

文章编号: 0258-7025(2001)11-1003-04

热极化保偏光纤电光相位调制器*

陈哲¹ 廖延彪¹ 胡永明² 熊水东² 孟洲² 靳伟³

(¹ 清华大学电子工程系 北京 100084, ² 国防科技大学理学院 长沙 410073, ³ 香港理工大学电机工程系)

摘要 对熊猫保偏光纤热极化,制成了一种新型保偏光纤电光相位调制器。在280℃温度下,在磨抛并镀有微带电极的熊猫光纤两侧加3000 V直流高压进行极化,制成的电光相位调制器的电光系数为 0.47 ± 0.05 pm/V。此新型光纤电光相位调制器由保偏光纤制成,可用其构成偏振稳定的干涉型全光纤器件。

关键词 电光调制器,极化光纤,保偏光纤,相位调制

中图分类号 TN 761.3 文献标识码 A

Electro-optic Phase Modulator with Thermally Poled PANDA Fiber

CHEN Zhe¹ LIAO Yan-biao¹ HU Yong-ming²
XIONG Shui-dong² MENG Zhou² JIN Wei³

¹ Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

² College of Science, National University of Defence Technology, Changsha 410073

³ Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

Abstract A novel fiber electro-optic phase modulator has been fabricated with the thermal poling of polarization maintaining fiber. A PANDA polarization maintaining fiber polished and deposited with micro-strip electrode was poled as applied DC 3000 V voltage on its both sides at temperature 280℃. The electro-optic coefficient of the electro-optic phase modulator is 0.47 ± 0.05 pm/V. Because built from polarization maintaining fiber, the phase modulator may be used in all fiber device based on fiber interferometer with polarization stability.

Key words electro-optic modulator, poled fiber, polarization maintaining fiber, phase modulation

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^[1],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。虽然目前得到的电光系数小于晶体的电光系数,但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的损耗远小于晶体与光纤系统的连接损耗,因此,国外实验室对极化熔石英光纤制作光纤电光器件进行了许多试验。Kazansky和他的同事们设计了单模光纤磨抛的“D”型光纤结构,得到了真空中热极化的电光效应^[2]。Fleming等应用双孔和内电极结构,经紫外极化,得到了较高的电光系数^[3]。Long等用小纤芯(1.25

$\mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$)“D”型光纤以及聚酰亚胺作绝缘材料,在12 cm极化长度上得到了半波电压仅75 V的热极化电光光纤^[4]。这些极化光纤在实验室里是成功的,但在实用上还有一些困难。Kazansky的极化光纤电极是压在光纤上的,因此此结构无法应用于较长光纤的极化,而且也无法用于高速的电光调制。Fleming等的双孔和内电极结构几乎使该极化光纤无法与实际的光纤系统熔接^[5]。Long利用小纤芯“D”型光纤制作极化光纤,不仅使极化光纤与实用的通信光纤(其纤芯直径约为6~7 μm)的熔接较困难,而且价格也较昂贵。另一方面,上述工作基本上是在非保偏光纤上进行的,在电光调制器的应用中,尤其是在Mach-Zehnder(MZ)干涉仪构成的干涉型光振幅调制器或光开关中,光波的偏振态无法保持将严重影响器件的性能。为得到可实用化的全光纤电光调制器,我们研制了保偏的、带有尾纤,易于与

