

低重复频率飞秒激光在石英玻璃内写入的 II 类波导的偏振依赖导光性研究

李冬娟^{1,2} 林 灵^{1,3} 吕百达³ 程光华¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

² 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 四川大学激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064

摘要 研究了低重复频率飞秒激光在石英玻璃内部诱导的自组织纳米条纹与激光参数和扫描参数的关系, 发现激光扫描轨迹横截面纳米光栅的填充因子随扫描参数而变化。在一定的写入窗口, 纳米光栅具有偏振依赖导光特性, 属于 II 类波导; 实验研究了六边形结构 II 类波导的导光特性, 与重复频率为 100 kHz 的飞秒激光光刻波导规律具有相似性; 理论上构建了 II 类波导和六边形结构横截面折射率轮廓的理想模型, 利用有限元方法分析了 II 类波导及六边形结构的模式, 并从实验上和理论上说明了 II 类波导的偏振依赖导光性不是由于纳米光栅的形序双折射, 而是由于纳米光栅的偏振依赖散射。

关键词 激光光学; 飞秒激光; 波导; 纳米光栅; 偏振

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0532001

Polarization-Dependent Optical Guiding in Low Repetition Frequency Femtosecond Laser Photowritten Type II Fused Silica Waveguides

Li Dongjuan^{1,2} Lin Ling^{1,3} Lü Baida³ Cheng Guanghua¹

¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institution of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract The dependences of self-assembled nanograting in fused silica on low repetition frequency femtosecond laser parameters and scanning parameters are investigated. The results show that the filling factor of nanograting for scanning path cross section depends on the writing parameters. The type II waveguide in fused silica can be written under some writing condition and shows polarization-dependent guiding properties. Similar polarization-dependent guiding properties with 100 kHz situation is proved in experiment by hexagonal structures assembled from type II traces. Ideal models of the cross-sectional refractive index profiles of type II waveguides and the hexagonal structures are constructed. Corresponding modes are simulated using the finite element analysis method. It is found that the polarization-dependent optical guiding properties of type II waveguides are due to polarization-dependent scattering of nanograting rather than form birefringence in theory and experiment.

Key words laser optics; femtosecond laser; waveguide; nanograting; polarization

OCIS codes 320.7090; 230.7370; 220.4241

1 引 言

飞秒激光脉冲聚焦到透明材料内部, 由于非线性

吸收, 能够在焦点处产生光学损伤。通常将飞秒激光在石英玻璃中的损伤分为三类: 低的辐射水平

收稿日期: 2012-11-20; 收到修改稿日期: 2013-01-09

基金项目: 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划(0283457671)资助课题。

作者简介: 李冬娟(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光刻波导方面的研究。E-mail: lidongjuan@opt.cn

导师简介: 程光华(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光刻波导和激光微加工等方面的研究。

E-mail: gcheng@opt.ac.cn

一般产生各向同性的波导,损耗低于 0.4 dB/cm,折射率变化为 10^{-4} ^[1,2];较高的能量产生强散射结构,横截面存在纳米光栅,具有双折射特性;更高的能量诱导微爆,产生空腔^[3,4]。近年来,飞秒激光诱导折射率变化由于可提供一种灵活的三维光子器件制作方法而得到国内外科研人员的广泛关注;1996年,Davis等^[5]报道了石英玻璃内的飞秒光刻波导;2002年,Cerullo等^[6]利用像散飞秒激光,制作了波长为 1.5 μm 的单模波导,说明了飞秒光刻波导技术在光通信领域的巨大应用潜力;2008年,Marshall等^[7]制作了波导激光器。国内的相关研究也有很多,例如:上海大学研制了全单模光纤法布里-珀罗干涉温度传感器^[8],武汉理工大学研制了马赫-曾德尔干涉氢气传感器^[9],天津大学制作了单偏振微结构波导^[10]。另外,具有广泛的应用前景的色心,也可利用飞秒激光在 KCl 晶体中诱导产生^[11],相应的理论研究也已展开^[12]。

