

一种具有高二阶非线性椭圆芯中空光纤

田凤军 苑立波 刘志海 薄夫森

(哈尔滨工程大学理学院光子研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 提出并制造一种新颖的椭圆芯中空光纤,采用热极化方法使其具有高二阶非线性,可用作相位调制器。该光纤在 300 °C 温度、大于 1×10^8 V/m 强电场和 9 cm 有效电极长度条件下热极化 30 min 后,产生大的线性电光相移。基于双椭圆芯中空光纤构建一种纤内马赫-曾德尔干涉仪,通过观察干涉条纹的移动来评估相移,最终得到 1.16 pm/V 的高二阶非线性系数和 0.52 pm/V 的线性电光系数。该技术具有简单、灵活的特点,可以用来制作高光电系数器件,降低制作成本,并能进一步提高全光纤器件的集成度。

关键词 光纤光学;椭圆芯光纤;二阶非线性;热极化;纤内马赫-曾德尔干涉仪;电光器件

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0106001

An Elliptical-Core Hollow Fiber with High Second-Order Nonlinearity

Tian Fengjun Yuan Libo Liu Zhihai Bo Fusen

(*Photonic Research Center, College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China*)

Abstract A novel elliptical-core hollow fiber (ECHF) with high second-order nonlinearity (SON) applied in phase modulator is proposed and fabricated. A large linear electro-optic phase shift observed in the fiber has been induced by thermal poling at about 300 °C for 30 min with an electric field larger than 1×10^8 V/m and a 9-cm-length electrode. Based on ECHF an in-fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) is constructed, movement of interference fringe to estimate phase shift is observed. As high as 1.16 pm/V SON coefficient and 0.52 pm/V linear electro-optic (EO) coefficient are obtained. This technology is simple and versatile that can be utilized to fabricate high EO coefficient devices, which can decrease fabrication cost, and realize higher integration level of all fiber devices.

Key words fiber optics; elliptical-core fiber; second-order nonlinearity; thermal poling; in-fiber Mach-Zehnder interferometer; electro-optical devices

OCIS codes 060.2280; 060.5060; 060.4080; 060.2270

1 引 言

当前全光纤电光器件得到广泛关注和展^[1~3]。具有线性电光特性和二阶非线性特性^[4]的石英基极化光纤作为全光纤电光器件的重要组成部分,在波分复用(WDM)系统和传感系统中有重要应用,无定形的二氧化硅具有中心反演对称结构,本质上不具有二阶非线性。而热极化^[5]技术可以破坏

这种对称性,将有效的二阶非线性引入到石英晶格中,新得到的二阶非线性具有可重复、可靠和稳定的特点。然而,当前在光通信领域中面临的挑战之一就是具有高速调制、路由和开关功能的电光器件的低成本制造,而且与铁电晶体和被极化聚合物相比,极化光纤的非线性系数仍然很低(约为 0.5 pm/V)^[6],并且被感应出来的非线性耗尽层很

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(60927008,60877046,61077053,61077062)和中央高校基础研究基金(HEUCF201111105)资助课题。

作者简介: 田凤军(1980—),男,博士研究生,讲师,主要从事纤维集成光学和特种光纤制作与应用等方面的研究。

E-mail: tianfengjun0424@yahoo.com.cn

导师简介: 苑立波(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事纤维光学及应用等方面的研究。

E-mail: lbyuan@vip.sina.com(通信联系人)

薄,以至于难以保证被记录的电场与光纤芯完全重叠。极化光纤的另一个问题是制备方法复杂、耗时^[7]。

本文提出并制造一种带有微电极的新型熔嵌式椭圆芯中空光纤(ECHF)。与传统双孔光纤^[8]相比,ECHF的空气孔足够大,可以降低插入金属阳极的难度,同时电光系数对阳极与纤芯之间的间距非常敏感^[6],间距越小电光系数越大。对于ECHF,在芯层和阳极之间存在一个 $3\ \mu\text{m}$ 的薄包层,这个薄包层的存在有益于增强锗掺杂纤芯的热极化效率,提高二阶非线性。通过将ECHF与热极化技术相结合,ECHF的二阶非线性被实验地展示。特别地,基于这种被热极化的双芯ECHF构建了纤内马赫-曾德尔干涉仪(MZI),通过干涉条纹解调方法表征了ECHF的二阶非线性。

2 ECHF的制备技术

图1为带有电极的椭圆芯中空光纤结构图。光纤由四层结构构成,包括 $65\ \mu\text{m}$ 直径的中心圆形空气孔、 $8\ \mu\text{m}/4\ \mu\text{m}$ (长轴/短轴)椭圆芯、 $125\ \mu\text{m}$ 直径的光纤外包层和 $3\ \mu\text{m}$ 厚度的薄内石英包层。

