

白光在 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中写入的任意折射率分布光波导*

张 鹏 杨德兴 赵建林 徐宏来 苏 坤

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 西安 710072)

摘 要 在理论分析 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中光致折射率变化分布与写入光的强度分布之间关系的基础上, 提出了一种在该晶体中写入具有任意折射率分布光波导的新方法. 利用由白光经电寻址空间光调制器得到的强度分布不同的片光辐照晶体, 分别写入了折射率呈误差函数分布和平方律分布的光波导结构. 采用干涉法测量了晶体中的光致折射率变化, 并用推导出的折射率变化分布解析表达式很好地拟合了测量数据. 实验结果表明, 该方法是可行的. 利用白光光源结合高分辨率的空间光调制器有望在多种光折变材料中制备出具有任意折射率分布的高质量光波导.

关键词 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体; 光写入波导; 任意折射率分布; 白光辐照; 空间光调制器 (SLM)

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

光波导器件是集成光学系统的基础元件. 近年来提出的光写入波导技术引起人们的广泛关注. 与薄膜沉积、离子交换、外延生长以及刻蚀等传统的波导制作方法相比, 光写入法具有工艺简单、速度快、成本低、易于在材料体内形成波导结构等优点. 迄今为止, 人们已在多种光敏材料中进行了波导的制作研究, 这些材料主要包括各种玻璃^[1]、光致聚合物^[2]以及光折变晶体^[3~14]等. 在光折变晶体中, 利用功率为毫瓦量级的激光就可以写入波导结构, 并且写入之后既可以用光学的方法实时改变或擦除, 又可以通过电固定^[14]或热固定^[15]的方式长期存储下来作为永久波导器件. 另外, 光折变晶体本身具有的光折变效应、电光以及声光效应使得光写入的波导可以被用作多种功能波导器件. 现有的基于光折变晶体的波导光写入技术主要有激光精细加工^[3]、结构光辐照^[4~12]以及光折变空间孤子^[13,14]等. 光波导的折射率分布是波导的重要基本参数之一, 通过控制波导的折射率分布, 可以改善波导的导光特性. 传统的波导制作方法中对波导折射率分布的控制是通过改变波导制备过程中的一些物理参数实现的^[16,17]. 对于采用目前的光写入波导技术时, 如何进行折射率分布控制的研究尚未见报道. 本文在理论分析 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中光致折射率变化分布与写入光的强度分布之间关系的基础上, 提出一种

在该晶体中写入具有任意折射率分布光波导的新方法. 并利用由白光经电寻址空间光调制器得到的强度分布不同的片光辐照 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体, 对该方法进行实验研究.

1 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中的光致折射率变化与光强分布的关系

$\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中, 在无外加电场以及光强分布的空间频率比较低的情况下 ($\Lambda > 1 \mu\text{m}$), 光生载流子迁移的驱动力主要是体光伏效应^[18]. 当强度分布为 $I(x)$ 的片光垂直于晶体 c 轴辐照晶体且其展开方向也垂直于 c 轴时, 晶体中折射率的变化过程如图 1. 其中 (a) 图为光强分布; (b) 图给出了光激发电子沿晶体光轴方向定向迁移的情况; (c) 图为晶

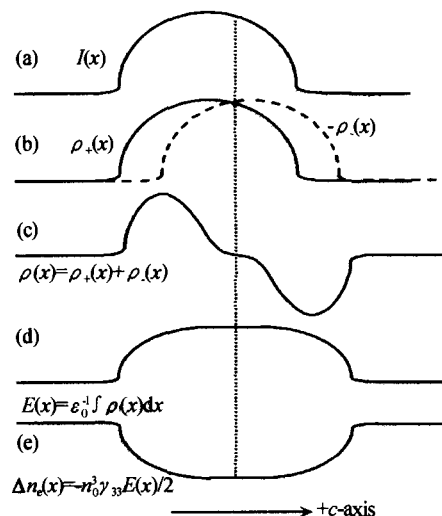


图 1 强度分布为 $I(x)$ 的片光在 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中产生折射率变化的过程

Fig. 1 The process of refractive index changing in a $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ crystal induced by a sheet beam with intensity profile of $I(x)$

* 国家自然科学基金(60077018)、西北工业大学研究生创业种子基金(Z20030088)、博士论文创新基金(CX200514)和青年教师创新基金资助项目
Tel: 029-88495724-803 Email: zp17171@eyou.com
收稿日期: 2004-08-23