一般认为飞秒激光光刻的双折射结构不能导光,但 2009年 Cheng等^[13]发现具有双折射的结构也能导光,而且具有偏振导光特性。根据不同特性,将低的辐射水平损伤形成的各向同性波导称为 I 类波导,具有偏振敏感的波导结构称为 II 类波导。基于 I 类波导特性可制作波导分束器、波分复用器和耦合器等各种方向性耦合器件,也可制作各种天文光子学器件^[14];II 类波导能够制作波导偏振片、偏振敏感的路由器等器件^[13,15,16]。然而这些研究工作都是集中在 100 kHz 高重复频率飞秒激光下实现的。低重复频率飞秒激光由于输出单脉冲能量大,热累积效应小,在与物质相互作用的过程中,与高重复频率的飞秒激光有较大的差异。因此对用低重复频率飞秒激光制作的 I 类波导及相关器件的研究较少。纳米光栅研究方面,Liang等^[17~19]认为 1 kHz 不能在石英内部产生纳米光栅,只能在玻璃表面产生周期性条纹。

本文扩展了 Liang等^[17~19]的写入条件,详细研究了不同功率、不同扫描速度和不同聚焦物镜下 1 kHz 飞秒激光在石英玻璃产生的损伤痕迹、纳米条纹和导光特性,发现在低数值孔径的物镜聚焦下,纳米光栅的填充因子与 100 kHz 情况下相类似,部分写入条件下的痕迹也能形成导光结构,具有偏振导光特性,属于 II 类波导。研究了六边形结构的偏振依赖导光特性,发现与 100 kHz 情况下也相似。构建了 II 类波导和六边形结构的横截面折射率轮廓,使用有限元方法计算了它们的模式。从理论上

和实验上分析了 II 类波导的偏振依赖导光机理。

2 实验描述

实验中光刻采用的光源是再生放大钛蓝宝石锁模激光系统产生的中心波长为 800 nm 的光脉冲,脉宽为 120 fs,重复频率为 1 kHz。抛光的石英玻璃样品(Corning, 5 mm \times 15 mm \times 30 mm)装在 XYZ 位移平台上,位移平台能够沿着平行于或者垂直于激光束传播方向平移。使用长工作距离显微镜(Mitutoyo)物镜(5 \times ,工作距离为 34 mm,数值孔径为 0.14;10 \times ,工作距离为 33.5 mm,数值孔径为 0.28;20 \times ,工作距离为 20 mm,数值孔径为 0.42)把激光束聚焦到样品中。为了使制作的光波导具有圆对称性,采用纵向写入方式,即样品平移方向平行于激光束方向。一个正的相位对比显微镜(PCM)被用来从侧面使整个作用区域成像,使用 CCD 相机拍摄照片,PCM 照片中,黑色代表正的折射率改变,白色代表负的折射率改变或者散射中心。靠耦合非相干非偏振白光源(WL)和 800 nm 的偏振激光来获取透射显微照片和波导的近场模。写入波导后,使用石英粉末对样品进行抛光,用氢氟酸(HF)对样品进行蚀刻,然后在表面镀上一层导电金膜,最后在扫描电子显微镜(SEM)下成像。

3 实验结果

飞秒激光光刻的波导类型不仅依赖于脉冲宽度和功率,还依赖于扫描速度。固定激光功率(10 mW)和脉宽(120 fs),在不同的扫描速度下得到了不同的 II 类轨迹。随后使用 SEM 进一步检查轨迹的横截面,发现横截面上纳米光栅的覆盖区域随着扫描速度的变化而变化。在低速或者中速下,横截面中心是准圆形的均匀芯层,外围是垂直于写入激光偏振方向的纳米光栅。纳米光栅是由较低折射率的各向同性窄层和较高折射率各向同性宽层交替组成的,周期为 $\lambda/2n$ (λ 为写入激光的波长, n 为石英玻璃的折射率),各层垂直于写入激光电场方向;纳米光栅的平均折射率低于石英玻璃基质的折射率,纳米光栅表现出形序双折射^[20]特性,类似于负单轴晶体,光轴垂直于纳米层^[3,4,13]。图 1 是水平偏振激光写入的 II 类波导的偏振依赖导光特性,结构由激光功率为 10 mW,重复频率为 1 kHz 激光脉冲在扫描速度为 80 $\mu\text{m}/\text{s}$ 下写入,波导长度为 7.3 mm。图 1(a)为 II 类波导的 PCM 照片;图 1(b)和(c)是耦合 800 nm 光

后得到的近场模,图 1(b)对应垂直偏振耦合,图 1(c)对应水平偏振耦合,图 1(d)为波导截面的 SEM 照片。写入和耦合所用的物镜数值孔径都为 0.28。对照图 1(a)中的信息,这代表中间是高折射率的芯层,周围是双折射结构的包层。与更高速度下写入的 II 类结构比起来,这种结构更能有效地导

