展信标跟踪技术研究[J]. 光学精密工程,2006,14(3):515-519.
MA J, XU K H, TAN L Y, *et al.*. Extended-beacon tracking for deep space optical communication based on phase-correlation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):515-519. (in Chinese)
- [4] 金泰义,李胜利,王延安,等. GW-II型光纤测微仪的研制[J]. 光学精密工程,1996,4(3):100-105.
JIN T Y, LI SH L, WANG Y A, *et al.*. Study of a new type optic-fiber micro-displacement measuring instrument (GW-II) [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(3):100-105. (in Chinese)
- [5] 刘国淦,张学军,王权陡,等. 光纤点衍射干涉仪的技术研究[J]. 光学精密工程,2001,9(2):142-145.
LIU G G, ZHANG X J, WANG Q D, *et al.*. Fiber point diffraction interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2):142-145. (in Chinese)
- [6] JARZYNSKI J. Frequency response of a single-mode optical fiber phase modulator utilizing a piezoelectric plastic jacket [J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, 55(9):3243-3250.
- [7] BARROW D A, LISBOA O, JEN C K, *et al.*. In-line phase modulators using coaxial thick lead zirconate titanate coated optical fibers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, 79(6):3323-3329.
- [8] BHATTI A, ALRAWESHIDY H S, MURTAZA G. Numerical modeling of a fiber-optic phase modulator using piezoelectric polymer coating [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(7):812-814.
- [9] BHATTI A, ALRAWESHIDY H S, MURTAZA G. Broadband frequency response of an all-fiber acousto-optic phase modulator using Aluminum Nitride (AlN) coating [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2000, 25(2):124-125.
- [10] 张福学. 现代压电学[M]. 北京:科学出版社,2001.
ZHANG F X. *Modern piezoelectrics* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [11] 奥尔特. 固体中的声场和波[M]. 北京:科学出版社,1982.
AULD B A. *Acoustic fields and waves in solids* [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)
- [12] 徐秉业. 应用弹塑性力学[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
XU B Y. *Applied elastic and plastic mechanics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. (in Chinese)
- [13] 鲁健,吴建华,赵刚,等. 溅射法制备高取向 Pt 薄膜的工艺研究[J]. 微细加工技术,2004,1:41-46.
LU J, WU J H, ZHAO G, *et al.*. Preparation of strongly (111) oriented Pt films by RF sputtering [J]. *Microfabr. Technol.*, 2004, 1:41-46. (in Chinese)
- [14] LISBOA O, BARROW D A, SAYER M, *et al.*. Optical fiber phase modulator using coaxial PZT films [J]. *Electron. Lett.*, 1995, 31(17):1491-1492.
- [15] YAO K, HE X J, XU Y, *et al.*. Piezoelectric ceramic thick films deposited on silicon substrates by screen-printing [J]. *SPIE*, 2004, 5389:108-113.
- [16] IMAI M, YANO T, OHTSUKA Y, *et al.*. Wide-frequency fiber-optic phase modulator using piezoelectric polymer coating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, 2:727-729.
- [17] IMAI M, YANO T, MOTOI K, *et al.*. Piezoelectrically induced optical phase modulation of light in single-mode fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, 28(9):1901-1908.
- [18] LI Z, PING G. Broadband frequency response of the optic fiber phase modulator with piezoelectric ZnO coating [J]. *SPIE*, 2005, 5623:504-510.