

文章编号 : 0253-2239(2002)02-0206-04

镀膜光纤声光相位调制器及压电层反射系数的研究^{*}

周 力¹⁾ 顾 平¹⁾ 李晓刚²⁾ 彭刚定²⁾

(1), 南昌航空工业学院电子工程系, 南昌 330034
(2), 新南威尔士大学, Sydney 2052 Australia

摘要: 主要研究镀膜光纤声光相位调制器。介绍了氧化锌镀膜光纤的几何结构, 分析了此几何结构压电声光振荡的基本原理, 给出了光纤声光相位调制器的等效网络模型, 根据此模型得到了声光压电层反射系数, 并按实际参数进行了计算机模拟计算。

关键词: 声光相位调制; 反射系数; 网络模型; 氧化锌镀膜

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

近年来用光纤镀膜而构成光器件的研究引起了人们的极大兴趣, 其主要原因是由于光纤系统除了在数据通信领域中大量采用外, 正在越来越广泛地被应用于各种信号的采集、传输与处理, 人们正朝着仅由光纤和光器件组成的全光系统努力。本文讨论由氧化锌(ZnO)作为压电层的镀膜光纤声光相位调制器^[1]。图 1 为在离子束扫描电镜下的镀膜光纤截面(左)及氧化锌镀膜结晶层

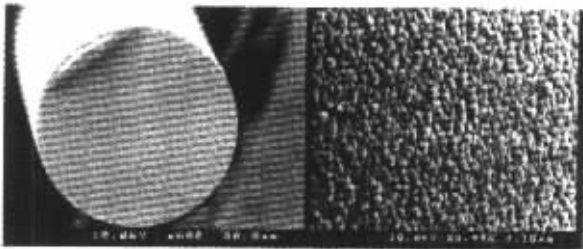


Fig. 1 Cross-sectional (left) and surface (right) image of a ZnO-coated fiber

为了便于对氧化锌镀膜光纤进行分析, 可将其等效成如图 2 所示几何结构: 当施加在压电层内外电极的电压发生改变时, 沿光纤法线方向将产生一振荡声波, 此振荡声波作用于光纤, 则会改变这一段光纤的折射率, 当光信号通过时, 其相位发生变化, 这就是氧化锌镀膜光纤相位调制器的基本工作原理, 其本质是一声光谐振器^[2]。

理, 其本质是一声光谐振器^[2]。

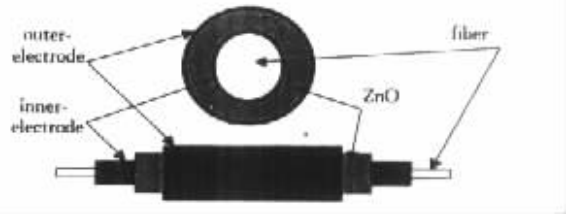


Fig. 2 The geometry of a ZnO-coated fiber

由分析可知^[3], 对图 2 所示的氧化锌镀膜光纤声光相位调制器这一多层镀膜器件非压电层(光纤纤芯、镀膜电极层)及压电层(氧化锌镀膜层)的各层之间网络模型均可表示成为二端口网络(非压电层)及三端口网络(压电层)的级联结构, 从而得出了氧化锌镀膜光纤声光相位调制器完整的等效网络模型, 如图 3 所示。

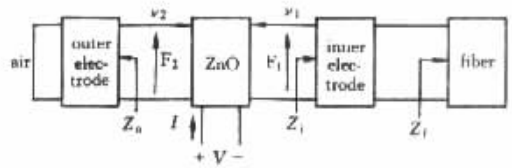


Fig. 3 Network structure of an acousto-optic phase modulator

其中, 外电极外部可视为空气短路^[4], 光纤为系统的负载, 其等效阻抗 Z_f 可由 Z 参数网络求出^[3], 由此可求出 Z_i 、 Z_o 的 A 参数表达式:

$$Z_i = \frac{AZ_f - B}{CZ_f - D}, \quad Z_o = \frac{B}{D}, \quad (1)$$

其中 A 、 B 、 C 、 D 分别为内外电极层二端口网络的 A 参数值。

^{*} 国家出国留学基金(98519327)、江西省测试技术与控制工程研究中心基金(2001.019)资助课题。

E-mail: lizhou@niat.jx.cn

收稿日期: 2001-02-16; 收到修改稿日期: 2001-04-16

2 氧化锌镀膜光纤声光相位调制器的压电层反射系数

由图3可知,氧化锌镀膜压电层的网络模型为三端口网络,可列出下列方程:

$$\frac{F_1}{I} = Z_{11} \frac{v_1}{I} + Z_{12} \frac{v_2}{I} + \frac{h}{j\omega}, \quad (2)$$

$$\frac{F_2}{I} = Z_{21} \frac{v_1}{I} + Z_{22} \frac{v_2}{I} + \frac{h}{j\omega}, \quad (3)$$

$$Z_{in} = \frac{V}{I} = \frac{h}{j\omega} \left(\frac{v_1}{I} - \frac{v_2}{I} \right) + \frac{1}{j\omega C_0}. \quad (4)$$