光,只要耦合光偏振方向与纳米光栅平行即可[如图 1(b),(c)所示]。为了和以前的定义保持一致,把这种波导叫做 II 类波导(Type II-WG),以区别于截面全是纳米光栅并且不能导光的 II 类纳米光栅轨迹(Type II-NG)^[15]。

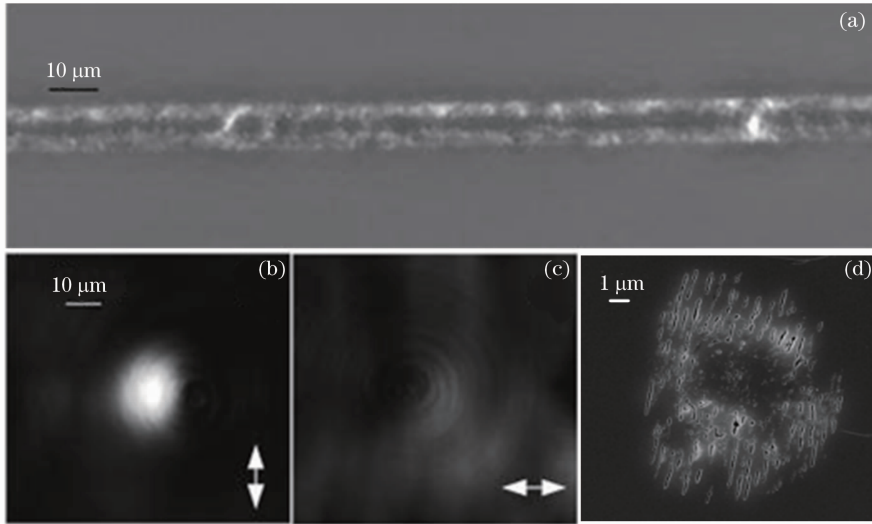


图 1 水平偏振写入的 II 类波导的偏振依赖导光特性

Fig. 1 Polarization-dependent optical guiding of type II-WG written by horizontal polarization

为了讨论偏振依赖光导与纳米光栅的关系,又制作了在不同速度下写入的由 6 根 II 类轨迹组成的六边形结构,如图 2 所示。所有的结构由激光功率为 5 mW,水平偏振,重复频率为 1 kHz 激光脉冲

写入。左边的箭头表示耦合光的偏振方向,波导长度为 7.3 mm,相邻两根轨迹之间距离为 25 μm。不同扫描速度下写入的所有轨迹均为 II 类纳米光栅轨迹。这种六边形结构支持特定偏振方向的光导

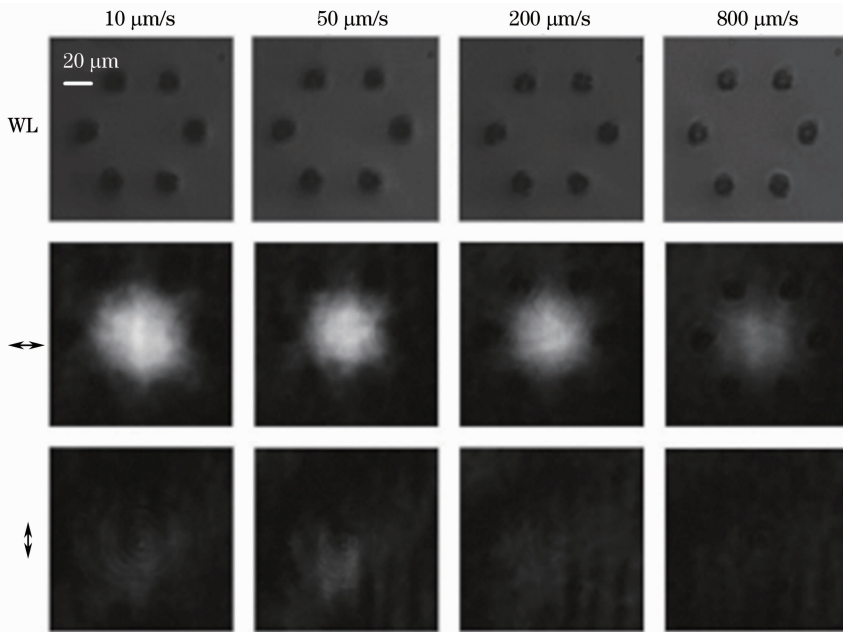


图 2 通过数值孔径为 0.28 物镜耦合 800 nm 光后得到的六边形结构的偏振依赖近场模

Fig. 2 Polarization-dependent near-field modes of the hexagonal waveguide centrally injected with 800 nm light via an object mirror with numerical aperture of 0.28

