

文章编号:1004-4213(2011)06-0818-5

飞秒激光光刻波导偏振器

林灵^{1,2}, 杨小君², 白晶², 龙学文², 吕百达¹, Razvan Stoian³, 惠荣庆⁴, 程光华²

(1 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064)

(2 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, 西安 710119)

(3 Laboratoire Hubert Curien, UMR 5516 CNRS, Universit'e de Lyon, Universit'e Jean Monnet, Saint Etienne 42000 France)

(4 Department of Electrical Engineering and Computer Science, The University of Kansas, Lawrence, Kansas 66045, USA)

摘 要:飞秒激光诱导折射率变化提供了一种灵活的三维光子器件制作手段. 飞秒激光光刻的 II 类波导具有偏振导光特性, 可以作为波导偏振器, 但是对于要保留的偏振分量损耗太大. 本文阐述了一种利用飞秒激光在熔融石英中制作的新型低损耗波导偏振器. 它由中间的一根 I 类波导及两侧的两根 II 类纳米光栅轨迹构成. 基于飞秒激光诱导的纳米光栅的偏振依赖散射特性, II 类纳米光栅轨迹能够对 I 类波导的倏逝场进行调制. 偏振方向垂直于纳米光栅的模式相对于偏振方向平行于纳米光栅的模式有更大的散射损耗, 因此导通的是偏振方向平行于纳米光栅的模式. 研究了消光比随 I 类波导与 II 类纳米光栅轨迹之间的间距的变化关系, 选择一个最佳间距来进一步研究消光比随 II 类纳米光栅轨迹长度的变化关系. 在间距 $6\ \mu\text{m}$, II 类纳米光栅轨迹扫描长度 $6\ \text{mm}$ 处实现了最大 $15.91\ \text{dB}$ 的消光比. 通过增加 II 类轨迹的长度或者数量, 很容易得到更高的消光比.

关键词:飞秒激光; 光刻; 波导偏振器

中图分类号: O43

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114006.0818

0 引言

在集成光学系统中, 波导偏振器是一种非常重要的光学器件. 过去报道的波导偏振器有以下几种: 利用金属包层衰减掉两个正交偏振模式中其中一个的波导偏振器^[1-5], 利用双折射材料作为包层或者芯层来使其中一个偏振模式泄漏的波导偏振器^[6-8], 利用光子晶体中不同偏振模式具有不同光子带隙的波导偏振器^[9-10]等. 这些波导偏振器都能实现高的消光比和低损耗, 但是制作工艺比较复杂. 自从飞秒激光脉冲直写光子结构被首次报道^[11]以来, 它就在制作复杂的高密度集成光学器件方面展现了巨大的潜力^[12].

当一束强的飞秒激光脉冲紧聚焦到透明材料中, 由于非线性吸收, 能够在焦点处产生永久的结构和折射率修改. 相对焦点移动样品, 就可以写入三维光子器件. 相对于传统的离子交换、扩散和印刷的方法, 它具有简单和灵活的优势. 在不同条件下, 飞秒激光在熔融石英中能够分别刻写 I 类波导和 II 类波

导. 在低的激光能量水平下, 相对焦点平移样品写入的轨迹是具有各向同性的均匀折射率增加的 I 类轨迹, 在相位对比显微镜 (Phase Contrast Microscope, PCM) 下呈黑色, 又称为 I 类波导, 波导损耗一般小于 $0.4\ \text{dB/cm}$, 折射率变化通常小于 0.005 . 在较高的激光能量水平下, 可以写入具有双折射特性的 II 类轨迹, 通过 PCM 可以看到白色的负折射率改变或者散射, 通常认为不能导光. Cheng 等人发现某些条件下写入的“白色”II 类轨迹具有偏振导光特性, 称为 II 类波导^[13]. 在 PCM 下观察, II 类波导中心区域是均匀的折射率增加 (黑色区域), 而边缘是负的折射率改变或者散射区域 (白色区域); 使用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 可以更深入地发现边缘区域是垂直于写入激光偏振方向的纳米光栅. Mishchik 和 Cheng 等人讨论了固定脉宽和功率的情况下, 飞秒激光脉冲在熔融石英中写入的 II 类轨迹截面纳米光栅的填充因子与扫描速度的关系^[14]. 较低速度写入的 II 类轨迹截面中间是均匀的较高折射率芯

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资助

第一作者: 林灵 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光物理与激光技术. Email: hiker00@163.com.