其中 Z_{in} 为压电层输入特征阻抗, F_1 、 F_2 为位于边界处的力, h 为电-声耦合系数, v_1 、 v_2 为振动位移, Z_{ij} 为内外电极层二端口网络参数, C_0 为压电层层间等效电容。由图3可知, F_1 、 F_2 、 Z_1 、 Z_0 、 v_1 、 v_2 之间的关系为

$$F_1 = -v_1 Z_1, \quad F_2 = -v_2 Z_0,$$

代入(2)式、(3)式,并令 $h/j\omega = \xi$, $v_1/I = x$, $v_2/I = y$,可得:

$$(Z_{11} + Z_1)x + Z_{12}y = -\xi, \quad (5)$$

$$Z_{21}x + (Z_{22} + Z_0)y = -\xi. \quad (6)$$

用矩阵解出 x 、 y ,代入(4)式:

$$Z_{in} = \frac{\xi^2}{\Delta} (Z_{11} + Z_{12} - Z_{21} - Z_{22} - Z_0 + Z_1) + 1/(j\omega C_0). \quad (7)$$

上式中 Δ 为求解(5)式、(6)式的逆矩阵行列式, $\xi^2 = -(h/\omega)^2$,可用压电参数表示^[6]:

$$-\frac{h^2}{\omega^2} = -A_p Z_p \frac{k_p^2 v_p}{\omega^2 d_p C_0}. \quad (8)$$

其中下标 p 代表压电项, k_p 为压电耦合系数, d_p 为压电层厚度, Z_p 为声波阻抗, A_p 为压电层的有效面积,可由 ZnO 层平均面积表示为

$$A_p = \theta(\rho + d_p/2)l,$$

ρ 为光纤半径, l 为相位调制器长度, θ 为相位调制器镀膜层角度(对于柱型相位调制器 $\theta = 2\pi$),将(8)式代入(7)式可得压电层输入特征阻抗

$$Z_{in} = \theta \left(\rho + \frac{d_p}{2} \right) l Z_p \frac{k_p^2 v_p}{\omega^2 d_p C_0} \times \frac{(-Z_{11} - Z_{12} + Z_{21} + Z_{22} + Z_0 - Z_1)}{(Z_{11} + Z_1)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}} - \frac{j}{\omega C_0}. \quad (9)$$

上式中压电项是复数,它可分成实部与虚部,即

$$Z_{in} = \text{Re}(Z_{in}) + j\text{Im}(Z_{in}),$$

实部 $\text{Re}(Z_{in})$ 代表辐射阻抗,虚部 $\text{Im}(Z_{in})$ 由声电抗和 ZnO 压电层电容器的容抗组成。令虚部为0,可得

出声光相位调制器的基本工作频率 f_0 ,分解(9)式可得:

$$\ln(Z_{in}) = \frac{2k_p \sin(k_a d_p) \sqrt{G} + (Z_0 - Z_1) 8k_a^3 F \sin^3(k_a d_p)}{4k_a^2 E^2 \sin^2(k_a d) + F^2}, \quad (10)$$

其中:

$$G = -4k_a Z_p \sqrt{r_1 r_2} + 2k_a Z_p (r_1 + r_2) \cos(k_a d_p) - 2Z_p \sin(k_a d_p), \quad (11)$$

$$F = 2k_a Z_p (r_1 Z_0 - r_2 Z_1) \cos(k_a d_p) - Z_p (Z_0 - Z_1) \sin(k_a d_p), \quad (12)$$

$$E = 4k_a^2 (Z_1 Z_0 - r_1 r_2 Z_p^2) - (4k_a^2 Z_1 Z_0 - 4k_a^2 r_1 r_2 Z_p^2 + 1) \cos^2(k_a d_p) - 2k_a Z_p^2 (r_1 + r_2) \cos(k_a d_p) \sin(k_a d_p), \quad (13)$$