通。从图 2 中可以看出,当耦合光偏振方向垂直于纳米光栅平面时,六边形结构能够导光,这与 II 类波导的情况是相反的。当耦合水平偏振光时,导通的光被限制在阵列中心。随着扫描速度的增加,导通越来越弱。

为了进一步理解低重复率飞秒激光在石英玻璃内部写入的 II 类波导的特征,用扫描电子显微镜检测了高数值孔径下不同功率、不同写入速度的波导截面,如图 3 所示。功率为 2 mW,聚焦物镜的数值

孔径为 0.42,写入速度分别为 10、20、40、80、160、320 $\mu\text{m/s}$ 。从 6 幅图可以看出,随着写入速度的增加,波导的横截面越来越小;纳米条纹的分布与高重复频率(100 kHz)的结果有明显的不同:对高重复频率激光,写入速度越低,纳米条纹覆盖范围越小;而对低重复频率激光写入的结构,太低和太高的写入速度的纳米条纹覆盖率都很高,只有中间写入速度的纳米条纹覆盖率比较低,也只有这个区域写入的波导能导光,而且具备偏振导光的特性。

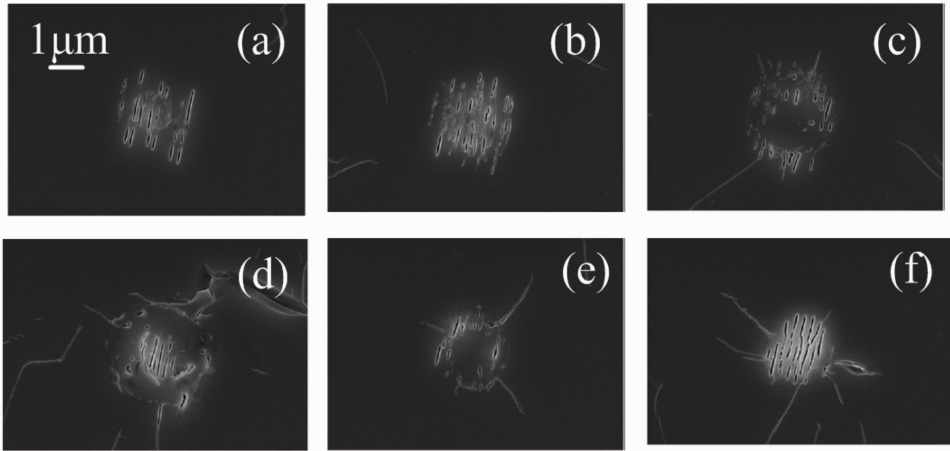


图 3 功率为 2 mW 水平偏振激光在石英玻璃内部以不同写入速度写入的 II 类波导的横截面。(a) 10 $\mu\text{m/s}$;
(b) 20 $\mu\text{m/s}$; (c) 40 $\mu\text{m/s}$; (d) 80 $\mu\text{m/s}$; (e) 160 $\mu\text{m/s}$; (f) 320 $\mu\text{m/s}$

Fig. 3 Cross section of type II-WG in silica by horizontal polarization at 2 mW with different scanning speeds.

(a) 10 $\mu\text{m/s}$; (b) 20 $\mu\text{m/s}$; (c) 40 $\mu\text{m/s}$; (d) 80 $\mu\text{m/s}$; (e) 160 $\mu\text{m/s}$; (f) 320 $\mu\text{m/s}$

纳米条纹的形成机理与激光电场、等离子体和热效应有关。一个简单的实验可以证实热效应可以导致 II 类波导芯的融化:在功率和脉冲宽度不变的情况下,高扫描速度写入 II 类波导,此时纳米条纹覆盖整个波导截面;继续在相同的位置多次扫描,发现波导的中心在相衬显微镜下变黑,纳米条纹在波导截面的覆盖率也下降。第一次扫描留下来的纳米条纹被后续的激光扫描擦除融化再凝固并形成均匀的折射率增加的区域。在低重复频率激光写入过程中,由于能量大,电场与等离子体的效应更强,更容易产生纳米条纹,而与高重复频率激光相比,热效应明显小很多,难以擦除纳米条纹,因此纳米条纹的覆盖率较高。

4 偏振导光机理的分析与讨论

为了理解 II 类波导和六边形结构的偏振导光特性,分析了 II 类波导和六边形结构的模式以及纳米光栅产生的双折射效应;从理论上和实验上重点讨论了 II 类波导的偏振导光机理。

