

电场作用下热极化四孔光纤偏振光传输特性研究

陈振宜,王水莲,陈娜*,刘书朋,郝强达

(上海大学 上海先进通信与数据科学研究院,上海 200444)

摘要:由于热极化将破坏光纤熔石英材料的中心反演对称性,使其产生二阶光学非线性效应或线性电光效应。设计一种四孔光纤,采用载流子模型,通过有限元计算方法,分析四孔光纤的热极化过程,制备出了热极化四孔光纤,并研究了电场对其偏振光传输特性的影响。实验测量结果表明:热极化四孔光纤中,偏振光的椭圆率和方位角随电场强度的变化呈近似线性关系。由此获得其二阶非线性系数为 0.17 pm/V ,与数值仿真结果基本一致。

关键词:热极化;四孔光纤;二阶非线性系数;载流子模型;偏振光

中图分类号:TN256 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)09-0048-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of polarized light transmission characteristics for thermally poled four-hole fiber under the electric field

CHEN Zhenyi, WANG Shuilian, CHEN Na*, LIU Shupeng, HAO Qiangda

(Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Because thermal polarization will destroy the central inversion symmetry of fused silica, it will produce second-order optical nonlinearity effect or linear electro-optic effect. Studies have shown that thermal poling of fused silica fibers can destroy this macroscopic central symmetry, resulting in second-order nonlinearity or linear electro-optical effects. In this paper, a four-hole optical fiber is designed. A carrier model is used to simulate the thermal poling process of four-hole fiber by finite element analysis. Based on this, a thermally poled four-hole fiber was prepared and its polarized light transmission characteristics was studied the under influence of the electric field. The experimental results show that the ellipticity and azimuth of polarized light in the thermally poled four-hole fiber change linearly with the electric field strength. Thus, its second-order nonlinearity is 0.17 pm/V , which is basically consistent with the numerical simulation results.

Key words: thermal poling; four-hole optical fiber; second-order nonlinearity; carrier model; polarized light

0 引言

热极化是使宏观中心反演对称的熔石英光纤材料,也是一种产生二阶非线性效应和线性电光效应的技术^[1],可广泛应用于电光调制器、光频转换器^[2]、光开

关^[3]和偏振纠缠光子对生成^[4]等全光纤器件。极化温度和极化电压是光纤纤芯产生二阶非线性的重要影响因素^[5]。同时,热极化时间将直接影响最终产生的二阶非线性系数的大小^[6]。

W. Margulis 等人于 2009 年提出了在双孔光纤中插入双阳极,既可以避免电击穿,又可以提高热极化后产生的二阶非线性系数的大小和稳定性^[7]。为了进一步阐明基于双阳极模型的热极化物理过程,并优化其热极化参数,Camara 等人于 2014 年利用二维仿真模型,研究了双孔光纤热极化过程中离子迁移的微观机理,同时分析了热极化参数(极化电压、温度和空气湿度等)对极化效果的影响^[8]。同年,De Lucia 等人提出了一种新型的热极化技术——静电感应,这种技术可有效降低对光纤的热极化难度,可实现对较长光纤的

收稿日期:2019-03-09。

基金项目:国家自然科学基金项目(61475095,61575120)资助;上海大学特种光纤与光接入网重点实验室开放项目(SKLSFO2017-02、SKLS-FO2018-5)资助。

作者简介:陈振宜(1959-),男,博士,研究员,博士生导师,现工作于上海大学通信与信息工程学院光纤研究所,主要从事特种光纤预制棒的设计、制备及拉丝,掺杂光纤的制备与特性研究、特种光纤器件与传感研究。

* 通信作者:陈娜(Email: na.chen@shu.edu.cn)。



热极化^[9]。但是热极化产生的二阶非线性系数的大小还有待提高。

基于此,本文提出一种四孔结构光纤,利用有限元法,通过 Comsol 计算软件平台,分析其热极化过程,并实验制备热极化四孔光纤。

1 热极化

1.1 机理与模型

光纤热极化是通过打破二氧化硅材料的宏观中心反演对称性,以导致二阶非线性效应。设光纤最初是电中性^[10]。当热极化开始时,在高温强电场作用下,高迁移率的 Na^+ 首先被激活,然后在外加电场的作用下,逐渐由阳极向阴极和光纤外表面迁移。此时,在阳极外表面会形成阳离子的耗尽层。随着热极化过程的不断演进,阳极表面空气中的水分子在外加电场作用下电离成氢合物离子(H_3O^+),并累积后迁移进入光纤中。随后,迁移率较低的 H_3O^+ 也逐步向阴极和光纤外表面迁移,并逐渐中和由 Na^+ 迁移所留下的带负电的空穴^[11],从而加速了耗尽层覆盖纤芯的过程。当耗尽层覆盖至纤芯中心时,其内建电场达到最大值。此时,将温度降低至室温,极化电压降至零,便可形成冻结的内建电场^[12]。

