

文章编号 : 0253-2239(2002)01-0121-05

# 侧面抛磨极化光纤的传输特性分析\*

倪 明 胡永明 孟 洲

(国防科技大学光电工程系,长沙 410073)

陈 哲 廖延彪

(清华大学电子工程系,北京 100084)

摘要: 针对侧面抛磨极化光纤的物理结构,提出了极化光纤的双金属包覆六层波导模型,并对其传输特性进行了分析。分析指出,由于金属电极镀在极化光纤的侧面抛磨平面上,极化光纤中传播的光具有偏振消光特性。对极化光纤的传输特性影响较大的器件结构参量为被抛磨侧面与纤芯的距离,以及紧邻阳极的绝缘胶厚度。

关键词: 极化光纤;传输特性;光学波导;光纤偏振器;偏振消光

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## 1 引 言

通过热极化或紫外极化可在熔石英光纤中产生二阶非线性效应和线性电光效应<sup>[1]</sup>,这些极化技术使得人们有可能制造全光纤电光调制器和全光纤光频转换器。由于光纤可以有比晶体长得多的相互作用长度,以及光纤与光纤系统的连接损耗远小于晶体与光纤系统的连接损耗,因此,近年来许多科学家对极化熔石英光纤制作极化光纤器件进行了试验探索<sup>[2~4]</sup>。不同的极化光纤器件结构,将得到不同的极化效果和传输特性,因此在进行实验研究,寻找提高器件的二阶非线性效应或线性电光效应途径的同时,有必要对极化光纤器件的结构进行计算分析,提供实验的理论依据。本文主要是对可能的侧面抛磨极化光纤波导结构的分析,将其抽象归纳为双金属包覆的六层波导模型。利用自适应套孔爬山法求解波导模型的复超越方程,得到了描述侧面抛磨极化光纤器件传输特性的模式传输损耗和横向模场分布。依据此分析,已制成同时集成偏振器和电光调制器双功能的一种新型光纤器件<sup>[5]</sup>。

## 2 极化光纤的双金属包覆六层波导模型

### 2.1 极化光纤的结构模型

我们研制的极化光纤采用侧面抛磨光纤,电极

间涂覆绝缘胶,所对应的可能几何结构如图 1、图 2、图 3,光纤的一个侧面或两个侧面被抛磨,侧面上镀有一对 Al 电极,下面的石英玻璃基块作为保护支架。图 1 是在抛磨平面与阳极电极间有一层聚酰亚胺胶<sup>[2]</sup>;图 2 是阳极直接镀在抛磨平面上,而在阴极和光纤间有聚酰亚胺胶层<sup>[3]</sup>;图 3 是两电极都直接镀在抛磨平面上。考虑到光纤的外直径为  $125\ \mu\text{m}$ ,

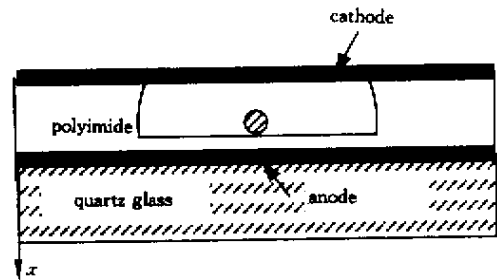


Fig.1 Configuration of poled fiber with a layer of polyimide near the anode

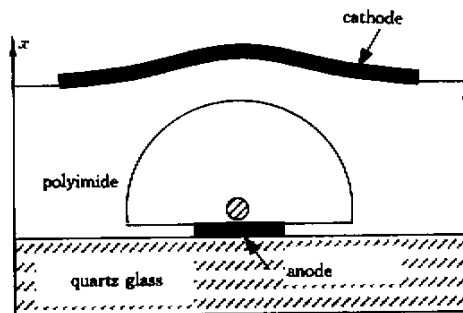


Fig.2 Configuration of poled fiber with a layer of polyimide near the cathode

\* 国家自然科学基金(69787002)资助课题。

收稿日期:2000-09-14;收到修改稿日期:2000-11-23

纤芯直径为  $7 \mu\text{m}$ , 抛磨平面与纤芯的距离为  $1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ , 而且纤芯与包层折射率差极小, 为讨论问题和计算的简便, 可将图 1、图 2 中的极化光纤的物理结构抽象为双金属包覆六层波导结构, 如

