

文章编号: 0253-2239(2005)02-169-5

光纤热极化过程的实时测试研究*

陈 哲¹ 廖延彪² 张工力¹ 庞其昌¹ 高应俊¹

(¹ 暨南大学光电工程研究所, 广州 510632)
(² 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 通过热极化可以使中心对称的熔石英光纤中产生二阶非线性效应和线性电光效应。为了解各热极化过程参量对热极化产生的线性电光效应的影响,利用全保偏光纤马赫-曾德尔干涉仪构造了一套光纤热极化的实时线性电光效应测试系统,并利用其进行了光纤热极化全过程的监控测试。在线测试了热极化过程的一些参量,例如极化电压、极化时间、以及极化温度等对热极化光纤中产生的线性电光效应的影响。实时测试研究表明,在光纤中施加尽可能高的极化电场将可能在光纤中产生较高的线性电光效应。对侧边抛磨光纤结构的热极化器件,考虑到器件的抗强电场击穿能力,可选用3.0~4.0 kV左右的极化直流电压。当施加3.0 kV左右的极化电压时,热极化优化时间约为16 min,最佳热极化加热温度约为190 ℃。

关键词: 光纤光学; 电光效应; 极化光纤; 热极化; 实时测试; 光纤干涉仪

中图分类号: TN253 文献标识码: A

In Situ Investigations of Thermal Poling Process of Optical Fibers

Chen Zhe¹ Liao Yanbiao² Zhang Gongli¹ Pang Qichang¹ Gao Yingjun¹

(¹ Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632)
(² Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Thermal poling of silica optical fibers can produce permanent second-order nonlinear and linear electrooptic effect in fused silica fibers. In order to investigate the effects of processing parameters in thermal poling, an in situ testing system used for thermal poling process is constructed with an all polarization maintaining fiber Mach-Zehnder interferometer and is used for the in situ monitoring the thermal poling optical fibers. The effects of processing parameters in thermal poling, such as applied poling voltage, poling duration and ambient temperature, on the linear electrooptic effect created in the optical fiber are investigated. Experiments of the in situ monitoring show that the stronger the electric field in the fiber core is the higher linear electrooptic coefficient created in the fiber core could be. Considering the electrical breakdown of dielectric medium between electrodes for the structure of side polished fiber, the range of voltages of 3~4 kV could be applied during thermal poling. When around 3 kV is applied on the device with side polished fiber, the optimum poling duration is about 16 min and the optimum ambient temperature for thermal poling is about 190 ℃.

Key words: fiber optics; electrooptic effect; poled fiber; thermal poling; in situ test; fiber optic interferometer

1 引 言

中心对称的熔石英中是不存在固有的线性电光效应的,通过热极化可以使中心对称的熔石英光纤中产生二阶非线性效应和线性电光效应^[1~3],这些

极化技术使得人们有可能制造出全光纤电光调制器。虽然目前得到的热极化光纤的线性电光系数小于晶体的线性电光系数,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损耗远小于晶体与光纤系统的耦合损耗,因此,多

* 国家自然科学基金(69787002)、广东省科技计划(2004Z3-D0341)和声场声信息国家重点实验室(2004001)资助课题。

作者简介: 陈 哲(1957~),男,广州人,暨南大学光电工程研究所教授,主要从事光纤无源器件、光纤通信、光纤传感技术、光电检测的研究。E-mail: thzhechen@jnu.edu.cn.