* 国家自然科学基金(项目编号69787002)资助项目。

收稿日期:2000-08-21; 收到修改稿日期:2001-07-30

实际光纤系统熔接的极化光纤电光相位调制器件, 本文报道了该热极化保偏光纤电光相位调制器的制作与测试结果。

2 极化保偏光纤电光相位调制器的设计与制作

目前报道的熔石英光纤极化方法中, 主要有热极化和紫外极化^[2,3], 其中紫外极化在常温下容易发生退极化现象^[2], 热极化工艺产生的电光效应保持时间最长, 而且技术比紫外极化简单^[1], 因此本实验选择热极化技术进行光纤极化。当电光调制器用于干涉型光纤电光强度调制器时, 需有效地控制光纤导波的偏振态。而热极化在普通光纤和保偏光纤的纤芯中产生的电光效应是一样的, 因此, 为了使制成的电光相位调制器可以应用到干涉仪构成的干涉型全光纤器件中, 选用了商用熊猫保偏光纤进行热极化。实验所用的光纤是工作在 $1.3 \mu\text{m}$ 的商品熊猫光纤。光纤外径为 $125 \mu\text{m}$, 纤芯掺铒, 直径约 $7 \mu\text{m}$ 。

要使器件能够实用, 制成的器件要带有尾纤, 易于与实际光纤系统熔接, 因此设计成在一段光纤中部侧面抛磨的电极结构。将一根约两米长熊猫光纤中部的一段约两米长的护层剥去。利用侧视定轴技术^[6], 调整熊猫光纤的一个双折射轴垂直于玻璃抛磨基块表面, 然后将光纤固定于抛磨基块上。用光纤抛磨技术^[7], 将熊猫光纤上长为 60 mm 的一个应力区部分磨去, 直到抛磨平面与光纤芯距离约 $1 \mu\text{m}$, 如图 1 所示, 抛磨出来的平面要平行于熊猫光纤的另一个双折射轴。为了减小抛磨平面上的散射损耗, 要进行精细抛光。将抛磨好的光纤样品固定于专门设计的精密夹具上, 在侧抛磨平面上镀上一层 Cr:Al 膜, 以形成光纤极化时电极之一(阳极)。此夹具设计成使薄膜电极镀在抛磨平面上, 同时也镀在光纤未抛磨部分的圆柱表面上。在抛磨平面上的电极部分是宽 $60 \mu\text{m}$, 长 40 mm 的金属微带形状的电极, 从而使阳极电极可以尽可能地接近纤芯, 另外, 还可以满足高速电光调制器对调制电极宽度的限制。而在圆柱型表面部分的电极部分则非常宽, 几乎覆盖了光纤表面的一半, 如图 1 所示。宽电极通过导电胶与导线相连, 并进一步地与外部电源相连。

光纤热极化时, 要在温度为 300°C 的光纤两侧面上加上强度大于 10^7 V/m 的强电场, 由于抛磨光纤两侧电极的间距小于 $80 \mu\text{m}$, 极易发生电极间的击

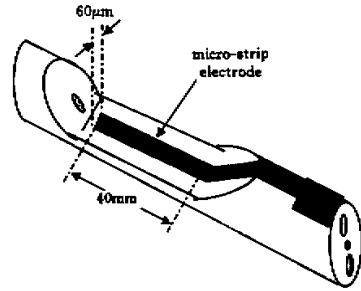


图 1 侧面抛磨熊猫光纤上的微带电极结构
Fig. 1 Configuration of the micro-strip electrode on side-polished PANDA fiber

穿, 因此在制作光纤侧抛磨平面上的微带电极的同时, 要考虑在两电极间加入抗高电场击穿的绝缘材料。聚酰亚胺有着良好的高温抗高电场击穿的性能, 在 300°C 温度时, 耐压值可达 10^8 V/m , 所以选用聚酰亚胺胶作为电极间的绝缘材料。

为保护此段待极化光纤, 将此段光纤的抛磨平面朝下, 并用一层聚酰亚胺胶将其粘在一块石英玻璃上。用导电胶将宽电极与导线相连接, 然后用聚酰亚胺多层地涂覆已抛磨光纤^[4]。为了减少固化后聚酰亚胺胶层中的气泡, 使其均匀固化, 经多次实验确定所用聚酰亚胺胶每层需进行三个温度周期的预固化, 在 80°C , 120°C , 160°C 各持续 15 min 。数层聚酰亚胺胶涂覆后, 再将整个聚酰亚胺堆进行四个温度周期的固化, 在 120°C , 160°C , 200°C 各持续 15 min , 至 350°C 维持 30 min 以上。