针对低浓度离子在电场作用下会引起扩散和漂移问题^[8],基于 Comsol 多物理场解决方案,光纤石英玻璃材料的热极化过程应满足如下载流子系统的漂移扩散方程组^[13]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla C_i + z_i \mu_i F C_i \nabla \Phi) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{F}{\varepsilon} \sum_i z_i C_i \quad (2)$$

其中, ∂ 表示偏导数, t 表示热极化时间, ∇ 表示哈密顿算子, i 表示载流子的种类, $C_i(x,y,t)$ 表示载流子浓度, $\Phi(x,y,t)$ 表示热极化过程中的电位分布, D_i 和 μ_i 分别表示载流子的扩散系数和迁移率, z_i 表示载流子的电荷数量, F 表示法拉第常数, ε 表示石英玻璃材料的介电常数, $D_i = \kappa_B T \mu_i / e$, κ_B 表示波兹曼常数, T 表示温度, e 表示基本电荷。

在漂移扩散方程组中,式(1)为局部连续性方程,其中的第一项表示离子的瞬变,第二项表示电荷的漂移和扩散。式(2)为泊松方程,表明电荷分布决定了电场分布。结合方程 $\chi_{\text{eff}}^{(2)} = 3\chi^{(3)} \cdot E_{\text{rec}}^{[12]}$,即可以得知热极化光纤二阶非线性的演化规律^[14]。

设热极化条件为:在孔中注入液态镓铟合金,极化温度为 285 °C,光纤外表面设置为零电位,极化电压为 5 kV。在 $t=0$ s 时, Na^+ 的浓度为 1 ppm,且均匀分布于光纤; H_3O^+ 的初始浓度为 0,随着极化时间的增加, H_3O^+ 扩散进入光纤。当扩散离子离开光纤外表面后,将不再返回^[15]。在数值仿真计算中, Na^+ 的扩散系数为 $D(\text{Na}^+) = D_0(\text{Na}^+) \exp(-\frac{H}{\kappa_B T})$,其中 Na^+ 的活化能为 $H=1.237$ eV^[8]。 Na^+ 在 285 °C 时的迁移率为 $\mu_{\text{Na}^+} = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{Vs}$, H_3O^+ 的迁移率为 $\mu_{\text{Na}^+}/1000$ 。这些值均与温度有关,在不同的文献中存在细微的差别^[16]。

四孔光纤横截面如图 1 所示。其中,4 个孔的直径均为 30 μm ,左孔与纤芯的中心距离为 22.5 μm ,其余 3 个孔与纤芯的中心距离均为 28.5 μm 。相对于其余 3 个孔,左孔与纤芯的中心距离更近,导致左孔与纤芯间的 Na^+ 迁移过纤芯所需的时间更短,从而加速了耗尽层覆盖纤芯的过程。

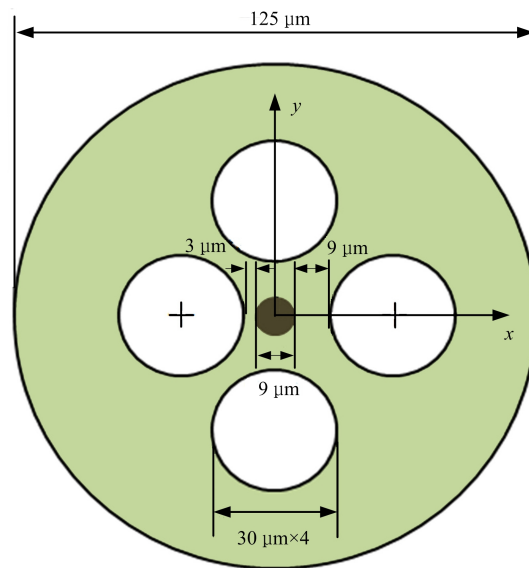
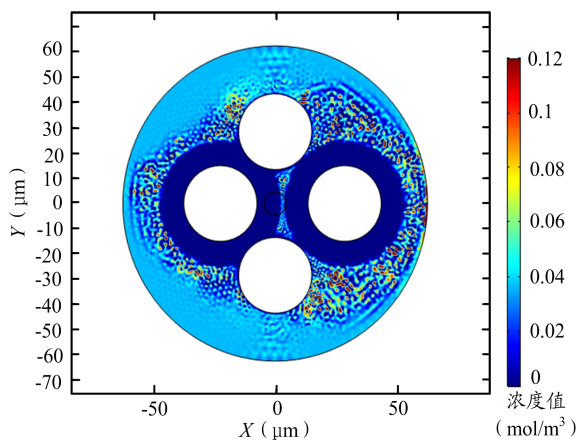