收稿日期: 2004-02-04; 收到修改稿日期: 2004-06-25

年来许多科学家对用熔石英光纤制作极化光纤器件进行了试验探索^[1~3]。我们也利用热极化技术在普通的熔石英光纤中产生的线性电光效应,对极化光纤电光相位调制器^[4]和极化光纤电光强度调制器^[5]进行了研究^[6]。一些研究者在不同极化条件下对不同的极化光纤结构进行了极化试验,通过极化试验完成后的事后测试得到了一些关于极化参量的有意义的结论。但由于完成不同极化条件下的试验成本较高,以及极化过程的复杂性,以至于较难应用这种事后测试的方法来得到整个极化过程的描述,而且也难实现极化过程的在线控制。为了进一步了解热极化的机理,以及各热极化过程参量对热极化产生的线性电光效应的影响,并探索在线控制热极化过程的优化参量,有必要对热极化过程进行实时线性电光效应测试。我们利用全保偏光纤马赫-曾德尔干涉仪构造了一套光纤热极化的实时线性电光效应测试系统,并利用其进行了热极化全过程的监控测试,测试了热极化过程的一些过程参量,也验证了以往不同极化条件下得到的一些结论。

2 实验装置

对于侧边抛磨光纤带有微带电极结构的热极化光纤器件,热极化装置要能提供 2.0~4.0 kV 的直流高压,并维持约 200~300 °C 的环境温度。此装置的关键在于直流高压源和加温设备之间的电气绝缘。另外,根据实时检测试验的要求,热极化光纤器件上除施加有 3.0 kV 左右的直流高压(DC)用于极化外,还要可以施加有效值为 70 V,频率为 6 kHz 的交流调制电压(AC)。图 1 给出了侧边抛磨光纤极化实时测试时,同时施加交流调制及直流高压的电路接线图。而图 2 给出了用全保偏光纤马赫-曾德尔干涉仪构成的极化光纤线性电光效应的实时测试系统示意图^[4]。利用此套装置进行实时测试,可确定极化电压、极化时间、以及极化温度等因素对热

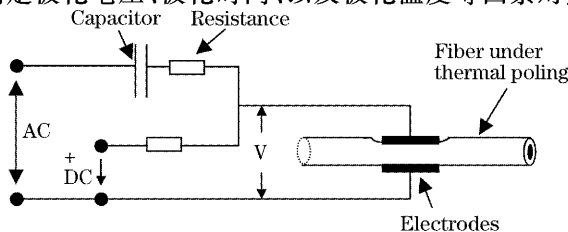


图 1 同时施加交流调制及直流高压电源的电路图
Fig. 1 Electric circuit diagram with modulation voltage and high voltage direct current source

极化光纤中产生的线性电光效应的影响。

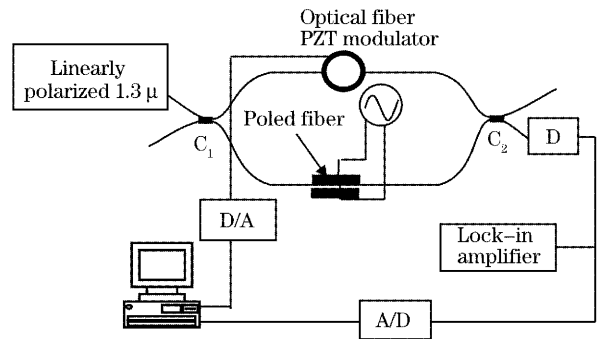


图 2 全保偏光纤马赫-曾德尔干涉仪光纤极化测试系统
Fig. 2 All polarization maintaining fiber Mach-Zehnder interferometer for measurement of poling fibers

3 实验结果

实验测试了三个已制备好微带电极,但未极化过的光纤样品 A, B, C 的热极化过程。待极化侧边抛磨熊猫保偏光纤样品的制备如文献^[3,4]所描述。将待极化光纤熔接入光纤干涉仪测试系统的一臂中,置于加热炉中,进行热极化实时测试。实时测试时,将频率为 6 kHz,电压峰峰值为 200 V(有效值为 70.7 V)的交流调制电压施加于待极化光纤上用于实时测试,同时在其上施加直流高压,进行极化。计算极化光纤中产生的有效线性电光系数的方法与公式见文献^[4]。本试验中假定光学模与非线性区的交叠系数为 0.1^[6]的状态下进行计算,这种假定并不影响以下的分析结论。