然后在聚酰亚胺层的顶部镀一层宽 2 mm 的铝膜形成第二个电极(阴极)。此电极与微带电极构成了光纤极化时或电光调制时的一对电极。两电极间的距离约 $90 \mu\text{m}$, 其中包括阴极电极和光纤表面之间的一层 $20 \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺层, 如图 2 所示。两电极间的重叠长度约为 40 mm 。由于光纤上的微带电极比光纤 $125 \mu\text{m}$ 的外径窄, 而光纤的击穿电压高达 $8.5 \times 10^8 \text{ V/m}$ ^[8], 同时微带电极被聚酰亚胺包裹, 因此该结构下的电极间抗高压击穿能力大大加强。即使在电极间施加超过 5 kV 的直流高压, 也不出现沿聚酰亚胺与光纤交界处的击穿现象^[5]。

将光学加工好了的约 60 mm 长, $90 \mu\text{m}$ 厚的光纤样品, 置于 280°C 温度下, 在两电极间施加 3000 V 直流高电压, 根据多次试验研究发现, 本试验的极化光纤结构的优化时间为 15 min , 因此在上述温度、电压条件下, 进行 15 min 的热极化, 制成热极化光

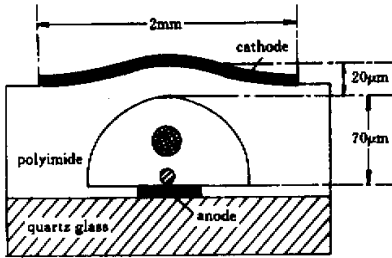


图2 待极化光纤样品的横截面图

Fig.2 Cross-section configuration of sample to be poled

纤段。由于这种器件在一根保偏光纤上,通过定轴、磨抛、热极化制成,两端带有保偏尾纤,可直接与其他光纤系统熔接,为器件的应用提供了极大的方便。

3 极化保偏光纤电光相位调制器的电光特性测试

3.1 测试装置

因为该极化光纤带有约1 m长的尾纤,可直接用熔接机将其熔接入MZ光纤干涉仪系统,进行极化光纤的电光效应的测试。全保偏光纤MZ干涉仪测试装置如图3所示,其中光源为1.3 µm线偏振输出的分布反馈布喇格(DFB)半导体激光器,光经第一个保偏光纤耦合器C₁,注入由保偏光纤构成的干涉仪的两臂中,两臂上的光信号干涉后,经第二个保偏光纤耦合器C₂输出到光电探测器D。用锁相放大器测量由光电探测器输出的带有极化光纤相位调制信息的电信号的变化幅值。测试时,将极化光纤定轴后,用保偏光纤熔接机熔入MZ干涉仪的测量臂,在干涉仪的参考臂上,一个压电陶瓷(PZT)保偏光纤调制器被用于控制干涉仪系统的相位工作点。

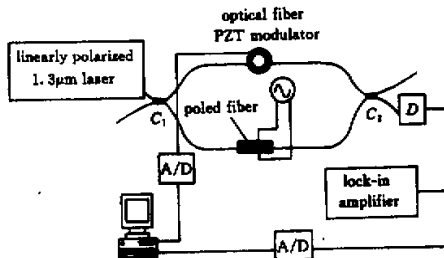


图3 全保偏光纤MZ干涉仪装置图

Fig.3 A setup of an all polarization maintaining fiber MZ interferometer

由计算机控制PZT的驱动电压,使干涉仪准确地控制在相位为 $\pi/2$ 的工作点。在此工作点上,极化光纤上产生的较小的相位调制将线性地转换为干涉仪输出的强度调制。

3.2 测试原理

当极化光纤熔接入MZ干涉仪后,在极化光纤未受到电压调制时,干涉仪系统的光电探测器的电压输出可以表示为两臂相位差 ϕ 的函数

$$V(\phi) = \left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \right) + \left(\frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \right) \cdot \cos(\phi) \quad (1)$$