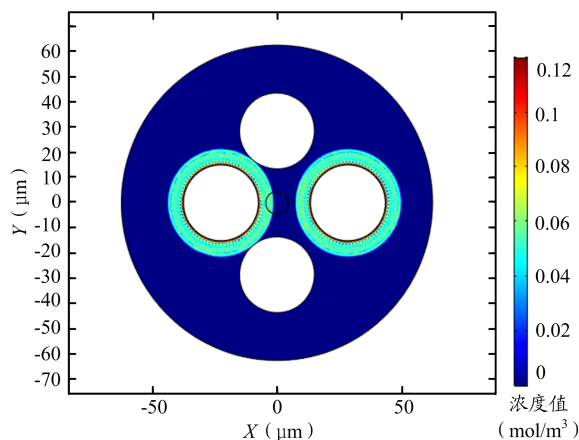
图 1 四孔光纤横截面

1.2 理论仿真

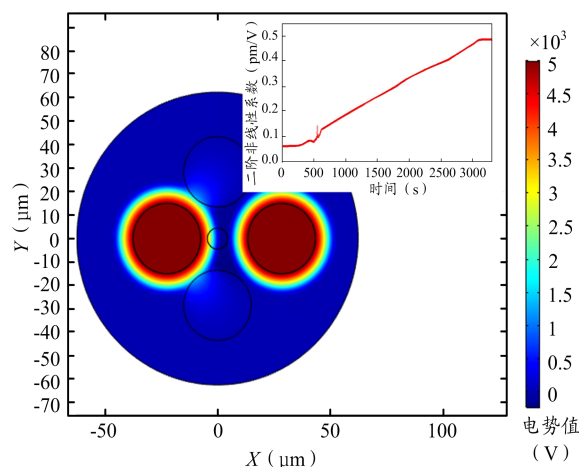
当热极化时间为 3200 s 时,四孔光纤横截面 Na^+ 浓度分布、 H_3O^+ 浓度分布和电势分布如图 2 所示。图 2(a)中, Na^+ 已越过纤芯中心(深蓝色区域 Na^+ 浓度为 0);图 2(b)中, H_3O^+ 迁移进入纤芯的一部分,中和了由 Na^+ 迁移留下的带负电的空穴区。此时,耗尽层覆盖至纤芯中心,其内建电场达到最大值,相应的二阶非线性系数也达到最大值。当光纤未热极化时,其三阶非线性系数 $\chi^{(3)} = 2.0 \times 10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ^[17],结合 $\chi_{\text{eff}}^{(2)} = 3\chi^{(3)} \cdot E_{\text{rec}}$,计算得



(a) Na^+ 浓度分布



(b) H_3O^+ 浓度分布



(c) 电势分布

图2 当 $t=3200\text{ s}$ 时, 四孔光纤横截面 Na^+ 浓度分布、 H_3O^+ 浓度分布和电势分布

到热极化四孔光纤纤芯中心的二阶非线性系数 $\chi_{\text{eff}}^{(2)}$ 最大值为 0.45 pm/V (图 2(c)中插图为纤芯中心二阶非线性系数随时间的变化)。计算可得,纤芯整体上的二阶非线性系数均值为 0.19 pm/V 。

2 实验测量与分析

2.1 热极化

本文根据数值仿真模型制备四孔光纤,计算分析热极化过程中光纤内部离子的迁移以及纤芯中心二阶非线性系数的变化,并通过显微镜观察其横截面,如图 3 所示。计算模型是基于文献[18]所提出的二维电荷动力学模型。该计算模型中,主要考虑最初均匀分布在光纤中的钠离子以及从电极注入的 H_3O^+ 。相对于双孔光纤,四孔光纤所增添的 2 个孔将使热极化过程中往纤芯方向迁移的离子更加集中,从而导致其产生的二阶非线性系数更大。