式中 k_a 为声波的传播常数。由(10)式可知,当 $k_a d_p = (2q+1)\pi$ ($q=0,1,2,3,\dots$) 时, $2k \sin(k_a d_p) = 0$, 即 $\ln(Z_{in}) = 0$,以角频率表示为 $\omega_q = (2q+1)\pi v_a/d_p$,这意味着氧化锌镀膜光纤声光相位调制器的基频 $f_0 = v_a/2d_p$,与有限平面器件的半波谐振基频相同。 v_a 为声速^[7]。

由于氧化锌镀膜光纤声光相位调制器工作于微波频段,当其与射频信号源相连接时,可以根据相位调制器的压电层反射系数来得到它的电能-声能耦合效率和电气阻抗。我们将此相位调制器压电层反射系数称为 S_{11} 参数。在实际应用中,还必须考虑屏蔽接地效应引起的串联阻抗 Z_{se} ,因此,相位调制器输入总阻抗为 $Z_{se} + Z_{in}$,此时 S_{11} 参数为:

$$S_{11} = \frac{Z_{se} + Z_{in} - Z_{so}}{Z_{se} + Z_{in} + Z_{so}}, \quad (14)$$

式中 Z_{so} 为射频信号源阻抗。

3 压电层反射系数 S_{11} 参数的计算

在对 S_{11} 进行计算时,代入实际的制作参数以验证图3所示氧化锌镀膜光纤网络模型的有效性。基频 f_0 约为1 GHz的氧化锌镀膜光纤声光相位调制器是用一直径为 $3/125 \mu\text{m}$ 的单模光纤制成,光纤上喷涂了厚度为 $0.2 \mu\text{m}$ 的铝薄层和厚度约为 $3.5 \mu\text{m}$ 的 ZnO 薄膜,分别作为内电极层和压电层。外电极层使用的是厚度约为 $1 \mu\text{m}$ 导电银涂料,将其与一铝基片上的表面安装连接器的微波连接器相连,由银涂料组成的谐振器长度为 $1 \text{ mm} \sim 2 \text{ mm}$ 。计算 S_{11} 参数所用的详细资料见表1,我们用 Mathematica 数学软

件包对 S_{11} 参数进行了计算,其中一次计算的结果 如图 4 所示($f_0 \approx 980$ MHz)

Table 1. The practical coefficients and parameters for theoretical calculation of S_{11} parameter^[8~10]

top-electrode :	silver	bottom-electrode :	aluminium
layer thickness	1.1 μm	layer thickness	0.2 μm
acoustic velocity	3697 m/s	acoustic velocity	6400 m/s
acoustic attenuation	240 Napier/ m^2 at 1 GHz	acoustic attenuation	236.2 Napier/ m^2 at 1 GHz
acoustic impedance	$38.8 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$	acoustic impedance	$17.3 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$
piezoelectric :	ZnO	optical fiber :	glass
layer thickness	3.5 μm	core radius	1.5 μm
acoustic velocity	6300 m/s	fiber radius	62.5 μm
acoustic impedance	$36 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$	acoustic velocity	5960 m/s
coupling coefficient	0.28	acoustic attenuation	5993 Napier/ m^2 at 1 GHz
dielectric constant	7.79×10^{-12}	acoustic impedance	$13.1 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$

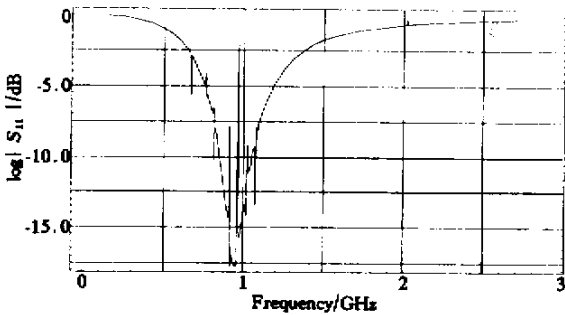


Fig.4 The theoretical calculation of reflection coefficient S_{11}

在计算图 4 中的 S_{11} 参数时,串联阻抗 Z_{se} 的取值为 3.85Ω 电阻和 2.2 nH 电感。由于制作的氧化锌镀膜光纤声光相位调制器中氧化锌 ZnO 膜厚度的质量难以达到理想状态,所以在计算时压电耦合常数 k_p^2 只取了其理论值 0.28 的 45% 左右。计算与实际测量结果是基本吻合的。