其中 V_{\max} 为此时干涉仪系统输出电压的极大值, V_{\min} 为输出电压的极小值, $V_{\max} - V_{\min}$ 为此时输出电压的峰-峰值。 ϕ 为两臂的相位差,控制MZ干涉仪参考臂上的压电陶瓷光纤调制器,使干涉仪工作在 $\phi_0 = \pi/2$,此时干涉仪的输出电压为一直流量

$$V_0(\pi/2) = (V_{\max} + V_{\min})/2 \quad (2)$$

当极化光纤上施加有调制电压时,极化光纤中电光效应使干涉仪的两臂产生附加相移。设 $\phi_0 = \pi/2$ 时,极化光纤中电光效应产生的附加相移的峰-峰值为 $\Delta\phi_{EO}$,附加相移产生的干涉仪的输出光电转换电压变化的峰-峰值为 ΔV_{EO} 。测试时,可适当选取极化光纤上的调制电压,使 $\Delta\phi_{EO} \ll \pi/2$ 。于是当 $\phi = \pi/2 + \Delta\phi_{EO}/2$ 时,干涉仪输出的电压峰值幅度将为(2)式表示的直流量再加上附加电压的峰值,即

$$V\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\Delta\phi_{EO}}{2}\right) = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} + \frac{\Delta V_{EO}}{2} \quad (3)$$

另外,此时由(1)式又可得到

$$V\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\Delta\phi_{EO}}{2}\right) = \left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \right) - \left(\frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\phi_{EO}}{2}\right) \quad (4)$$

整理(3),(4)二式,可计算出附加相移的绝对值 $|\Delta\phi_{EO}|$

$$|\Delta\phi_{EO}| = 2\sin^{-1}\left(\frac{\Delta V_{EO}}{V_{\max} - V_{\min}}\right) \quad (5)$$

于是,在测试实验中,在极化光纤未受到电压调制时,先将PZT调制器的相位逐渐增加地变化 -5π 范围,测试出干涉仪输出电压峰值 $V_{pp} = V_{\max} - V_{\min}$ 。其次,撤去PZT调制器上的电压,而在极化光纤器件上加上调制频率为 f 的正弦信号,考虑到当 $f < 1$ kHz时,会在极化电光光纤中产生声频共振^[2,4],因此要选择 $f > 1$ kHz。然后,当干涉仪保持

在 $\phi_0 = \pi/2$ 时,用锁相放大器测量由加到极化光纤上的测试信号产生的干涉仪输出光电转换信号的峰-峰值 ΔV_{EO} ,则由(5)式可计算出极化光纤光电调制产生的相移 $\Delta\phi_{EO}$ 。再由以下公式可以计算出在极化熊猫光纤光电相位调制器上相对应的有效电光系数 $\gamma_{eff}^{[9]}$

$$\gamma_{eff} = \frac{\lambda}{\pi n^3 EL} \cdot |\Delta\phi_{EO}| \quad (6)$$

3.3 测试结果

在极化光纤上施加的测试正弦电压的峰-峰值为 200 V,频率为 6 kHz,此频率远高于电光光纤中的声频共振频率。光波波长 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n = 1.46$,两电极的重叠长度 $L = 0.04 \text{ m}$ 。纤芯中的电场强度 E ,可根据图 3 所示的电极结构和电势分布情况,由 Maxwell 方程组求静电场问题估算得出。

当注入极化光纤器件的光偏振垂直于磨抛平面时,测试结果表明,上述热极化保偏光纤产生的相位变化 $\Delta\phi = 31.1 \text{ mrad}$,由此计算出 γ_{eff} 的实验值为 $0.047 \pm 0.005 \text{ pm/V}$ 。可见此热极化光纤可作为电光相位调制器。假定光学模与非线性区的交叠系数为 0.1^[10],则该电光相位调制器的电光系数估计为 $0.47 \pm 0.05 \text{ pm/V}$ 。因为此干涉仪是用全保偏光纤构成(包括耦合器和极化光纤器件),因此此测试装置非常稳定,同一器件在不同时间可进行重复测试。三个多月的时间里没有测到极化光纤电光系数的衰减。