体中光照产生的净余电荷密度分布曲线;(d)图是由(c)图中的净余电荷密度分布根据高斯定理得到的电场分布曲线;(e)图给出了在(d)图中所示电场作用下,由 LiNbO₃: Fe 晶体线性电光效应的调制得到的折射率分布曲线. 当片光辐照晶体时,对于晶体的一个薄层可以不考虑沿光传播方向上的光强变化,因此晶体中沿片光展开方向和光传播方向上,光照导致的折射率变化情况是均匀的. 此时,分析晶体中光致折射率变化分布的问题为一维问题. 在线性激发条件下,光强分布为 $I(x)$ 的光束在电子漂移后被复合前晶体中光激发出的空穴和电子的密度分布分别为

$$\rho_+(x) = \rho_0 I(x) \tag{1}$$

和

$$\rho_-(x) = -\rho_0 I(x - l_{ph}) \tag{2}$$

式中 ρ_0 为正的常数, l_{ph} 为电子在光生伏打场作用下沿晶体 +c 轴方向的平均迁移距离. 电子经复合后,由高斯定理可得晶体中净余电荷沿晶体光轴方向上的空间电场强度分布为

$$E(x) = \frac{1}{\epsilon} \int \rho(x) dx = \frac{1}{\epsilon} \int [\rho_+(x) + \rho_-(x)] dx = \frac{\rho_0}{\epsilon} \int [I(x) - I(x - l_{ph})] dx \tag{3}$$

式中 ϵ 为 LiNbO₃: Fe 晶体的介电常数. 进而由线性电光效应可得晶体中非常光折射率变化的分布为

$$\Delta n_e(x) = -\frac{1}{2} n_{0e}^3 \gamma_{33} E(x) = -\frac{n_{0e}^3 \gamma_{33} \rho_0}{2\epsilon} \int [I(x) - I(x - l_{ph})] dx \tag{4}$$

式中 n_{0e} 为光照前晶体的非常光折射率, γ_{33} 为线性电光张量元. 由此可见,对于任一给定光强分布为 $I(x)$ 的片光,在 LiNbO₃: Fe 晶体中产生的折射率变化分布可以通过式(4)来预测.

2 任意折射率分布光波导的写入

2.1 波导写入方法

由上节分析可知,具有不同强度分布的写入光将在 LiNbO₃: Fe 晶体中产生不同的折射率变化分布,并且这一分布可由式(4)预测. 因此,在光写入波导时,可以通过改变写入光的强度分布来达到控制所制作波导折射率分布的目的. 图 2 给出了在 LiNbO₃: Fe 晶体中写入具有任意折射率分布波导的方法示意图. (a)图给出了由均匀光束得到具有任意强度分布光束的方法. (b)图描述了利用这一光束进行波导写入的方法. 如(a)图所示,一束均匀光垂直通过透射式空间光调制器(SLM)读出由计算机生成的强度灰度图样,以得到不同强度分布的光束^[19]. 由于 LiNbO₃ 晶体为自散焦介质(即光照

区折射率减小)^[7,8],因此要得到高折射率区域作为波导的芯,就必须利用写入光中强度低的区域作为导波区(如图 2(b)). 通过改变光强分布情况,就可以得到具有不同折射率分布的波导结构. 对于强度分布 $I(x)$ 为一维高斯分布($\exp(-x^2)$)的片光,在晶体中得到的折射率变化分布为误差函数[erf(x)]分布^[8];对于 $I(x)$ 为平方律分布(x^2)和矩形分布的片光,由式(4)易知,此时得到的折射率变化分布分别服从平方律分布和梯形分布. 本文只给出写入折射率分布为误差函数分布和平方律分布的波导结构的初步实验结果.

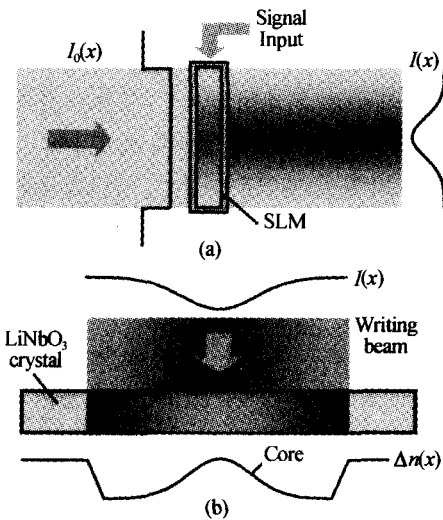


图 2 任意折射率分布波导的写入方法
Fig. 2 Schematic diagram of the writing method for waveguides with arbitrary index profiles

2.2 实验光路

采用图 3 所示的光路在 LiNbO₃: Fe 晶体中写入波导结构. 由功率为 250 W 的卤钨灯(白光点光源 WLS)发出的白光经抛物凹面镜 M 准直后,投射到透射式电寻址的空间光调制器(SLM,分辨率 1024×768,256 灰度级)上,将预先设计好的灰度分