3.1 不施加直流高压时,加温过程对光纤中产生的线性电光效应的影响

首先测试在待极化光纤样品 A 上不施加直流高压,仅仅加温的过程中,该段光纤中是否产生线性电光效应。设温度为室温时(约 20 °C)由文献^[4]中公式计算得到的“线性电光系数值”就是测量的本底噪声。试验中测出此本底噪声为 0.05 pm/V。当未施加极化直流电压时,从室温(约 20 °C)升到 260 °C 的样品 A 的测试结果如图 3 所示,其中纵坐标 γ 是线性电光系数。当温度低于 200 °C 时,加温速率约为 4 °C/min,当温度高于 200 °C 后,加温速率约为 2 °C/min,所以,从 200 °C 升到 260 °C 用了约 30 min。由图 3 可知,从未极化过的样品在环境温度由 20 °C 变化到 260 °C 的过程中,“线性电光系数”的测试值都小于本底噪声 0.05 pm/V,这表明,仅仅用加温到 260 °C 的方法是不会在光纤中产生线性电光效应的。

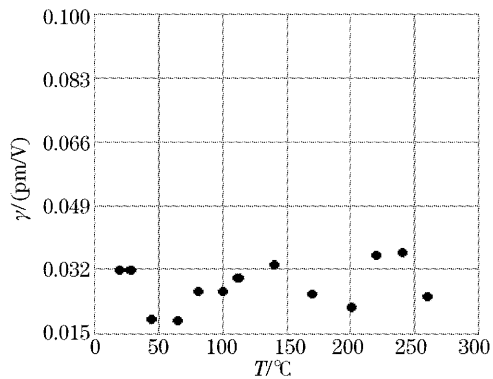


图3 样品 A 中“线性电光系数”随加热温度变化的测试值
Fig.3 The electrooptic coefficients of tested optical fiber sample A vs. heating temperature without applying direct voltage on the fiber

3.2 极化电压对热极化光纤中产生的线性电光效应的影响

当未极化过的光纤样品 A 被加温至 260 °C 后, 保持恒温 260 °C, 由未极化开始, 实时测试在施加不同强度高电压下, 光纤中产生的线性电光系数随极化时间变化的值, 如图 4 所示。

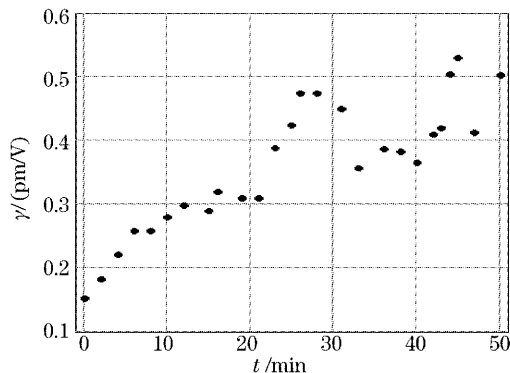


图4 260 °C 时未极化样品 A, 直流高压由 3.0 kV 增加到 4.0 kV 时, 线性光系数随极化时间变化关系

Fig.4 The linear electrooptic coefficients of poling optical fiber sample A vs. poling duration when a direct voltage of 3.0~4.0 kV is applied on the fiber and ambient temperature is 260 °C

图 4 中 0~19 min 段的极化实验表明, 当刚加上直流高电压 3.0 kV 的瞬间, 光纤样品 A 中产生的线性电光系数如图 4 中第一个黑园点所示。对比图 3 中加温至 260 °C 时的值(图 3 中最后一个点)可以发现, 一但在光纤样品上施加直流高电压, 测试的线性电光系数立刻就有了一个跳跃性的突变, 由小于本底 0.05 pm/V, 跃变为 0.15 pm/V, 这表明样品 A 的纤芯在 3.0 kV 直流高电压产生的 3.3×10^7 V/m 的强电场的作用下, 已开始出现了线性电光效应或