导师 (通讯作者): 吕百达 (1943-), 男, 教授, 主要研究方向为激光光束传输变换与控制. Email: baidalu0@tom.com

收稿日期: 2011-03-22; 修回日期: 2011-04-21

层,边缘是纳米光栅,这种结构具有偏振导光特性,偏振方向平行于纳米光栅的光能被导通,即前面提到的 II 类波导(Type II Waveguide, Type II-WG). 较高速写入的 II 类轨迹截面充满了纳米光栅,这种结构不能导光,称作 II 类纳米光栅轨迹(Type II Nanograting Trace, Type II-NG). 由于偏振方向垂直于纳米光栅的光散射较强,II 类波导具有偏振导光特性,可以作为波导偏振器. 但是对于要保留的偏振分量,它的损耗较高,达到 6 dB/cm 左右. 这是由于纳米光栅紧贴芯层,对要保留的偏振分量也有一定散射. 容易想到的思路是在 I 类波导两旁写入两根不导光的 II 类纳米光栅轨迹,调制 I 类波导的倏逝场,利用不同偏振模式的散射损耗差别来实现低损耗的波导偏振器. 这正是本文的尝试. 实验结果表明,它能够实现低损耗和 15.91 dB 的消光比,优化参量可以进一步提高消光比.

1 实验描述

实验装置如图 1(a). 光刻采用的光源是钛宝石锁模激光再生放大系统产生的 800 nm 超短红外脉冲激光,重复频率为 1 kHz,脉冲宽度为 120 fs. 抛光的熔融石英(Corning)平行六面体样品(尺寸 $4 \times 15 \times 18 \text{ mm}^3$)装在 XYZ 三维位移控制平台上,位移平台能够沿着平行或垂直于激光传播轴的方向平移. 用长工作距离(Mitutoyo)显微镜物镜(10 倍,工作距离 33.5 mm,数值孔径 0.28;或者 5 倍,工作距离 34 mm,数值孔径 0.14)把激光束聚焦到样品里面. 本文采用纵向写入结构,即样品平移方向平行于激光传播方向. 一个正的 PCM 被用来从 z 方向成像作用区域. 在这种装置下,灰色背景上的黑色区域代表相对正的折射率改变,而白色区域说明负的折射率改变或者散射中心. 近场模式用显微物镜放大,再用 CCD 相机来拍摄图像. 靠耦合非相干白光源

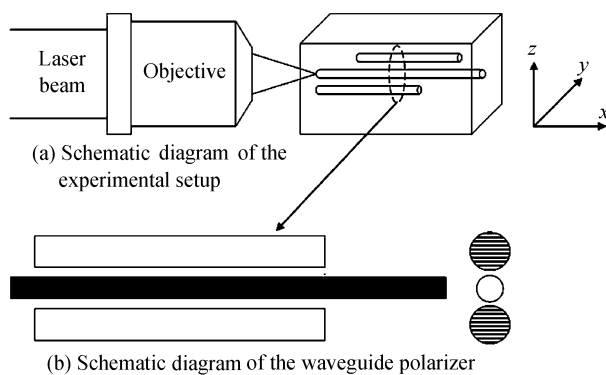


图 1 实验装置及水平(y 方向)偏振写入的波导偏振器结构
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup and the waveguide polarizer written by horizontal (y direction) polarization

(White Light, WL)和 800 nm 的偏振激光来测量各种波导结构的近场模式及透过率.