4.1 模式分析

Eickhoff^[21]制作了一个光纤偏振器,利用了平行于金属表面(准 TE_0 模)和垂直于金属表面(TM_0 模)的两种模式的衰减差别。Bergh 等^[22]采用移除部分包层并且用双折射晶体替代移除部分的方法也制作了一个光纤偏振器。而文献^[23]中报道的制作光纤偏振器的方法是基于 45° 倾斜光纤布拉格光栅的偏振依赖损耗。考虑到 II 类波导与光纤偏振器的类似性,下面基于形序双折射来分析波导的模式。

基于参考文献^[3, 4, 13]中的数据和本文的 SEM 分析(如图 1 所示),构建如图 4 (a)所示的波导截面的理想模型。小圆内是正的折射率改变,纳米光栅位于小圆和大圆之间,大圆外是未受影响的石英玻璃基质。根据参考文献中得到的数据,模型中使用如下数据:在 800 nm 处外包层折射率为 1.45(石英玻璃折射率),芯层与外包层间折射率差为 0.1%,纳米光栅区域窄层折射率为 1.1,宽层折射率为 1.45,小圆半径为 3 μm ,大圆半径为 5 μm ,窄层宽度为 10 nm,宽层宽度为 240 nm。使用有限元方法来计算 II 类波导的模式。图 4(b)显示了 x

偏振基模的能流轮廓(坡印廷矢量的 z 分量),而图 4(c)显示了 y 偏振基模的能流轮廓。在图 4(b), (c)中的箭头代表横向电场方向,箭头长度正比于电场振幅。可见,II 类波导结构能够限制两种偏振方向的光。 x 偏振模式和 y 偏振模式的有效折射率分别为 $n_{\text{eff},x}=1.449034$ 和 $n_{\text{eff},y}=1.448834$,模式双折射为 $\Delta n_{\text{eff}}=n_{\text{eff},x}-n_{\text{eff},y}=0.0002$ 。模式双折射是由 II 类波导折射率分布非圆对称性引起的。然而,如果纳米光栅的周期足够小于光波长,纳米光栅表现出形序双折射特性。因此,如果把纳米光栅看作等

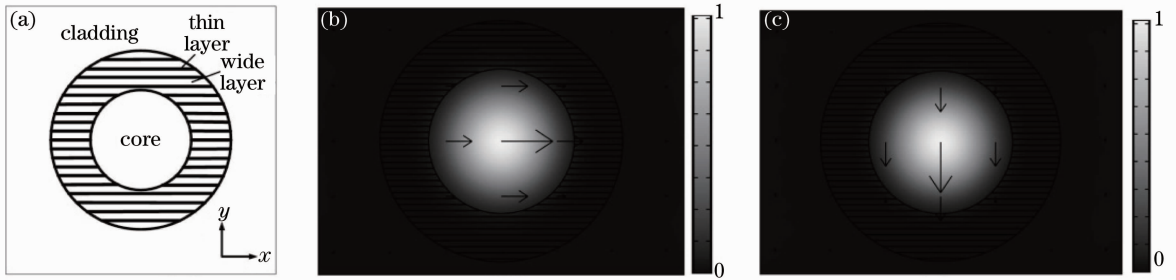


图 4 (a) II 类波导截面折射率轮廓理想模型; (b)和(c) 分别代表 x 和 y 偏振模式的时间平均能流密度的 z 分量
Fig. 4 (a) Ideal model of the cross-sectional refractive index profile of type II-WG; (b) and (c) are the z component of time average power flow profile for the x and y -polarized mode, respectively

寻常波电矢量垂直于光轴,而非寻常波电矢量平行于光轴,因此 $n_e=n_{\perp}$, $n_o=n_{\parallel}$ 。把上面的参数代入(1)式和(2)式中,得到 $n_e=1.429071$, $n_o=1.437637$,双折射 $\Delta n=n_e-n_o=0.008566$ 。如果纳米光栅被等效的负单轴晶体替代,图 4(a)中的坐标系应为主轴坐标系并且 y 轴为光轴。在主轴坐标系中,晶体的相对介电张量为

$$\boldsymbol{\epsilon}_r = \begin{bmatrix} n_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_o^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_e^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.066800 & 0 & 0 \\ 0 & 2.042245 & 0 \\ 0 & 0 & 2.66800 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在有限元模拟中,当图 4(a)中的纳米光栅区域被具有(3)式中相对介电张量的晶体所替代,计算出的 x 偏振模式和 y 偏振模式与图 4 中的模式基本一样。 x 偏振模式和 y 偏振模式的有效折射率分别为 $n_{\text{eff},x}=1.449028$ 和 $n_{\text{eff},y}=1.448820$,模式双折射为 $\Delta n_{\text{eff}}=n_{\text{eff},x}-n_{\text{eff},y}=0.000208$ 。可以看出这与前面得到的结果是一致的。不考虑应力和散射等其他因素,上面的分析表明 x 偏振模式和 y 偏振模式均存在。