二阶非线性效应。

这段的实验结果还表明, 随着极化时间的延长, 光纤中的极化线性电光效应也在逐渐增加。当维持直流高电压 3.0 kV 达到 16 min 后, 极化线性电光效应已达到约 0.3 pm/V, 此后继续极化, 其线性电光系数并没有再随极化时间的延长而增加。

接着, 维持 260 °C 恒温, 将极化直流电压由 3.0 kV 提高到 3.5 kV, 然后维持此电压对样品 A 继续极化(这对应图 4 中 21~33 min 段的极化过程), 于是光纤中的极化线性电光效应又随极化时间的延长而逐渐增加。刚升到 3.5 kV 电压时, 线性电光系数值为 0.3 pm/V, 维持 6 min 极化后, 逐渐增加到 0.47 pm/V。在保持 3.5 kV 电压的极化达到 11 min 后, 极化线性电光效应又不再随极化时间的延长而增加, 而是开始减小。

再次将极化直流电压由 3.5 kV 升高到 4.0 kV, 热极化光纤中产生的电场强度由约为 3.85×10^7 V/m 增加到 4.4×10^7 V/m。然后维持此电压继续对样品 A 极化(这对应图 4 中 36~50 min 段的极化过程), 极化线性电光效应又开始随极化时间的延长而逐渐增加, 约 10 min 后, 线性电光系数可继续增加到 0.52 pm/V。

图 4 对应的整个试验表明, 极化线性电光效应与极化时所施加的直流电压, 也即极化时光纤中的极化静电场的大小有关。极化时所施加的极化静电场的强度越大, 则极化光纤中产生的线性电光效应越大。由此可得结论, 光纤的热极化试验应在尽可能高的极化电场中进行。这对待极化光纤器件的结构提出了较高的抗高压击穿能力的要求, 器件在 260 °C 温度的环境中, 超过 4.0 kV 高电压就出现了电击穿现象。这个实时测试的结果验证了已有实验的结论^[1,8,9], 然而已有的试验结论是由不同的单个极化实验完成后的事后测量得到的。

3.3 极化时间对热极化的光纤中产生的线性电光效应的影响

对另一个未极化过的样品 B 进行了极化优化时间的测试试验。试验条件为单一直流电压 2.5 kV, 加热温度为 270 °C 的极化, 试验结果如图 5 所示, 图中的点划曲线为拟合曲线。此试验表明在我们所用的侧边抛磨极化光纤结构下的极化优化时间长度约为 17 min, 这与图 4 中 0~19 min 极化过程段的结果基本吻合。图 4 中 0~19 min 极化过程段的结果也显示, 当极化时间达到约 16 min 时, 极化线性电光系数达到最大值, 此后不再增加。图 4 中此

段与图 5 中热极化产生的最大线性电光系数的不一致,是由于制备的器件的工艺目前还不够稳定,重复性不太好,从而各器件的实际结构有差别造成的。

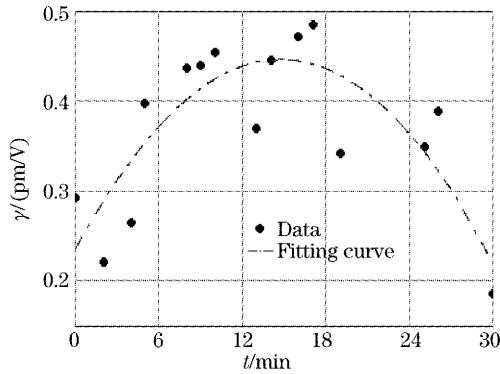


图 5 270 °C 时加直流高压 2.5 kV, 样品 B 中线性电光系数随极化时间变化

Fig. 5 The linear electrooptic coefficients of poling optical fiber sample B vs. poling duration when a direct voltage of 2.5 kV is applied on the fiber and ambient temperature is 270 °C