2 结果与讨论

首先使用 5 倍的聚焦物镜,在 7 mW 的激光功率,100 $\mu\text{m/s}$ 的样品移动速度下,在 x 向写入一根扫描长度为 7 mm(实际长度为 $7 \times 1.45 = 10.15 \text{ mm}$, 1.45 为玻璃折射率)的 I 类波导. 然后在 y 方向上把样品平移 5 μm ,写入一根扫描长度为 4 mm 的 II 类纳米光栅轨迹,并且使 I 类波导的起始端与 II 类轨迹的起始端有 0.5 mm 扫描长度的 x 向距离. 再把样品在 y 方向上向相反方向平移 10 μm ,类似地写入另一根 II 类轨迹. 写入 II 类轨迹时,所用物镜倍数为 10,激光功率为 1.7 mW,移动速度为 5 $\mu\text{m/s}$. 切换物镜带来的误差,通过精密定位平台精确地补偿了,误差小于 0.5 μm . 制作的一个波导偏振器,结构如图 1(b). 图 1(b)左侧是从 z 方向观察得到的,中间黑色的波导代表 I 类波导,旁边两根白色的轨迹代表不导光的 II 类纳米光栅轨迹;右侧是对应的截面折射率轮廓,填充的条纹代表纳米光栅. II 类轨迹中纳米光栅由较低折射率的窄层和较高折射率的宽层交替构成,各层垂直于写入激光偏振方向. 这种光栅具有形序双折射特性,类似于单轴晶体,光轴垂直于纳米层^[15-16]. 考虑到这一点,水平偏振写入的波导偏振器中纳米光栅方向如图 1(b)右图.

II 类轨迹纳米光栅具有偏振散射特性,这种特性会影响到中间 I 类波导的传输特性;纳米光栅距离 I 类波导越近,对 I 类波导的周围的倏逝场影响越大,相反越弱. 固定 I 类波导和 II 类轨迹的扫描长度,改变 I 类波导与 II 类轨迹之间的间距,使之分别为 6、7、8、9、10、11、12 μm ,共制作了 8 个波导偏振器. 随后耦合 800 nm 偏振激光,测量它们的近场模式,比较不同偏振耦合方向的模式强度. 图 2(a)显

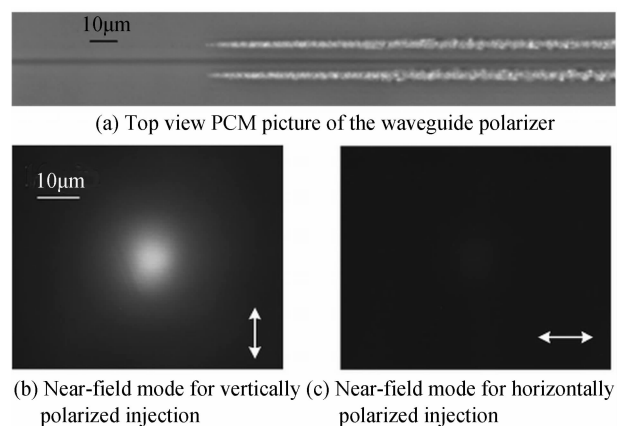


图 2 熔融石英中 800 nm 偏振飞秒激光写入的波导偏振器的偏振导光特性

Fig. 2 Polarization dependent optical guiding in waveguide polarizer in fused silica written by polarized 800 nm femtosecond laser

示的是间距为 $6\ \mu\text{m}$ 的波导偏振器的 PCM 照片,图 2(b)和(c)分别显示的是耦合垂直(z 向)偏振光和水平(y 向)偏振光后得到的近场模式. 从中可以看出垂直偏振的光能被导通,而水平偏振的光几乎不能通过. 考虑到纳米光栅方向与写入激光偏振方向的关系,即平行于纳米光栅的光能被导通,垂直于纳米光栅的光不能通过.