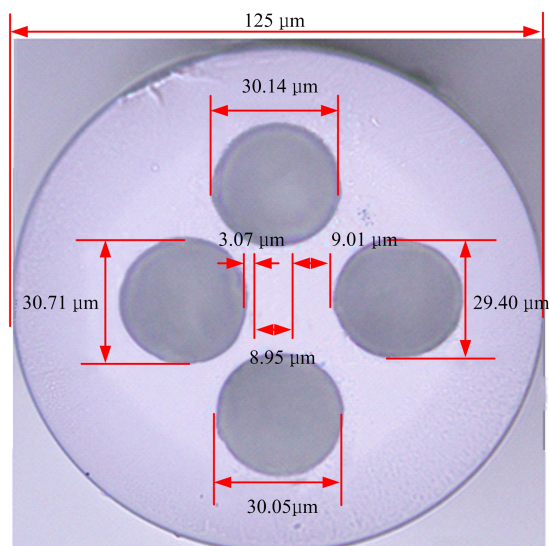


图3 光纤样品横截面

首先,用针管将液态镓铟合金注入长度为 20 cm 的四孔光纤样品孔中,并将钨丝插入其中,插入长度约 1 cm ,以确保钨丝与液态镓铟合金连接。然后,用磷酸二氢铝密封光纤样品两端。随后,将四孔光纤样品套上直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的金属套管,并放置在加热台的陶瓷面板上,以防止金属套管与钨丝短路,同时保持良好的热接触,如图 4 所示。将金属套管与直流高压电源的负极相连,而钨丝与直流高压电源的正极相连。在直流高压电源电压为 5 kV 和陶瓷面板温度为 285°C 的条件下,加热四孔光纤样品 50 min 后,再将温度降低至室温,并关闭直流电压源,完成四孔光纤的热极化。

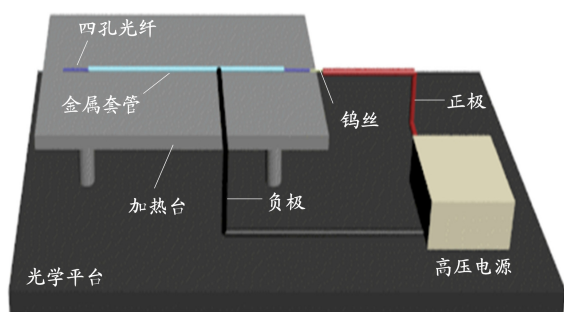


图4 四孔光纤热极化装置示意图

2.2 二阶非线性系数测量原理

任一偏振光可分解为2个正交线偏振光的叠加,这2个正交线偏振光的相位差与叠加后的偏振光的方位角和椭圆率满足如下关系式:

$$\tan^2(2\theta) = \frac{\sin^2(2\chi) \cdot \cos^2\varphi}{\sin^2\varphi - \sin^2(2\chi)} \quad (3)$$

其中, θ 和 χ 分别表示偏振光的方位角和椭圆率, φ 表示相位差。

而相位差与电光系数满足如下关系式^[19]:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma E l \quad (4)$$

其中, l 表示被测光纤样品的长度, n_0 表示初始折射率, γ 表示电光系数, E 表示样品外加电场的电场强度, λ 表示系统入射光波长。

若忽略色散效应^[20],二阶非线性系数 $\chi^{(2)}$ 与电光系数的关系为:

$$\chi^{(2)} \approx \frac{n_0^4}{2} \gamma \quad (5)$$

2.3 光偏振态传输特性测量装置

实验所搭建的光纤样品电场作用下光偏振态传输特性测量系统原理如图5所示。

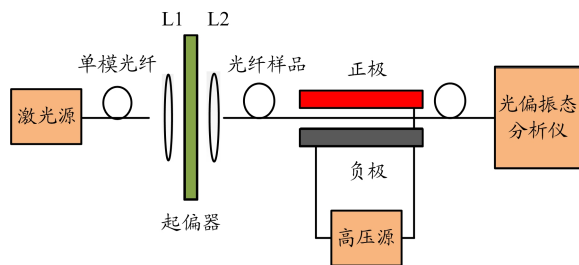


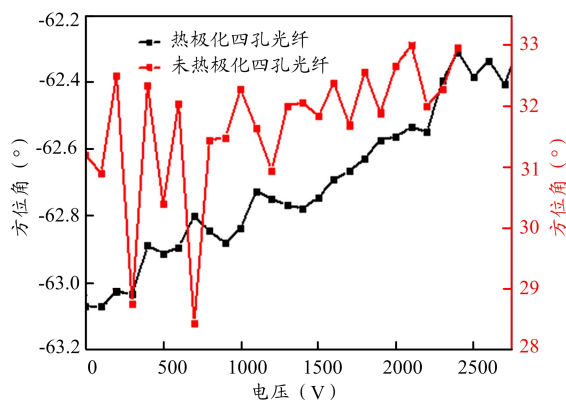
图5 光纤样品电场作用下光偏振态传输特性测量系统原理图

首先,波长为1550 nm的激光通过空间耦合的方式经过物镜L1形成平行光,再经起偏器后变成线偏振光。然后,由物镜L2聚焦注入被测光纤样品。该光纤样品放置于2块长方体电极板之间(两电极板的间

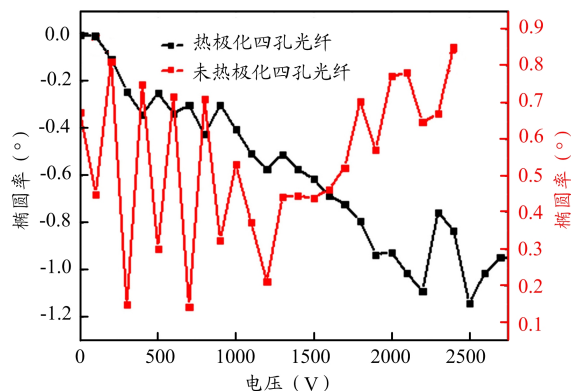
距为1 mm,长度为10 cm,宽度为1 cm),电极板连接直流电压源。最后,将该光纤样品一端先插入光纤活动连接器,再将其直接插入光偏振态分析仪(PAX1000IR2/M, THORLABS)的输入端口。由此,测量分析光纤样品中偏振光在电场作用下的偏振态传输特性,其方位角和椭圆率的检测精度为 $\pm 0.25^\circ$ 。

2.4 测量结果与分析

本文利用图5的测量系统,分别测量同等长度(20 cm)热极化四孔光纤样品和未热极化四孔光纤样品(该样品孔中注有液态镓铟合金)中偏振光在电场作用下的偏振态传输特性。将样品接入测量系统中,在0~2800 V范围内调节直流电压,每间隔100 V记录样品中偏振光的方位角和椭圆率。图6(a)中,热极化四孔光纤样品中偏振光的方位角(黑线)随直流电压的升高呈上升趋势,从 -63.08° 上升至 -62.42° 。而未热极化的四孔光纤样品中偏振光的方位角(红线)变化无规律;图6(b)中,热极化四孔光纤样品中偏振光的椭圆率(黑线)随直流电压的升高呈下降趋势,从 0° 下降至 -1.1° ;而未热极化的四孔光纤样品中偏振光的



(a) 偏振光方位角



(b) 偏振光椭圆率

图6 在0~2800 V范围,

热极化四孔光纤偏振光方位角和椭圆率随电压的变化

椭圆率(红线)变化也无规律。此外,2400 V 后的数据不规律主要原因是由于直流电压过高,使热极化四孔光纤样品放电所导致的。由此可见,在一定的电场强度作用下,热极化四孔光纤中偏振光的方位角和椭圆率与电场强度呈线性关系。

根据热极化四孔光纤中偏振光的方位角和椭圆率,通过式(3)~式(5),可计算出其二阶非线性系数为 0.17 pm/V。比较热极化四孔光纤纤芯二阶非线性系数的数值仿真均值与实验结果,其相对误差为 10.5%。误差产生原因主要是:①实验样品中孔径、芯径、孔与孔间距、孔与纤芯间距与仿真模型中的参数存在微小差异。另外,实验样品中 4 个孔并不是理想圆形且其大小存在微小差异,这些因素均对四孔光纤热极化过程中离子的迁移产生影响。②数值仿真模型中四孔光纤外表面电势为零,而在热极化实验中,四孔光纤套上的金属管电势为零,两者所产生的电势分布存在一定的偏差。由此表明,实验结果与数值仿真结果会存在一定的偏差。