图 4 中 21~33 min 极化过程段的结果表明,当维持极化直流电压在 3.5 kV 约 6 min 后,极化线性电光系数达到最大值,此后极化线性电光系数开始减小。另外,图 4 中 36~50 min 极化过程段的结果表明,当提高极化直流电压维持在 4.0 kV 后约 10 min,极化线性电光系数也达到最大值,此后又出现极化线性电光系数减小的现象。但由于这两段的极化都是经过一段时间极化后继续再极化的结果,例如,21~33 min 段是在施加 3.0 kV 电压极化了 19 min 的极化历史基础上进行的,而 36~50 min 段又是在施加 3.0 kV 电压极化,再施加 3.5 kV 电压极化的历史上进行的,因此它们中的极值出现时间不能视为从未极化开始的极化优化时间长度。但后两段的实验却表明了,极化时间对所产生的线性电光效应的影响不仅与器件结构有关,也与极化直流电压、多次极化的历史等有关。

3.4 热极化温度对热极化光纤中产生的线性电光效应的影响

文献中通常认为热极化时的温度应在 250 °C 以上^[10]。我们利用光纤热极化实时测试系统对热极化光纤的温度效应进行了试验。试验是对未极化过的样品 C 进行的。实验条件为施加恒定 3.0 kV 直流高电压的状态下,将样品的环境温度从 50 °C 逐渐升温升到 280 °C。测试结果如图 6 所示。当温度低于 130 °C 时,加温速率约为 4 °C/min,当温度高于 130 °C 后,加温速率约为 2 °C/min,如图 6 中第二个

点对应温度 70 °C,对应极化时间长度约为 16 min。

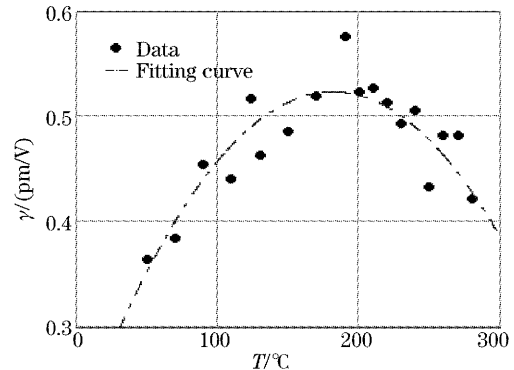


图 6 直流高压 3.0 kV 时,环境温度由 50 °C 逐渐升温到 280 °C,样品 C 中线性电光系数的值

Fig. 6 The electrooptic coefficients of tested optical fiber sample C vs. heating temperature when a direct voltage of 3.0 kV is applied on the fiber

测试结果表明,随着极化温度的增加,光纤器件样品 C 中产生的极化线性电光效应增大,到 190 °C 时达到最大值。此后加热温度的继续升高并不增大光纤中的线性电光效应,反而使线性电光效应逐渐减小。实际上,本极化升温实验过程中,对器件的热极化不仅包含升温的效应,也包含时间积累效应。目前还不能完全区分本实验中温度效应或时间积累效应的作用。但由于图 6 中线性电光系数达到最大值时,极化时间已达 53 min,而根据我们在 3.3 节中对极化优化时间的讨论,以及他人的实验^[1,8,9],当极化电压一定时,最佳极化时间约为 10~15 min,而极化 30 min 后并不能使产生的线性电光系数变大。因此我们认为,本实验中,当极化电压恒定时,极化 53 min 时达到的线性电光系数的极值是温度效应起主导作用的结果,也即可认为 190 °C 是最佳热极化温度。当然需要设计更进一步的实验来区分两种影响的具体大小。