图 3(a)显示了近场模强度随间距的变化曲线,图中“H”代表耦合光为水平偏振时的近场模强度,而“V”则代表耦合光为垂直偏振时的近场模强度. 对于所有的间距,耦合光为垂直偏振时的近场模强度都大于耦合光为水平偏振时的近场模强度. 耦合光为垂直偏振时的近场模强度随着间距增加而缓慢上升,只在 $10\ \mu\text{m}$ 后稍有回落. 耦合光为水平偏振时的近场模强度随着间距增加而单调增加,相对于垂直偏振时增加更快. 这可以作如下解释:根据折射率剖面的轴对称性,偏振器只具有垂直偏振的模式和水平偏振的模式,水平偏振模式的散射更强,水平偏振模式的散射相对于垂直偏振模式的散射对间距的变化就更敏感,随着间距的增加,它们都会减弱. 图 3(b)显示了消光比随间距的

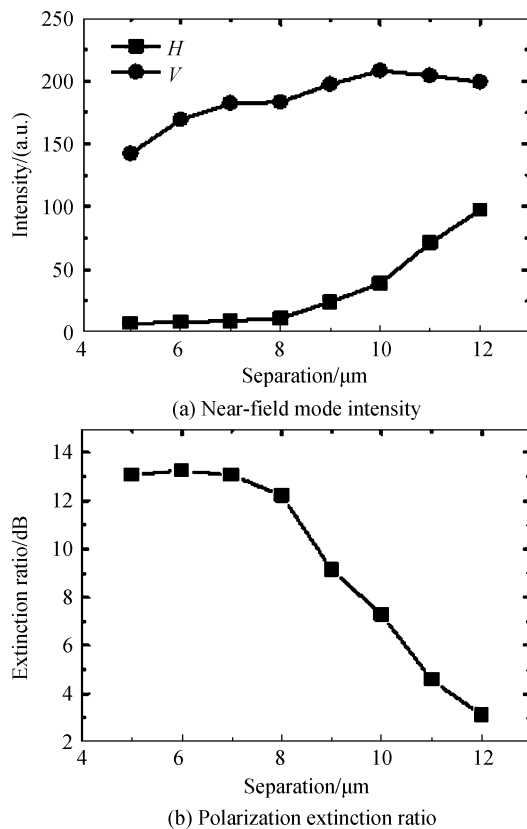


图 3 不同间距的波导偏振器的近场模强度变化曲线及消光比变化曲线
Fig. 3 Near-field mode intensity and polarization extinction ratio for waveguide polarizer as a function of the separation between type I waveguide and type II trace

变化曲线,可以看出间距为 $6\ \mu\text{m}$ 时,消光比最高,达到 13.25 dB. 随着间距的增加,消光比单调下降,间距为 $5\ \mu\text{m}$ 时的消光比也比 $6\ \mu\text{m}$ 时低. 由于写入时 I 类波导与 II 类轨迹会发生重叠,更小的间距没被采用.

更进一步,因为 $6\ \mu\text{m}$ 的间距能够实现最高的消光比,以它为固定的间距来进行长度扫描. I 类波导的扫描长度仍固定为 7 mm, II 类轨迹的扫描长度分别为: 1, 2, 3, 4, 5, 6 mm. 图 4(a)显示了近场模强度随 II 类轨迹长度的变化曲线,图 4 中的横坐标都是 II 类轨迹的实际长度,“H”代表耦合光为水平偏振时的近场模强度,而“V”则代表耦合光为垂直偏振时的近场模强度. 从中可以看出耦合光为垂直偏振时,近场模强度随长度的增加而减小,但变化很微弱. 耦合光为水平偏振时,近场模强度随长度的增加单调减小,变化较快. 这可与间距扫描时作类似解释:由于水平偏振的模式相对于垂直偏振的模式散射更强,水平偏振模式的在整个长度上的散射对长度的变化更敏感,它们都随 II 类轨迹的长度增加而增加. 图 4(b)显示了消光比随 II 类轨迹长度的变化曲线,消光比随着长度的增加近似成线性增加,当扫