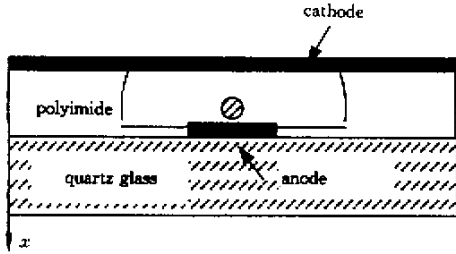


Fig. 3 Configuration of poled fiber without any layer of polyimide between fiber and the electrodes

$$E_y, H_y = \begin{cases} W \exp[ p_4(x + a + b_1) ] & x \leq -(a + b_1), \\ C_1 \exp[ p_2(x + a) ] + C_2 \exp[ -p_2(x + a) ] & -(a + b_1) \leq x \leq -a, \\ A \sin( k_1 x ) + B \cos( k_1 x ) & -a \leq x \leq 0, \\ D_1 \exp( p_2 x ) + D_2 \exp( -p_2 x ) & 0 \leq x \leq b_2, \\ F_1 \exp[ p_3(x - b_2) ] + F_2 \exp[ -p_3(x - b_2) ] & b_2 \leq x \leq b_2 + d, \\ G \exp[ -p_4(x - b_2 - d) ] & b_2 + d \leq x. \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$k_1^2 = k_0^2 n_1^2 - \beta^2, \\ p_i^2 = \beta^2 - k_0^2 n_i^2, \quad i = 2, 3, 4, k_0$$

$k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  为自由空间的波长,  $\beta$  为传播常数.  $A, C_1, C_2, D_1, D_2, F_1, F_2, G, W$  为待定常数.

由边界条件, 我们可以从 (1) 式得到 TE 模、TM 模的本征方程. 由于金属的折射率  $n_4 = n'_4 + in''_4$  为一复数 (其中  $n'_4, n''_4$  为实数), 六层波导的本征值方程是一个超越复方程. 利用自适应套爬爬山法<sup>[8]</sup> 求解此复超越方程, 可求得传播常数

$$\beta = kn_{\text{eff}} + i\alpha,$$

其中  $n_{\text{eff}}$  为导波模的有效折射率,  $\alpha$  为其振幅衰减系数. 由  $\alpha$  可计算出光强损耗. 本文只讨论由金属包覆层引起的传输损耗, 不考虑光纤材料不纯及散射引起的损耗.

设长为  $x$  的极化光纤段上输入线偏振光 (TE 或 TM 方向) 的光强为  $I_0$ , 输出光强为  $I$ , 则有

$$I = I_0 \exp(-2\alpha x).$$

定义用分贝数表示的损耗为

$$L = -10 \lg(I/I_0) = -10 \lg[\exp(-2\alpha x)]. \quad (2)$$

当只需要考虑波导中各层电场的相对大小时, 可设

图 4 所示. 图 1 中与图 4 坐标系对应的  $x$  方向是向下为正的, 图 2 中所对应的  $x$  方向是向上为正. 图中纤芯折射率为  $n_1$ , 直径为  $a$ ; 聚酰亚胺胶层折射率为  $n_3$ , 厚度为  $d$ ; 包层的折射率为  $n_2$ , 与胶层邻近一侧的包层厚度为  $b_2$ , 纤芯另一侧的包层厚度为  $b_1$ . 图 3 的极化光纤物理结构对应六层波导模型中  $d = 0$  的情况.