将注入极化熊猫光纤光电相位调制器的光的偏振态转过 90° ,再次测试器件的电光效应。假定光纤中偏振方向垂直于抛磨平面的模式称为 TE 模,与其垂直的模式称为 TM 模,则测试得到 TE 模与 TM 模之间的电光系数之比为 $\gamma_{TE} : \gamma_{TM} = 3.1 : 1$ 。但是,测试另一个以相同极化条件制备的极化熊猫光纤器件,此比值约为 $\gamma_{TE} : \gamma_{TM} = 1.3 : 1$ 。这些比值的无规律性的原因还不十分清楚^[11],可能造成此比值变化的因素主要有:商用熊猫光纤中的掺杂成分比;熊猫光纤应力区对光纤纤芯中模场的影响,双折射轴的定轴精度等。另外,早期的极化样品测试主要是针对大块玻璃进行的,对大块介质容易确定 TE 或 TM 模的方向,然而,对图 2 所示的极化熊猫光纤结构,极化电场在纤芯中并不完全是均匀的,而且单模光纤中存在的是 HE 模,其对上述 TE 模或 TM 模的比值的影响有必要进行更深入的研究。

4 结 论

研制了一种具有微带电极的新型热极化保偏光纤电光相位调制器。用光波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的全保偏光纤 Mach-Zehnder 干涉仪测试得该电光相位调制器的电光系数为 $0.47 \pm 0.05 \text{ pm/V}$ 。该器件用一段商品熊猫光纤制备,因此在偏振稳定性和易于与外部光纤系统熔接方面有着较好的性能。直接镀在抛磨平面上的微带电极可以改善极化光纤器件的高频特性。该器件可用于光通讯中的干涉型全光纤器件,如全光纤高速调制器,也可用作光纤电场传感器。

参 考 文 献

- 1 Chen Zhe, Liao Yanbiao, Hu Yongming *et al.*. Poled glass fiber devices and applications. *Journal of Optoelectronics & Laser* (光电子·激光), 1999, 10(2): 175~178 (in Chinese)
- 2 Peter G. Kazansky, Philip St. J. Russell *et al.*. Glass fiber poling and applications. *J. Lightwave Technol.*, 1997, 15(8):1484~1493
- 3 Simon Fleming, Danny Wong, Hugh Inglis *et al.*. Poled fiber devices for electro-optic modulation. *SPIE*, 1996, 2893:450~460
- 4 X. C. Long, S. R. J. Brueck. Large-signal phase retardation with a poled electrooptic fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9(6):767~769
- 5 X.-C. Long, R. A. Myers, S. R. J. Brueck. A poled electro-optic fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, 8(2):227~229
- 6 Hu Yongming, Tan Jichun, Chen Zhe *et al.*. Phase contrast method for measurement of birefringent axes orientation of polarization-maintaining fiber. *SPIE*, 1996, 2895:350~354
- 7 Hu Y.. Research on Polarization Maintaining Fiber Polarizer. Ph. D. Dissertation of Tsinghua University, China, 1999 (in Chinese)
- 8 F. Haberl, J. Hochreiter, J. Zehetner *et al.*. Electrical breakdown in Ge-doped silica glass fibres. *International Journal of Optoelectronics*, 1990, 5(4):363~366
- 9 Amnon Yariv. Introduction to Optical Electronics (second edition). New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976. 254
- 10 X.-C. Long, R. A. Myers, S. R. J. Brueck. Measurement of linear electro-optic effect in temperature/electric-field poled optical fibers. *Electron. Lett.*, 1994, 30(25):2162~2163
- 11 P. G. Kazansky, P. St. J. Russell. Thermally poled glass: Frozen-in electric field or oriented dipoles. *Opt. Comm.*, 1994, 110:611~614