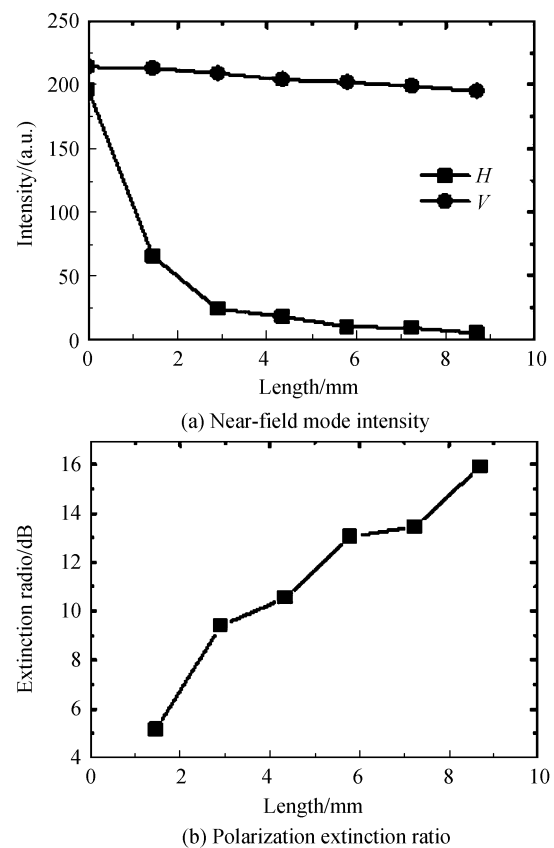


图 4 不同 II 类轨迹长度的波导偏振器的近场模强度变化曲线及消光比变化曲线
Fig. 4 Near-field mode intensity and polarization extinction ratio for waveguide polarizer as a function of the length of type II trace

描长度为 6 mm 时,消光比达到最大的 15.91 dB. 根据变化趋势可以估计更长的 II 类轨迹能够实现更大的消光比. 图 4(a)中 II 类轨迹长度为 0 对应单根 I 类波导,耦合光为垂直偏振时,II 类轨迹扫描长度为 6 mm 的波导偏振器的近场模强度是实际长度为 10.15 mm 的单根 I 类波导近场模强度的 0.91 倍. 由于波导偏振器与 I 类波导的耦合光强度相同,如引言中所提及,实际长度为 10.15 mm 的 I 类波导的损耗最大约为 0.40 dB,可以计算出扫描长度为 6 mm 的波导偏振器的最大损耗为 $0.40 - 10\lg 0.91 \approx 0.80$ dB.

使用偏振片检测 II 类轨迹扫描长度为 6 mm 的波导偏振器输出光的偏振态,发现对于任意的耦合光偏振态,输出光都是垂直偏振的. 这说明制作的波导偏振器确实能实现起偏,并且两端多出的 I 类波导部分能够保持偏振态. 如果继续优化 I 类波导及 II 类轨迹的写入参量,比如增加 II 类轨迹的长度,或者增加 I 类波导周围对称分布的 II 类轨迹的数量,可以进一步提高波导偏振器的消光比.

3 结论

本文阐述了采用飞秒激光脉冲在熔融石英中制作的一种新型低损耗波导偏振器. 它由中间的 I 类波导和两旁的两根 II 类轨迹构成,基于偏振方向垂直于纳米光栅的模式相对于偏振方向平行于纳米光栅的模式有更强的散射损耗的原理. 通过间距扫描发现 $6 \mu\text{m}$ 的间距能够实现更高的消光比. 通过固定间距为 $6 \mu\text{m}$ 进行的长度扫描发现最长 6 mm 的 II 类轨迹长度能够实现最大 15.91 dB 的消光比. 优化参量能够进一步提高消光比.