### 2.2 数学模型

根据光学波导理论<sup>[6,7]</sup>, 建立计算的数学模型. 在图 4 中, 设垂直于分界面的方向为  $x$  方向, 且向上为正, 芯层与上包层的分界面平行于  $z$  轴方向. 光波的 TE 模或 TM 模场在此六层波导中稳定传输时的导模场可写为

$W$  为单位 1 (也可由波导横截面上能量的归一化求出  $W$ ), 并由迭代出的  $\beta$  值求出  $A, B, C, D, F, G$  等 各层电场的相对幅值, 从而得到波导中各层的电场强度分布情况. 当  $p_4$  为有限值时, 因为设  $W = 1$  对应图 4 中  $x = -(a + b_1)$  处的场强为 1; 当  $p_4$  为极大的负数值时, 虽然仍设  $W = 1$ , 但在  $x = -(a + b_1)$  处的场强将趋近于 0.

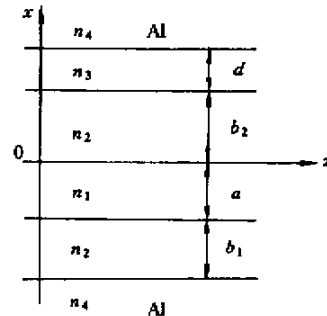


Fig. 4 Diagram of a model of six-layered planar waveguide with double metal layers

### 3 极化光纤波导的传输特性

根据实验要求<sup>[4]</sup>, 在双金属包覆六层波导模型的计算中, 取各层折射率参数为:

$$n_1 = 1.456, \quad n_2 = 1.446,$$

$$n_3 = 1.6, \quad n_4 = 1.2 + i7.0 \text{ (铝膜)}.$$

由方程组(1)及边界条件可得到本征方程组,求解本征方程组可得到不同结构参数条件下的传输特性。

1)光传输损耗  $L$  与绝缘胶厚度  $d$  的关系。传输损耗曲线如图 5、图 6 所示,其中图 5 与图所示结构相对应,图 6 与图 2 所示结构相对应。

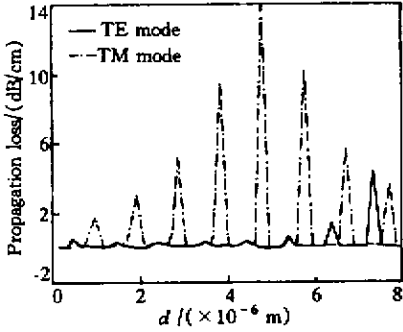


Fig. 5 Change of propagation loss with the thickness of polyimide,  $d = 0 \sim 8 \mu\text{m}$ . The parameters for calculation on Fig. 1 were  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $a = 7 \mu\text{m}$ ,  $b_1 = 30 \mu\text{m}$ ,  $b_2 = 3 \mu\text{m}$

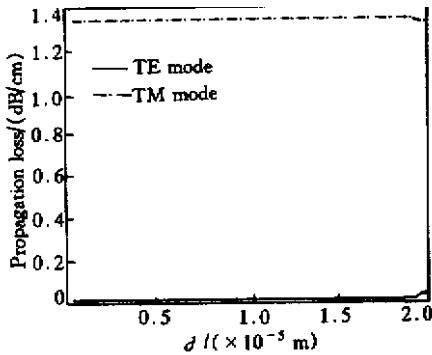


Fig. 6 Change of propagation loss with the thickness of polyimide,  $d = 0 \sim 20 \mu\text{m}$ . The parameters for calculation on Fig. 2 were  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $a = 7 \mu\text{m}$ ,  $b_1 = 3 \mu\text{m}$ ,  $b_2 = 59 \mu\text{m}$

2)光传输损耗  $L$  与抛磨平面和纤芯的间距  $b$  的关系,见图 7 和图 8。其中图 7 与图 2 所示结构相对应,图 8 与图 3 所示结构相对应。