类似地,如图 5(a)所示构建六边形结构的横截面理想模型。小圆为 II 类纳米光栅轨迹,小圆内被纳米

效的晶体,模式双折射也可看作是由波导材料的各向异性引起的。设 t_1 和 t_2 分别为窄层和宽层的厚度,而 n_1 和 n_2 分别为窄层和宽层的折射率。电场矢量垂直于纳米层的单色平面波的有效折射率为^[20]

$$n_{\perp} = n_1 \left[\frac{n_1^2 n_2^2}{f n_2^2 + (1-f) n_1^2} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 $f=t_1/(t_1+t_2)$ 为窄层宽度与周期的比值。电场矢量平行于纳米层的单色平面波的有效折射率为

$$n_{\parallel} = [f n_1^2 + (1-f) n_2^2]^{1/2}. \quad (2)$$

光栅完全覆盖。外部环境为未受影响的石英玻璃基质。模型中使用以下参数:两邻近小圆圆心之间距离为 $25 \mu\text{m}$,小圆半径为 $5 \mu\text{m}$,其他参数与图 4(a)中一样。使用有限元方法计算出六边形结构的基模,结果如图 5(b),(c)所示。从图中可以看出,两种偏振的光都被限制在六边形结构的中心,模式形状呈六边形。有效折射率分别为 $n_{\text{eff},x}=1.449943$ 和 $n_{\text{eff},y}=1.449941$,模式双折射为 2×10^{-6} 。当图 5(a)中的纳米光栅被具有(3)式中相对介电张量的晶体所替代后,计算出的 x 偏振模式和 y 偏振模式与图 5 中的一样。计算出的有效折射率分别为 $n_{\text{eff},x}=1.449943$ 和 $n_{\text{eff},y}=1.449941$ 。

从上述模拟可以看出,对于 II 类波导,中心折射率比石英玻璃基质折射率高,纳米光栅区域折射率比石英玻璃折射率低,中心区域形成波导芯,这是 II 类波导能导光的原因,II 类波导具有两种正交偏振方向的模式,纳米光栅的形序双折射导致了 II 类波导的模式双折射,但并不会引起偏振导光。对于六边形结构,6 根 II 类轨迹的折射率低于石英玻璃基质的折射率,六边形结构的中心区域形成波导芯,这是六边形结构能够导光的原因,同样六边形结构也具有两种正交偏振方向的模式,纳米光栅的形序双折射导致了六边形结构的模式双折射。

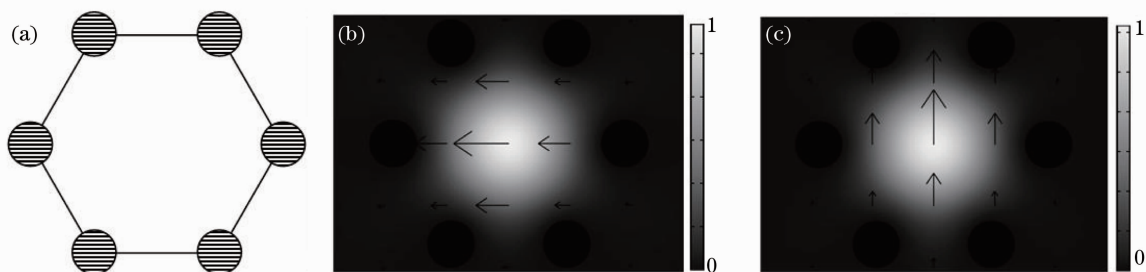


图 5 (a)六边形结构横截面折射率轮廓理想模型；(b)和(c)分别代表 x 和 y 偏振模式的时间平均能流密度的 z 分量
Fig. 5 (a) Ideal model of the cross-sectional refractive index profile of the hexagonal assembly traces; (b) and (c) are the z component of time average power flow profile for the x and y -polarized mode, respectively

4.2 偏振导光机理

有限元模拟结果显示,II类波导和六边形结构都能限制光并且两个偏振方向的模式都存在,但是实验结果表明只有一种偏振能够导通。实际上,飞秒激光在石英玻璃内部诱导的纳米条纹的周期约为