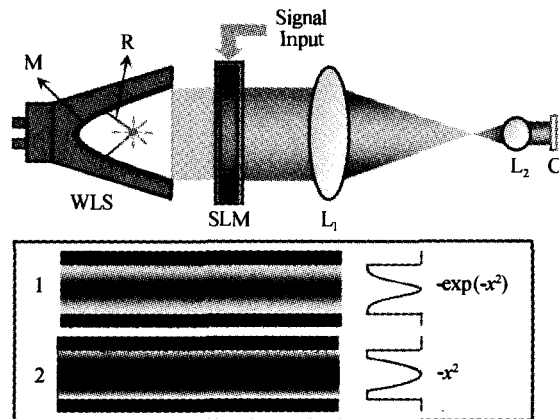


图 3 波导写入光路图. 插图为空间光调制器的输入图像
Fig. 3 Experimental setup for writing waveguide. Inset shows the input patterns of the SLM

布图样读出后,形成写入光.该光束具有与灰度图灰度分布相对应的强度分布.利用望远镜系统(L_1 , L_2)将写入光压缩后辐照晶体C.实验中使用的晶体为掺铁0.05 wt%、尺寸为 $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 的薄片 LiNbO_3 晶体,光轴方向沿着晶体的10 mm边.采用图3插图中的灰度分布图作为空间光调制器的输入图像,以产生强度分布为负高斯分布和负平方律分布的光束辐照晶体写入波导结构.晶体中的光致折射率变化采用干涉法测量,测量光路如文献[7]中图1.

2.3 实验结果

图4、图5给出了采用图3插图中的灰度图像分别作为SLM的输入图像且辐照晶体9 h后的实验结果.其中,图(a)为光辐照后晶体中波导区的干涉条纹图样(光照前为平行直条纹);图(b)给出了波导区在扩展平行光照射时的近场投影图样;图(c)均为由干涉法得到的晶体中波导区的光致折射率变化分布曲线,其中不连续的圆圈为测量数据点,实线为利用式(4)对测量数据点进行分段拟和的结果.由图(a)所示晶体中光照后的干涉条纹图样可以看出,晶体中的光致折射率变化不大,这是由于写入光强度不高以及晶体的吸收带宽较窄所致.图(b)所示的近场投影图中的亮线是由于光束在晶体中传播时,将从低折射率区向高折射率区偏转造成的.其中,中间的亮线对应于高折射率区域即光写入的波导芯区.由图(c)可以看出,理论分析的结果与实验测量数据基本吻合,除了在写入光强度变化剧烈的地方,由于衍射等影响使得折射率分布与理论预测结果有些偏差.

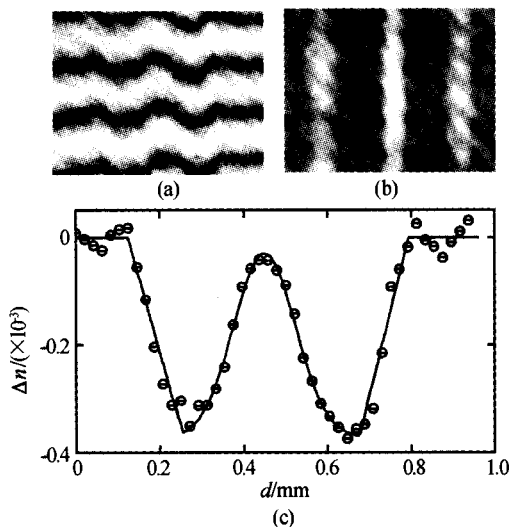


图4 光强为负高斯分布的片光在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中写入波导的结果
Fig. 4 Experimental results of waveguide writing in the $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal employing a sheet beam with negative Gaussian intensity profile

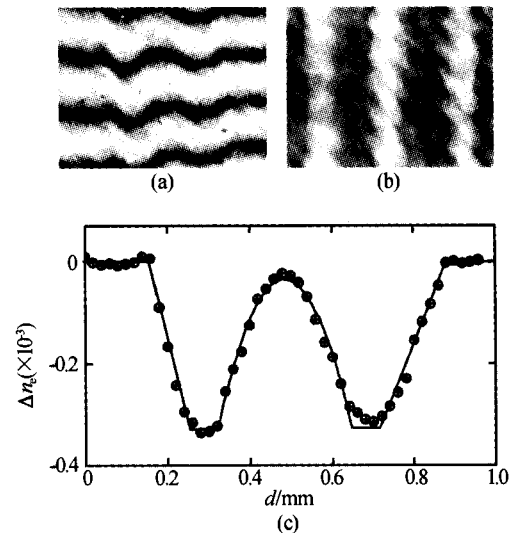


图4 光强为负平方率分布的片光在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中写入波导的结果
Fig. 5 Experimental results of waveguide writing in the $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal employing a sheet beam with negative square law intensity profile