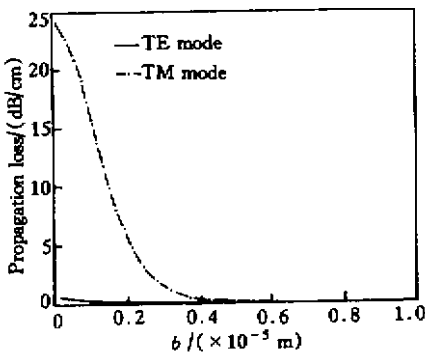


Fig. 7 Change of propagation loss with the distance between the core and the flat of polished fiber,  $b_1 = 0 \sim 10 \mu\text{m}$ . The parameters for calculation on Fig. 2 were  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $a = 7 \mu\text{m}$ ,  $b_2 = 59 \mu\text{m}$ ,  $d = 20 \mu\text{m}$

3)极化光纤器件中的横向模场分布。利用各传输损耗图中计算的  $\beta$  值,可求得相应的模场分布图。图 9、图 10、图 11 分别对应于图 5、图 7、图 8 结构的光纤横截面上 TE 模的电场强度分布。

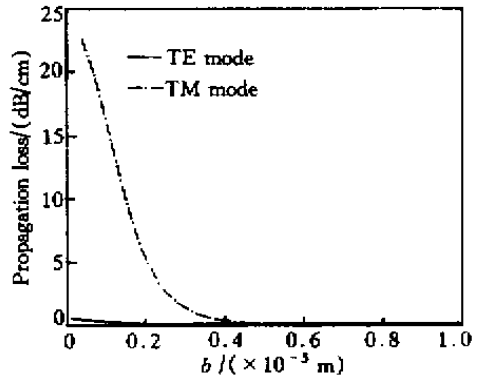


Fig. 8 Change of propagation loss with the distance between the core and the flat of polished fiber,  $b_2 = 0 \sim 10 \mu\text{m}$ . The parameters for calculation on Fig. 3 were  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $a = 7 \mu\text{m}$ ,  $b_1 = 30 \mu\text{m}$ ,  $d = 0$

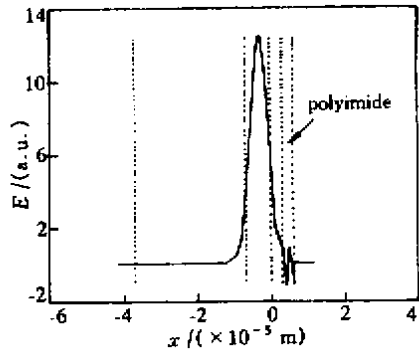


Fig. 9 Distribution of electrical field of TE mode on the cross section of the poled fiber. The parameters for calculation on Fig. 1 were  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $a = 7 \mu\text{m}$ ,  $b_1 = 30 \mu\text{m}$ ,  $b_2 = 3 \mu\text{m}$ ,  $d = 3 \mu\text{m}$

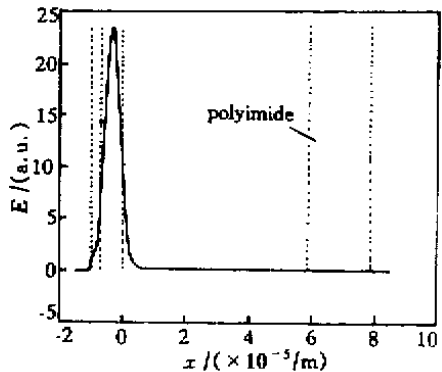


Fig. 10 Distribution of electrical field of TE mode on the cross section of the poled fiber. The parameters for calculation on Fig. 2 were  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $a = 7 \mu\text{m}$ ,  $b_1 = 1 \mu\text{m}$ ,  $b_2 = 59 \mu\text{m}$ ,  $d = 20 \mu\text{m}$

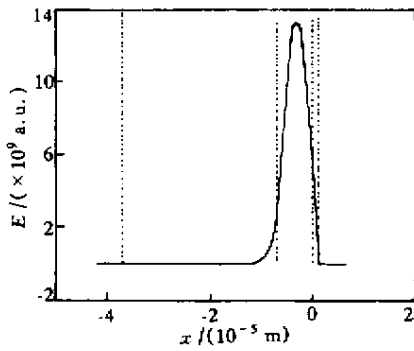


Fig. 11 Distribution of electrical field of TE mode on the cross section of the poled fiber. The parameters for calculation on Fig. 3 were  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $a = 7 \mu\text{m}$ ,  $b_1 = 30 \mu\text{m}$ ,  $b_2 = 1 \mu\text{m}$ ,  $d = 0$