$\lambda/2n$,对 800 nm 写入激光,纳米条纹的周期在 250 nm附近,根据布拉格衍射条件,玻璃内部的波长为 λ/n ,玻璃内部的布拉格衍射角恰为 90° 。对布拉格衍射的偏振特性,可以借鉴光折变光栅的偏振衍射特性,衍射效率 η 可以表示为^[24,25]

$$\eta = \frac{g^2 z^2}{4} \left\{ 1 + \frac{\sin^2(\rho z)}{\rho^2 z^2} + \frac{2 \sin(\rho z)}{\rho z} [\xi_1^0 \sin(\rho z) - \xi_3^0 \cos(\rho z)] \right\}, \quad (4)$$

式中 g 为耦合常数, ρ 为旋转指数, z 为传输距离, ξ 为斯托克斯参数,如果入射光为线偏振光,

$$\xi_1^0 \sin(\rho z) - \xi_3^0 \cos(\rho z) = -\cos(\rho z - 2\varphi_0), \quad (5)$$

当光栅很薄时, $\rho z \ll 1, gz \ll 1$,衍射效率可以简写为

$$\eta = \frac{g^2 z^2}{2} [1 - \cos(\rho z - \varphi_0)], \quad (6)$$

综合(4)~(6)式可得,相位 $\varphi_0 = 0$ 时,衍射效率为 0;而相位为 $\pi/2$ 时,衍射为最大值,效率接近 1,这正好能解释 II 类波导的偏振导光特性。为了进一步验证该机理,耦合 800 nm 激光进入波导,观察波导的侧面散射。

对于 I 类波导,看不到明显的散射;对于 II 类波导,观察到明显的偏振依赖的散射现象,如图 6 所示(箭头指耦合光的偏振方向),在耦合透镜前面插入二分之一波片,改变耦合注入光的偏振方向,发现散射方向也随之旋转,散射方向和耦合光偏振方向总是保持正交,与 II 类波导对三次谐波的散射现象相似^[4]。当垂直偏振光耦合到垂直偏振写入的 II 类波导中,散射主要发生在水平方向。当耦合光为水平偏振时,散射主要发生在垂直方向。根据前面的模式分析可以看出,这种偏振相关的散射不是来自于模式泄露,而是来自于纳米条纹对波导内传输光的散射造成的。

对于六边形结构,情况较为复杂,这里只做简单的定性讨论。它不同于一般的波导,可以把它看作

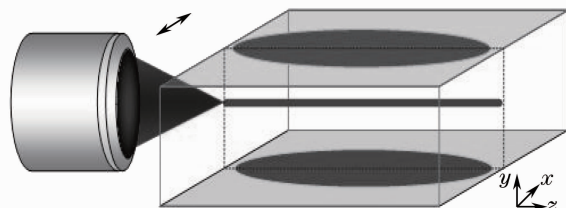


图 6 垂直偏振写入的 II 类波导的散射方向示意图
Fig. 6 Scattering pattern of type II-WG traces written with vertical polarization

由 6 根 II 类迹构成的反射式波导。4.1 中讨论过,由于形序双折射,偏振方向垂直于纳米光栅的光的有效折射率比偏振方向平行于纳米光栅的光的有效折射率大,当光在六边形结构中传播时,偏振方向垂直于纳米光栅的光的反射率更大,传播损耗更小,更能被限制在六边形结构中,因此导通的是偏振方向垂直于纳米光栅的光。

5 结 论

低重复频率飞秒激光在石英玻璃内部同样能够诱导周期性纳米光栅,在一定的写入功率和扫描速度下,能够形成偏振敏感的 II 类波导;由 II 类纳米光栅迹组成的六边形结构也具有偏振导光特征。理论分析显示 II 类波导的偏振导光性不是由于纳米光栅的形序双折射,而是由于纳米光栅的偏振依