参考文献

- [1] GARMIRE E M, STOLL H. Propagation losses in metal-film-substrate optical waveguide[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1972, **8**(10): 763-766.
- [2] THYAGARAJAN K, DIGGAVI Supriya, GHATAK A K, *et al.* Thin-metal-clad waveguide polarizers: analysis and comparison with experiment[J]. *Optics Letters*, 1990, **15**(18): 1041-1043.
- [3] NAKANO T, BABA K, MIYAGI M. Insertion loss and extinction ratio of a surface Plasmon-polariton polarizer: theoretical analysis[J]. *JOSA B*, 1994, **11**(10): 2030-2035.
- [4] CHEN C H, WANG L K. Design of finite-length metal-clad optical waveguide polarizer[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, **34**(7): 1089-1097.
- [5] FUJITA J, LEVY M, SCARMOZZINO R, *et al.* Integrated multistack waveguide polarizer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(1): 93-95.
- [6] WATANABE O, TSUCHIMORI M, OKADA A, *et al.* Mode selective polymer channel waveguide defined by the photoinduced change in birefringence[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, **71**(6): 750-752.
- [7] MORAND A, SANCHEZ-PEREZ C, BENECH P, *et al.* Integrated optical waveguide polarizer on glass with a birefringent polymer overlay[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(11): 1599-1601.
- [8] ICHIKAWA J, UDA S, SHIMAMURA K, *et al.* Ti : LiNbO₃ waveguide polarizer with a Zn-doped overlayer prepared by liquid-phase epitaxy[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **76**(12): 1498-1500.
- [9] ZHAO Deng-tao, SHI Bin, JIANG Zui-min, *et al.* Silicon-based optical waveguide polarizer using photonic band gap[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(3): 409-411.
- [10] SINHA R K, KALRA Y. Design of optical waveguide polarizer using photonic band gap[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(22): 10790-10794.
- [11] DAVIS K M, MIVRA K, SUGIMOTO N, *et al.* Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(21): 1729-1731.
- [12] NOLTE S, WILL M, BURGHOFF J, *et al.* Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics[J]. *Applied Physics A*, 2003, **77**(1): 109-111.
- [13] CHENG G, MISHCHIK K, MAUCLAIR C, *et al.* Ultrafast laser photoinscription of polarization sensitive devices in bulk silica glass[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(12): 9515 - 9525.
- [14] MISHCHIK K, CHENG G, HUO G, *et al.* Nanosize structural modifications with polarization functions in ultrafast laser irradiated bulk fused silica [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(24): 24809-24824.
- [15] KAZANSKY P G, SHIMOTSUMA Y. Self-assembled sub-wavelength structures and form birefringence created by femtosecond laser writing in glass: properties and applications [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2008, **116**(10): 1052-1062.
- [16] TAYLOR R, HNATOVSKY C, SIMOVA E. Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass[J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2008, **2**(1-2): 26-46.

Femtosecond Laser Photoinscription of Waveguide Polarizer

LIN Ling^{1, 2}, YANG Xiao-jun², BAI Jing², LONG Xue-wen², LÜ Bai-da¹,
Razvan Stoian³, HUI Rong-qing⁴, CHENG Guang-hua²

(1 *Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

(2 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(3 *Laboratoire Hubert Curien, UMR 5516 CNRS, Universit'e de Lyon, Universit'e Jean Monnet, Saint Etienne, 42000 France*)

(4 *Department of Electrical Engineering and Computer Science, The University of Kansas, Lawrence, Kansas 66045, USA*)

Abstract: Femtosecond laser inducing refractive index modification has provided a flexible avenue to three-dimensional photonic devices. Having polarization dependent guiding properties, femtosecond photowritten type II waveguide can be used as waveguide polarizer, but it experiences high loss for reserved polarization component. A new type of low loss waveguide polarizer fabricated in fused silica using femtosecond laser was reported. It consists of a type I waveguide in the middle and two type II nanograting traces on both sides. Based on the polarization dependent scattering properties of nanograting induced by femtosecond laser, the evanescent field of type I waveguide was modulated by the type II nanograting traces. Because the mode having a polarization perpendicular to the nanograting experiences a higher scattering loss compared with the mode having a polarization parallel to the nanograting, the latter was transmitted more efficiently. Firstly, polarization extinction ratio as a function of the separation between type I waveguide and type II nanograting trace was investigated. Using the best separation, polarization extinction ratio as a function of the length of type II nanograting trace was further investigated. Extinction ratio up to 15.91 dB between orthogonal polarizations have been realized with a separation of 6 μm and a type II nanograting trace length of 6 mm. Higher extinction ratio could be easily realized by increasing the length of type II nanograting traces or the amount of type II nanograting traces.

Key words: Femtosecond laser; Photoinscription; Waveguide polarizer