早期的熔石英薄膜的热极化试验中^[10],二次谐波信号的实时测试发现,150 °C 是其最佳极化温度,而大块熔石英的最佳极化温度的报道却是 250 °C 以上。本试验结果却显示,对于我们的侧边抛磨光纤结构,最大线性电光系数出现的极化温度是 190 °C。我们的试验结果与他人结果的差异可能是不同的极化光纤结构的不同造成的。可以认为,在我们以往的实验中借用文献的“最佳温度”约为 260 °C 的实验条件,可能是我们获得的线性电光效应不够高的原因之一。实时测试研究为我们下一步的研究提供了优化数据。

4 结 论

利用全保偏光纤马赫-曾德尔干涉仪构造了一套光纤热极化的实时线性电光效应测试系统,并利用其进行了光纤热极化全过程的监控测试。试验再次验证了,热极化光纤中产生的线性电光效应不仅与器件的结构有关,也与热极化的过程参量有关,如极化电压、极化温度和极化时间等。只有加温并同时施加极强的电场在熔石英光纤上,才有可能在熔石英光纤中产生永久二阶非线性效应和线性电光效应。当加热温度恒定时,在光纤中施加尽可能高的极化电场将可能在光纤中产生较高的线性电光效应。实验也表明对侧边抛磨光纤结构的器件,考虑到器件的抗击穿能力,可选用3.0 kV左右的极化直流电压。对恒定的极化直流高电压,存在使熔石英光纤中产生最大线性电光效应的热极化优化时间和最佳极化温度。对侧边抛磨光纤结构的器件,当极化直流电压为3.0 kV左右时,热极化优化时间约为16~17 min,最佳热极化加热温度约为190 °C。这套实时测试系统不仅应用于在线实时研究工作,还可直接用于制备热极化光纤的最佳参量的在线监控,提高制备效率。

参 考 文 献

- 1 Peter G. Kazasky, Philip St. J. Russell, Hiromichi Takebe. Glass fiber poling and application[J]. *J. IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1484~1493
- 2 X. C. Long, S. R. J. Brueck. Large-signal phase retardation with a poled electrooptic fiber[J]. *J. IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(6): 767~769
- 3 Zhe Chen, Yanbiao Liao, Yongming Hu *et al.*. Thermally poled PANDA fiber device with micro-strip electrode[J]. *J. Electron. Lett.*, 2000, **36**(22): 1839~1840
- 4 Chen Zhe, Liao Yanbiao, Hu Yongming *et al.*. Electro-optic phase modulator with thermally poled PANDA fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(11): 1003~1006 (in Chinese)
陈 哲, 廖延彪, 胡永明 等. 热极化保偏光纤电光相位调制器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11): 1003~1006
- 5 Chen Zhe, Liao Yanbiao. All polarization maintaining thermal poling fiber electro-optic intensity modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 663~665 (in Chinese)
陈 哲, 廖延彪. 热极化保偏光纤构成的全光纤电光强度调制器[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 663~665
- 6 Ni Ming, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Propagation characteristics of lightwave in side-polished poled fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 121~125 (in Chinese)
倪 明, 胡永明, 孟 洲 等. 侧面抛磨极化光纤的传输特性分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 121~125
- 7 Chen Zhe, Liao Yanbiao. The response of the electro-optical effect of thermal poled PANDA fiber devices to the frequencies of modulation[J]. *半导体光电*, 2004, **25**(1): 35~38 (in Chinese)
陈 哲, 廖延彪. 热极化光纤中线性电光系数对调制频率的响应[J]. *半导体光电*, 2004, **25**(1): 35~38
- 8 X.-C. Long, R. A. Myers, S. R. J. Brueck. Measurement of linear electro-optic effect in temperature/electric-field poled optical fibers[J]. *J. Electron. Lett.*, 1994, **30**(25): 2162~2163
- 9 Simon Fleming, Danny Wong, Hugh Inglis *et al.*. Poled fiber devices for electro-optic modulation [C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2893**: 450~460
- 10 R. A. Myers, S. R. Brueck, R. P. Tumminelli. Stable second-order nonlinearity in SiO₂-based waveguides on Si using temperature/electric field poling[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2289**: 158~166