赖散射。这种偏振敏感的散射特征对设计偏振波导器件有重要意义。

参 考 文 献

- 1 N. T. Nguyen, A. Salimnia, S. L. Chin *et al.*. Control of femtosecond laser written waveguides in silica glass[C]. *SPIE*, 2004, **5578**: 665~676
- 2 G. D. Valle, R. Osellame, P. Laporta. Micromachining of photonic devices by femtosecond laser pulses[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(1): 013001
- 3 R. Taylor, C. Hnatovsky, E. Simova. Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass[J]. *Laser and Photon. Rev.*, 2008, **2**(1-2): 26~46
- 4 P. G. Kazansky, Y. Shimotsuma. Self-assembled sub-wavelength structures and form birefringence created by femtosecond laser writing in glass; properties and applications [J]. *J. Ceram. Soc. Japan*, 2008, **116**(1358): 1052~1062
- 5 K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1729~1731
- 6 G. Cerullo, R. Osellame, S. Taccheo *et al.*. Femtosecond micromachining of symmetric waveguides at 1.5 μm by astigmatic beam focusing [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(21): 1938~1940
- 7 G. D. Marshall, P. Dekker, M. Ams *et al.*. Directly written monolithic waveguide laser incorporating a distributed feedback waveguide-Bragg grating [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 956~958
- 8 Wang Wenyuan, Wen Jianxiang, Pang Fufei *et al.*. All single-mode fiber Fabry-Perot interferometric high temperature sensor fabricated with femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1005001
王文轶, 文建湘, 庞拂飞等. 飞秒激光制备的全单模光纤法布里-珀罗干涉高温传感器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1005001
- 9 Cheng Jie, Yang Minghong, Wang Min *et al.*. Mach-Zehnder interference hydrogen sensor based on femtosecond laser processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0706001
成洁, 杨明红, 王 闵等. 基于飞秒激光加工的马赫-曾德尔干涉氢气传感器[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0706001
- 10 Wang Yuerong, Li Yi, Wang Sijia *et al.*. Directly writing single polarization microstructure waveguide in fused silica by high repetition rate femto-second laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(12): 1203002
汪月容, 李 毅, 王思佳等. 高重复频率飞秒激光烧蚀熔融石英制作单偏振微结构波导[J]. *中国激光*, 2012, **39**(12): 1203002
- 11 Yin Chuanlei, Zhao Quanzhong. Femtosecond laser-induced color centers in KCl crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0902007
尹传磊, 赵全忠. 飞秒激光在 KCl 晶体中诱导色心[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0902007
- 12 Liu Kui, Feng Guoying, Deng Guoliang *et al.*. Difference in microstructures induced by femtosecond laser scanning on silicon surface at different temperatures [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0803003
柳 焜, 冯国英, 邓国亮等. 飞秒激光扫描不同温度下的硅片诱导形成微结构的差别[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0803003
- 13 G. Cheng, K. Mishchik, C. Maclair *et al.*. Ultrafast laser photoinscription of polarization sensitive devices in bulk silica glass [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 9515~9525
- 14 C. Maclair, G. Cheng, N. Huot *et al.*. Dynamic ultrafast laser spatial tailoring for parallel micromachining of photonic devices in transparent materials [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3531~3542
- 15 K. Mishchik, G. Cheng, G. Huo *et al.*. Nanosize structural modifications with polarization functions in ultrafast laser irradiated bulk fused silica [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(24): 24809~24824
- 16 C. Maclair, M. Zamfirescu, J. P. Colombier *et al.*. Control of ultrafast laser-induced bulk nanogratings in fused silica via pulse time envelopes [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(12): 12997~13005
- 17 Feng Liang, Quan Sun, Daniel Gingras *et al.*. The transition from smooth modification to nanograting in fused silica [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(10): 101903
- 18 Feng Liang, Real Vallee, See Leang Chin. Pulse fluence dependent nanograting inscription on the surface of fused silica [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**(25): 251105
- 19 F. Liang, R. Vallée, S. L. Chin. Physical evolution of nanograting inscription on the surface of fused silica [J]. *Opt. Mater. Express*, 2012, **2**(7): 900~906
- 20 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. Beijing: Science Press, 1978
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978
- 21 W. Eickhoff. In-Line Fiber-Optic Polarizer [P]. United States: 6434283, 2002
- 22 R. A. Bergh, H. C. Lefevre, H. J. Shaw. Single-mode fiber-optic polarizer [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(11): 479~481
- 23 Kaiming Zhou, Xianfeng Chen, Alexander Geroge Simpson *et al.*. High extinction ratio in-fiber polarizers based on 45° tilted fiber Bragg gratings [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2005, OME22
- 24 B. I. Sturman, D. J. Webb, R. Kowarschik *et al.*. Exact solution of the Bragg-diffraction problem in sillenites [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(9): 1813~1819
- 25 Israel Rocha-Mendoza, Anatolii V. Khomenko. Polarization or thogonalization of interacting beams in cubic photorefractive crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(4): 770~776

栏目编辑: 王晓球