3 结束语

本文基于载流子(Na^+ 、 H_3O^+)模型,利用有限元法,通过 Comsol 计算软件平台,分析了四孔光纤热极化过程,得到了其二阶非线性系数均值为 0.19 pm/V。实验制备出了热极化四孔光纤样品,并测量了其电场作用下的偏振光传输特性,偏振光的椭圆率和方位角随电场强度呈近似线性变化关系。据此,由实验测得的偏振光的椭圆率和方位角,计算得到了所制备的热极化四孔光纤样品的二阶非线性系数为 0.17 pm/V,与数值仿真分析结果基本一致。研究结果表明,热极化光纤在全光纤高电压传感领域将具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] MYERS R A, MUKHERJEE N, BRUECK S R J. Large second-order nonlinearity in poled fused silica [J]. Optics Letters, 1991, 16 (22): 1732-1734.
- [2] CANAGASABEY A, CORBARI C, GLADYSHEV A V, et al. High-average-power second-harmonic generation from periodically poled silica fibers[J]. Optics Letters, 2009, 34(16): 2483-2485.
- [3] MALMSTRÖM M, TARASENKO O, MARGULIS W. Pulse selection at 1 MHz with electrooptic fiber switch [J]. Optics Express, 2012, 20(9): 9465-9470.
- [4] ZHU E Y, TANG Z, QIAN L, et al. Poled-fiber source of broadband polarization-entangled photon pairs [J]. Optics Letters, 2013, 38 (21): 4397-

4400.

- [5] LIU A C, DIGONNET M J F, KINO G S, et al. Improved nonlinear coefficient (0.7 pm/V) in silica thermally poled at high voltage and temperature[J]. Electronics Letters, 2000, 36(6): 555-556.
- [6] FACCIO D, PRUNERI V, KAZANSKY P G. Dynamics of the second-order nonlinearity in thermally poled silica glass [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(17): 2687-2689.
- [7] MARGULIS W, TARASENKO O, MYRÉN N. Who needs a cathode? Creating a second-order nonlinearity by charging glass fiber with two anodes[J]. Optics Express, 2009, 17(18): 15534-15540.
- [8] ALEXANDRE C, OLEKSANDR T, WALTER M. Study of thermally poled fibers with a two-dimensional model [J]. Optics Express, 2014, 22 (15): 17700-17715.
- [9] DE L F, HUANG D, CORBARI C, et al. Optical fiber poling by induction[J]. Optics Letters, 2014, 39(22): 6513-6516.
- [10] LUCIA F D, HUANG D, CORBARI C, et al. Optical fiber poling by induction: analysis by 2D numerical modeling [J]. Optics Letters, 2016, 41 (8): 1700-1703.
- [11] ALLEY T G, BRUECK S R J, MYERS R A. Space charge dynamics in thermally poled fused silica [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1998, 242(2-3): 165-176.
- [12] QUIQUEMPOIS Y, KUDLINSKI A, MARTINELLI G. Zero-potential condition in thermally poled silica samples: evidence of a negative electric field outside the depletion layer[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(22): 598-604.
- [13] HUANG L, AN H, REN G, et al. Simulating the space-charge field formation in thermally poled optical fibers: a new two-rate model for hydro-generated cations[J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 819-822.
- [14] AN H, FLEMING S, COX G. Visualization of second-order nonlinear layer in thermally poled fused silica glass[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(24): 5819-5821.
- [15] GARCIA F C, CARVALHO I C S, HERING E, et al. Inducing a large second-order optical nonlinearity in soft glasses by poling [J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(25): 3252-3254.
- [16] AN H, FLEMING S. Hindering effect of the core-cladding interface on the progression of the second-order nonlinearity layer in thermally poled optical fibers [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87 (10): 101108-1 - 101108-3.
- [17] KUDLINSKI A, MARTINELLI G, QUIQUEMPOIS Y. Time evolution of second-order nonlinear profiles induced within thermally poled silica samples[J]. Optics Letters, 2005, 30(9): 1039-1041.
- [18] KUDLINSKI A, QUIQUEMPOIS Y, MARTINELLI G. Modeling of the $\chi^{(2)}$ susceptibility time-evolution in thermally poled fused silica[J]. Optics Express, 2005, 13(20): 8015-8024.
- [19] 李贤子. 基于偏振态检测的光纤电压传感器[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [20] LIU A C, DIGONNET M J, KINO G S. Electro-optic phase modulation in a silica channel waveguide [J]. Optics Letters, 1994, 19 (7): 466-468.