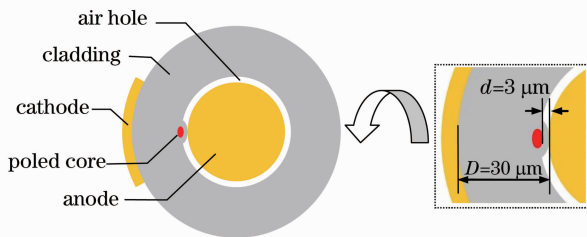


图1 带有电极的椭圆芯中空光纤结构

Fig. 1 Configuration of elliptical-core hollow fiber with electrodes for easy poling

与传统光纤的制备步骤相似,ECHF制备过程包括预置棒制备和光纤拉丝两个步骤。预置棒由芯棒和石英管构成。通过化学气相沉积(MCVD)和腐蚀方法来制备芯棒。利用氢氧焰来加热石英管和芯棒,使得芯棒固定在石英管内壁上,并彼此熔融成一体。然后采用具有压力控制功能的光纤拉丝塔控制ECHF。压力控制器为中空的光纤预制棒提供正压,避免在高温拉丝过程中石英管的塌缩。拉丝温度设定为 $2000\ ^\circ\text{C}$,送棒速度为 $500\ \mu\text{m}/\text{min}$,拉丝速度为 $5\sim 6\ \text{m}/\text{min}$ 。在 $+100\ \text{Pa}$ 的压力作用下拉制出 $400\ \text{m}$ 的ECHF。图2(a)和图2(b)分别为单芯和双芯ECHF的实物端面图。它们具有 $125\ \mu\text{m}$ 直径的外包层、 $65\ \mu\text{m}$ 直径的空气孔、 $8\ \mu\text{m}/4\ \mu\text{m}$ 的椭

圆芯和 $3\ \mu\text{m}$ 厚的内薄包层。经测试,在 $633\ \text{nm}$ 波长处,石英包层折射率为 $n_d=1.462$,纤芯折射率 $n_c=1.466$ 。纤芯与包层之间的折射率差约为 0.004 。实验结果与图1中所示的结构吻合较好。

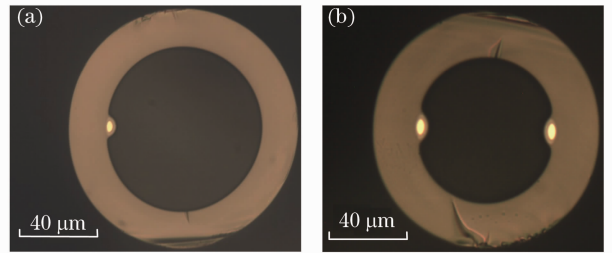


图2 ECHF的端面图。(a)单椭圆芯中空光纤;
(b)双椭圆芯中空光纤

Fig. 2 Cross section of ECHF. (a) Single-core ECHF; (b) twin-core ECHF

3 ECHF的热极化技术

采用热极化技术对ECHF进行极化处理。首先制备金属阳极和金属阴极。由于ECHF具有一个比传统双孔光纤大的空气孔,一段直径 $60\ \mu\text{m}$ 、长度 $9\ \text{cm}$ 的钨丝很容易地被插入到光纤中来作为阳极,如图3所示。

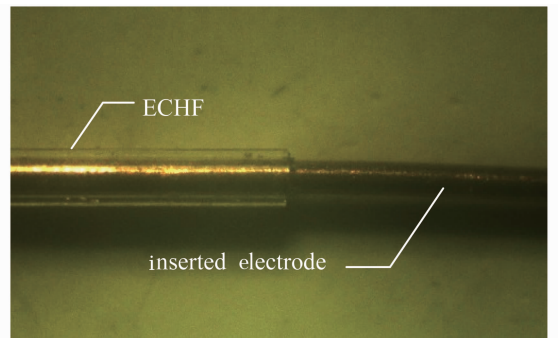


图3 带有极化电极的双芯ECHF的实物照片
Fig. 3 Photograph of twin-core fiber with poling electrodes

通过溅射的方法在靠近纤芯附近的包层上制备一层金(Au)膜作为阴极。根据文献^[9],在 $300\ ^\circ\text{C}$ 的温度条件下对阳极施加 $4.3\ \text{kV}$ 的直流电压,同时将阴极接地。 $30\ \text{min}$ 后,关闭加热器,直到温度降到室温时关闭高压电源。这样可以在阳极附近的包层下面产生一个耗尽区(即非线性区)。由于阳极距离纤芯仅有 $3\ \mu\text{m}$ 的距离,可以认为非线性区域完全覆盖了整个纤芯。所以期望在被极化的ECHF中得到高的二阶非线性。