4 实验与结果

声光相位调制器的实验装置如图 5 所示。

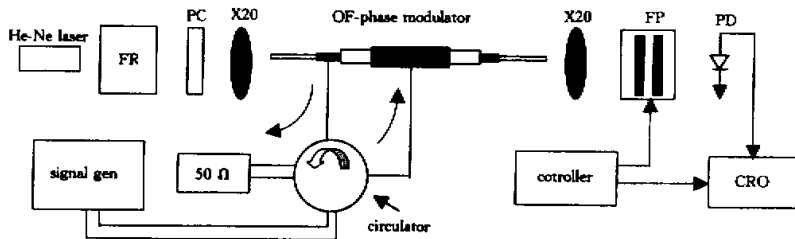


Fig.5 Experimental setup for optical phase measurement

此实验装置主要用来测量声光相位调制器的光信号相移量,以便与理论上推导出相移量进行比较^[4]。图中 FR 为法拉第旋转器,PC 为偏振控制器,FP 为光干涉计,CRO 为示波器。工作原理略。

我们所制作的氧化锌镀膜光纤声光相位调制器的灵敏度(或当光信号通过时其相位发生变化的最大相移 $\Delta\Phi$)还不够理想(仅几十毫弧度),还有许多方面的实验和研究工作要进一步进行。目前,除了对氧化锌镀膜光纤相位调制器的研究外,还正在对各种不同类型的其他压电材料进行实验。同时,还对同一压电材料的不同厚度、以及在不同真空度条件下所镀材料的不同结晶程度等等进行了实验。我们的目标是找出各种不同类型的压电材料镀膜光纤在各个

频率段的调制相移量关系,以寻求较佳的压电材料镀膜光纤相位调制器。除了对常规的玻璃光纤进行镀膜实验外,目前正在对聚合物光纤进行探索。

参 考 文 献

- [1] Zhou Li, Gu Ping. Research on optical fiber sensor coated with piezoelectric ZnO. *J. Nanchang University*(南昌大学学报), 2000, 22(3):155~158 (in Chinese)
- [2] Roeksabutr A, Chu P L. Modelling of high frequency acousto-optic fiber phase modulator. *J. Lightwave Technol.*, 1996, 14(10):2362~2366
- [3] Zhou Li, Gu Ping, Chen Yifan. Network model of optical fiber sensor coated with piezoelectric ZnO. *J. Xiamen University*(厦门大学学报), 2001, 40(1):178181
- [4] Roeksabutr A, Chu P L. Broadband frequency response of a ZnO coated fiber phase modulator. *IEEE Photon. Technol.*,

1997, (5) 613 ~ 615

- [5] Kim B Y, Blake J N, Engan H E *et al.*. All-fiber acousto-optic frequency shifter. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(6) 389 ~ 391
- [6] Mason W P. *Electromechanical Transducers and Waves Filters*. 2nd Ed. , New York : Van Nostrand , 1948
- [7] Rosenbaum J F. *Bulk Acoustic Wave Theory and Devices*. London : Artech House , 1988 , Chapter 5 , 167 ~ 196
- [8] Slobodink A J. *Microwave Acoustics Handbook*. Vol. 3 , *Bulk Wave Velocities*. National Technical Information Services , Springfield VA , 1980
- [9] Gualtieri J G. Piezoelectric materials for acoustic wave applications. *IEEE Trans. on Ultrason. and Freq. Cont.* , 1994 , **41**(1) 53 ~ 59
- [10] Kino G S. *Acoustic Waves Devices. Imaging and Analog Signal Processing*. New Jersey : Prentice Hall , 1987

Reflection Coefficient of Optical Fiber Acousto-Optic Phase Modulator Coated with Piezoelectric ZnO

Zhou Li¹⁾ Gu Ping¹⁾ Li Xiaogang²⁾ Peng Gangding²⁾

(1) , Department of Electronic Engineering , Nanchang Institute of Aeronautical Technology , Nanchang 330034

(2) , Department of EE and Telecom , University of New South Wales , Sydney 2052 Australia)

(Received 16 February 2001 ; revised 16 April 2001)

Abstract : An optical fiber acousto-optic phase modulator coated with piezoelectric ZnO is discussed. The geometry of optical fiber using ZnO coating presented and the basic theory of piezoelectric resonator of this geometry is analyzed. The equivalent network model for the optical fiber acousto-optic phase modulator coated with piezoelectric ZnO is given. And then the reflection coefficient is obtained by this model. Computer simulation is made according to the practical parameters.

Key words : acousto-optic phase modulator ; reflection coefficient ; network model ; ZnO coating