#### 4. 传输损耗和模场分场特性的分析

1) 由图 5 可知, 当阳极与抛磨平面间有聚酰亚胺绝缘胶时, 聚酰亚胺胶的厚度变化将严重影响极化光纤器件的传输损耗特性, TE 模或 TM 模的传输损耗  $\alpha$  随着的聚酰亚胺胶的厚度  $d$  的增加而周期变化, 交替出现 TE 模或 TM 模损耗较大的情况。由图 9 可知, 这是由于厚度为  $1 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ , 而且折射率高于光纤材料的聚酰亚胺胶层构成了除纤芯外的另一层波导, 并在其中激发起了模场振荡, 因而此胶层波导的厚度变化直接影响到光纤器件中光的传输。因为实验中较难控制胶的厚度, 所以按此结构制成器件的光传输稳定性和重复性都会较差。

图 6 反映的是阴极与光纤间有聚酰亚胺胶的情况。由图 6 可知, 只要  $b_2 > 10 \mu\text{m}$ , 在阴极与光纤间的聚酰亚胺胶对传输损耗和模场分布的影响就很小, 完全可以忽略。由于实际应用中常有  $b_2 > 10 \mu\text{m}$ , 所以通常可以不考虑阴极与光纤间的聚酰亚胺胶对传输损耗和模场分场特性的影响。

2) 由图 7、图 8、图 10 和图 11 可知, 当抛磨平面与光纤纤芯间的剩余包层厚度减小时, TE 模或 TM 模的传输损耗  $\alpha$  将逐渐增加。然而当抛磨平面与光纤纤芯间的剩余包层厚度  $b_1 > 10 \mu\text{m}$  后,  $b_1$  对 TE 模或 TM 模的传输损耗和模场分布的影响可以忽略。

3) 由图 7 和图 9 可知, 当极化光纤器件的结构一定时, TM 模的传输损耗远大于 TE 模的, 这表明, 该类结构下的器件具有偏振消光特性。而且此偏振消光与被抛磨侧面与纤芯间的距离、电极结构等有关。利用此特征, 可将该器件设计成偏振器类光纤器件。此为重要的器件特性和结构的设计结

论。依据此结论, 已制成同时兼有偏振器和线性电光调制器双功能的一种新型集成光纤器件<sup>[5]</sup>。

4) 将阳极与抛磨平面间有聚酰亚胺绝缘胶结构的传输损耗图(图 5)、阴极与光纤间有聚酰亚胺胶结构的传输损耗图(图 6 和图 7)以及电极与光纤间没有胶层结构的传输损耗图(图 8)进行对比, 可得出, 实际应用中电极与光纤间没有胶层结构的光传输损耗特性较优, 而阳极与抛磨平面间有聚酰亚胺绝缘胶结构的光传输损耗特性最差。

总结 对极化光纤的传输特性影响较大的器件结构参量主要是阳极电极和光纤侧抛磨平面的间距  $b_1$ , 以及紧邻阳极的绝缘胶厚度  $d$ 。为保证极化光纤器件的稳定特性, 不宜采用阳极与光纤侧抛磨平面间有聚酰亚胺绝缘胶的器件结构。如果能解决好极化时的强电场击穿问题, 采用电极与光纤间没有胶层的极化光纤结构, 将获得稳定的光传输损耗特性。

对于侧面抛磨结构的极化光纤, 由于抛磨面上金属电极的存在, 使光纤中传播的光的 TM 模的传输损耗远大于 TE 模的, 即具有偏振消光特性。此偏振消光与被抛磨侧面与纤芯的距离、电极结构等有关。我们的实验已证实, 制成的极化光纤器件的消光比可达  $-30 \text{ dB}$ <sup>[5]</sup>, 当利用保偏光纤制作此极化光纤器件时, 该器件具有较好的本征起偏和保偏性能。