4 构建纤内马赫-曾德尔干涉仪

为评估被极化 ECHF 的二阶非线性和测量相位调制器中的相移情况,构建一种基于双芯 ECHF [见图 2(b)]的纤内 MZI。其中干涉仪的一个干涉臂(即双芯光纤中的一个纤芯)已经被热极化。采用单芯单模光纤与多芯光纤的熔融拉锥耦合技术^[10~13]来实现这种紧密的纤内 MZI 结构。图 4(a)给出了 ECHF 与单模单芯光纤熔融拉锥的整个过程。由于极化光纤主要应用在光通信领域,所以光源采用波长为 1310 nm 的激光二极管(LD),此时光纤可以实现单模传输。首先,采用 KL-260B 光纤熔接机将单模光纤与被极化的双芯 ECHF 熔接;然后在光纤的熔接点处加热、拉伸,渐渐形成一个拉锥区,直到分光比为 50:50 时停止加热;最后拉锥区腰部直径减少到 20 μm 左右,被极化的 ECHF 在锥形区被塌缩成实心。图 4(b)给出了被 CCD 检测到的双芯能量分布,从单芯单模光纤注入的光能量能够均匀地被分配到 ECHF 的两个纤芯中,且熔接损耗低于 2 dB。

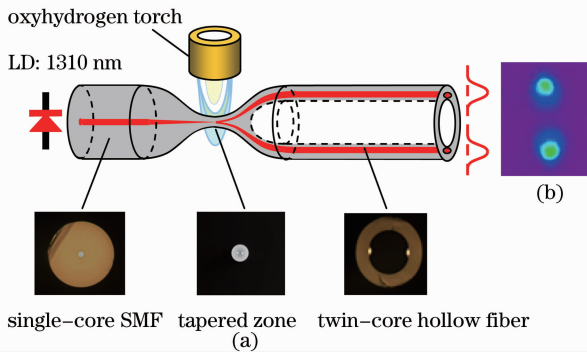


图 4 (a) 双芯 ECHF 纤芯中能量耦合的实验装置; (b) 在 1310 nm 波长处 CCD 探测到的双芯光能量分布
Fig. 4 (a) Experimental setup for energy coupling processing in each core of the ECHF; (b) near mode field of twin-core monitored by CCD camera at 1310 nm

5 测试 ECHF 二阶非线性与结果

基于纤内 MZI,进行电光相位调制和干涉条纹位移解调实验,实验装置如图 5(a)所示。CCD 摄像头用来探测远场干涉条纹,定义条纹间距为 d ,且以 d 为单位长度,如图 5(b)所示。当施加调制电压、且逐渐提高时,干涉条纹产生移动。众所周知,被极化纤芯中的相移 $\Delta\varphi$ 与干涉条纹间距呈线性变化关系。当干涉条纹位移量为 d 时,相应的相移 $\Delta\varphi$ 为 π 。被极化纤芯折射率的变化 Δn_c 与调制电压之间的关系为

$$\Delta n_c = \frac{\chi^{(2)}V}{n_c D} \eta, \quad (1)$$

相移 $\Delta\varphi$ 与折射率变化 Δn_c 的关系为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L \Delta n_c}{\lambda}. \quad (2)$$

式中 $\chi^{(2)}$ 为二阶非线性系数, V 是调制电压, $L = 9$ cm 为被极化光纤纤芯的有效长度,根据 Sellmeier 色散公式,在 $\lambda = 1310$ nm 波长处 $n_c = 1.453$ 为未施加调制电压时光纤芯折射率, $D = 30$ μm 为两电极之间间距, η 为光纤芯导模与二阶非线性区的重叠系数。

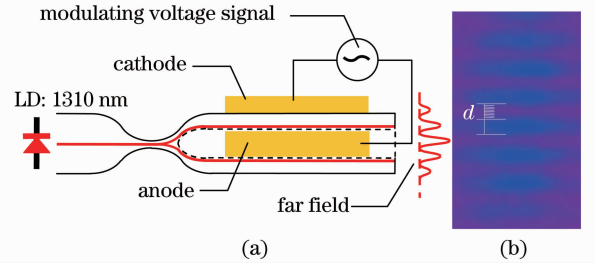


图 5 (a) 基于纤内 MZI 的电光相位调制实验结构图; (b) 远场干涉条纹

Fig. 5 (a) Experimental configuration of EO phase modulation based on the in-fiber MZI; (b) far field interference fringe

结合(1)式和(2)式可得到 $\Delta\varphi$ 和 V 之间的关系

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\chi^{(2)}VL}{\lambda n_c D} \eta, \quad (3)$$

在上述的热极化实验中,非线性区可以完全覆盖整个纤芯,所以 $\eta = 1$ 。得到以下关系

$$\Delta\varphi = 0.9903 \times 10^{10} \chi^{(2)} V. \quad (4)$$

图 6 给出了调制电压与相移之间的实验特性曲线。半波电压 V_π 为 273 V,拟合直线的斜率为 0.0115。根据(4)式,经计算得到的二阶非线性系数为 1.16 pm/V。根据文献[8],电光系数可表示为