上述波导传输损耗和模场分场特性分析表明, 为减小传输损耗, 要增加  $b_1$ 。但已有实验结果证实, 为了提高极化的效果, 需要减小  $b_1$ <sup>[2]</sup>, 因此在传输损耗和极化效果两者间要有个折衷。另外, 还可在阳极与纤芯间镀上薄于  $1 \mu\text{m}$  的介质过渡层来使模场匹配, 更进一步减小 TE 模的不必要的损耗<sup>[9]</sup>。如果采用保偏光纤制作极化光纤器件, 由于保偏光纤对传输导模的紧密束缚特性, 使器件的单模单偏振传输的实际损耗远小于普通单模光纤的传输损耗<sup>[9]</sup>, 这使得我们可以进一步减小  $b_1$ , 从而提高极化效果。

#### 参 考 文 献

- [1] Chen Zhe, Liao Yanbiao, Hu Yongming *et al.*. Poled glass fiber devices and applications. *J. Optoelectronic Laser*(光电子·激光), 1999, 10(2):174~178(in Chinese)
- [2] Long X C, Brueck S R J. Large-signal phase retardation with a poled electrooptic fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9(6):767~769

- [ 3 ] Kazasky P G , Russell P S J , Takebe H. Glass fiber poling and application. *J. Lightwave Technology* ,1997 ,**15**( 8 ) : 1484 ~ 1493
- [ 4 ] Chen Zhe , Liao Yanbiao , Hu Yongming *et al.*. A thermal poled PANDA fiber device with micro-strip electrode deposited on the side-polished flat. *Electron. Lett.* ,2000 , **36**( 22 ) :1839 ~ 1840
- [ 5 ] Chen Zhe , Liao Yanbiao , Hu Yongming *et al.*. Thermal poled fiber device integrated double functions of electro-optic modulator and polarizer.
- [ 6 ] Charles Tsao. *Optical Fibre Waveguide Analysis*. Oxford : Oxford University Press ,1992. 231 ~ 255
- [ 7 ] Fang Junxin , Cao Zhuangqi , Yang Fuzi. *Technique Physics Basis for Optical Waveguide*( 光波导技术物理基础 ). Shanghai : Shanghai Jiaotong University Press ,1987. 114 ~ 122( in Chinese )
- [ 8 ] Ni Ming , Hu Yongming , Chen Zhe *et al.*. To solve complex intrinsic equation of multi-layer optical waveguide by adaptive zoom hill climbing method. *J. Optoelectronic · Laser*( 光电子 · 激光 ) , 1999 , **10**( 5 ) :411 ~ 414( in Chinese )
- [ 9 ] Hu Yongming. *Study on Polarizer of Polarization Maintained Fiber* ( 保偏光纤偏振器研究 ). [ Pu. D dissertation ]. Beijing : Tsinghua University , 1999 ( in Chinese )

## Propagation Characteristics of Lightwave in Side-Polished Poled Fibers

Ni Ming Hu Yongming Meng Zhou

( *Department of Optoelectronic Engineering , National University of Defence Technology , Changsha 410073* )

Chen Zhe Liao Yanbiao

( *Department of Electronic Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084* )

( Received 14 September 2000 ; revised 23 November 2000 )

**Abstract :** On the basis of configuration of side-polished poled fiber , a model of six-layer waveguide with double metal layers is put forward to describe the poled fiber and analyze the propagation characteristics of lightwave in the poled fibers. The analysis indicated that the lightwave propagating in the poled fiber has characteristics of polarization extinction due to the existence of metal electrodes deposited on the flat of the optical fiber. The main parameters of the device that affects the propagation characteristics of poled fiber are the distance between the core and polished flat , and the thickness of insulator adjacent to the anode.

**Key words :** poled fiber ; propagation characteristics ; optical waveguide ; optical fiber polarizer ; polarization extinction