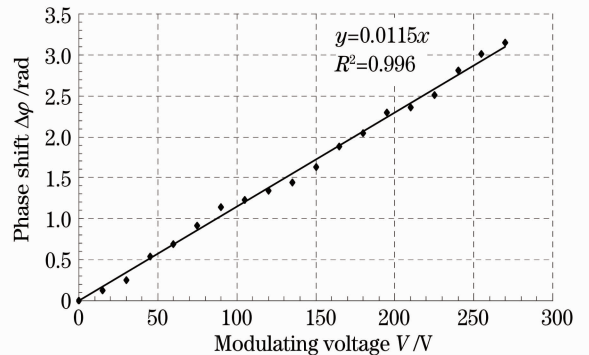


图 6 被极化 ECHF 的电光相位调制特性
Fig. 6 EO phase modulation characteristic of poled ECHF in phase modulator

$$\gamma = \frac{2\chi^{(2)}}{n_c^4}, \quad (5)$$

电光系数为 0.52 pm/V。这些结果表明,由于 ECHF 具有独特的光纤结构,通过热极化技术可以使其具有高的二阶非线性和线性电光系数,且能运用到各种基于纤内干涉仪的高灵敏度电光器件中。

6 结 论

提出并制造一种新型椭圆芯中空光纤。通过热极化技术使其具有高二阶非线性。由于 ECHF 独特的光纤结构,在 300 °C、大于 1×10^8 V/m 强电场和 9 cm 电极长度的条件下热极化 30 min 后,大的线性电光相位偏移被观察到。基于双椭圆芯中空光纤的纤内 MZI,通过观察干涉条纹的移动来评估该相位偏移,得到 1.16 pm/V 二阶非线性系数和 0.52 pm/V 的线性电光系数。该技术具有简单、灵活的特点,可以用来制作高电光系数器件,降低制作成本,并能进一步提高全光纤器件的集成度。此种具有高二阶非线性的中空光纤在电光器件领域拥有巨大的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 H. Nasu, H. Okamoto, A. Mito *et al.*. Influence of the OH content on second harmonic generation from electrically polarized SiO₂ glasses[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(2): 406~407
- 2 K. Tanaka, K. Kashima, K. Hirao *et al.*. Second harmonic generation in poled tellurite glasses[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(6): 843~845
- 3 P. G. Kazansky, A. Kamal, P. St. J. Russell. High second-order nonlinearities induced in lead silicate glass by electron-beam

- irradiation[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(9): 693~695
- 4 P. G. Kazansky, L. Dong, P. St. J. Russell. High second-order nonlinearities in poled silicate fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(10): 701~703
- 5 Chen Zhe, Liao Yanbiao, Zhang Gongli *et al.*. In situ investigations of thermal poling process of optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 169~173
陈 哲, 廖延彪, 张工力 等. 光纤热极化过程的实时测试研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 169~173
- 6 X.-C. Long, R. A. Myers, S. R. J. Brueck. A poled electrooptic fiber[J]. *IEEE Phot. Tech. Lett.*, 1996, **8**(2): 227~229
- 7 T. Fujiwara, D. Wong, S. Flemming. Large electrooptic modulation in a thermally-poled germanosilicate fiber[J]. *IEEE Phot. Tech. Lett.*, 1995, **7**(10): 1177~1179
- 8 T. Fujiwara, D. Wong, Y. Zhao *et al.*. Electro-optic Modulation in germanosilicate fibre with UV-excited poling[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(7): 573~575
- 9 R. A. Myers, N. Mukherjee, S. R. J. Brueck. Large second-order nonlinearity in poled fused silica[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(22): 1732~1734
- 10 Libo Yuan, Zhihai Liu, Jun Yang. Coupling characteristics between single-core fiber and multicore fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3237~3239
- 11 Wang Xue, Lu Mifang, Yang Jun *et al.*. Twin-core fiber-based long-period fiber grating and its coupling characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3391~3397
王 雪, 路密芳, 杨 军 等. 基于双芯光纤的长周期光纤光栅及其耦合特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3391~3397
- 12 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo, Liu Zhihai *et al.*. Coupling approach and mechanism of single-core and twin-core fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 913~917
朱晓亮, 苑立波, 刘志海 等. 单芯光纤与双芯光纤的耦合方法与耦合机制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 913~917
- 13 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo. Coupling approach and mechanism on single core fiber and capillary optical fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505009
朱晓亮, 苑立波. 单芯光纤与毛细管光纤的耦合方法及其机理[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505009

栏目编辑:殷建芳