3 讨论

采用本文提出的方法可以在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体薄片或薄膜中、或块状晶体的一个薄层中制备具有任意折射率分布的波导.根据所需波导的折射率分布,由式(4)可以得出与之对应的光强分布.通过SLM将计算机生成的与该强度分布相对应的灰度图转化为写入光的强度分布,然后辐照晶体就可以得到所期望的波导结构.注意到目前很多光写入的光折变器件(例如波导阵列、光折变光栅等)都需要在晶体中写入周期性分布的折射率变化,这可以通过在SLM中输入相应的周期性灰度分布图样得到周期性的光强分布辐照光折变材料来实现.控制SLM中输入图样灰度分布的周期,同时调整望远镜系统的放大率,可以得到不同周期的折射率变化分布,即可以制备出波导阵列或光折变光栅等器件.所能达到的最小周期取决于SLM的最小空间分辨率、望远镜系统的放大率以及光学孔径的衍射.该方法同样可以被用于其它光折变或光敏材料,但此时光强分布与光致折射率变化的关系不再满足式(4).而且对于写入光不是片光的情况,材料中光致折射率变化与光强分布之间的关系变得比较复杂,但仍可通过数值求解复杂的非线性方程组获得.这样通过设计具有不同形状以及强度分布的写入光,可以在多种光敏材料中写入各种波导器件.同时,在望远镜系统放大率一定的情况下,SLM的分辨率越高、灰度级越多,所得到的波导质量越高.而且利用白光作为写入光可以避免光折变晶体中的光感应光散射现象对写入波导质量产生的影响.另外,本

文着重提出在 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中写入任意折射率分布光波导的方法, 而实验所制作波导的尺寸较大, 进一步利用该方法制作接近实用化波导的研究正在进行之中。

4 结论

理论分析了强度分布不同的写入光在 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中产生的折射率变化分布规律。在此基础上, 提出了一种在光折变晶体中写入具有任意折射率分布光波导的新方法。利用白光经 SLM 得到的光强分布为负高斯分布和负平方律分布的片光, 分别在 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中写入了折射率分布呈误差函数分布和平方律分布的波导结构。采用干涉法测量了晶体中的折射率变化分布, 并用推导出的折射率分布的解析表达式很好地拟合了测量数据, 从而证明了该方法的可行性。此外, 由于白光在光折变晶体中不会产生光感应光散射现象, 因此利用白光光源结合高分辨率的空间光调制器有望在多种光折变材料中制备出具有任意折射率分布的高质量波导器件。

参考文献

- Miura K, Qiu J, Inouye H, *et al.* Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(23): 3329~3331
- Kagami M, Yamashita T, Ito H. Light-induced self-written three-dimensional optical waveguide. *Appl Phys Lett*, 2001, **79**(8): 1079~1081
- Itoh K, Matoba O, Ichioka Y. Fabrication experiment of photorefractive three-dimensional waveguides in lithium niobate. *Opt Lett*, 1994, **19**(9): 652~654
- 杨立森, 陈小虎, 刘思敏, 等. (2+1)维光折变波导阵列的制作. *光子学报*, 2002, **31**(10): 1200~1204
Yang L S, Chen X H, Liu S M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1200~1204
- Zhang P, Zhao J, Yang D, *et al.* Optically induced photorefractive waveguides in KNSBN : Ce crystal. *Opt Mat*, 2003, **23**(1-2): 299~303
- Zhang P, Zhao J, Yang D, *et al.* Optical masks prepared by using liquid crystal light valve for light-induced photorefractive waveguides. *Appl Opt*, 2003, **42**(20): 4208~4211
- 杨德兴, 赵建林, 张鹏, 等. $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中光写入波导时折射率的变化规律. *物理学报*, 2003, **52**(5): 1179~1183
Yang D X, Zhao J L, Zhang P, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(5): 1179~1183
- 张鹏, 赵建林, 杨德兴, 等. $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中光写入平面光波导的导光特性研究. *物理学报*, 2003, **53**(10): 3369~3374
Zhang P, Zhao J L, Yang D X, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(10): 3369~3374
- Zhao J, Zhang P, Yang D, *et al.* Light-induced photorefractive waveguides in iron-doped lithium niobate crystals. *Acta Opt Sin*, 2003, **23**(supplement): 171~172
- Zhang P, Yang D X, Zhao J L, *et al.* Light-induced array of three-dimensional waveguides in lithium niobate by employing two-beam interference field. *Chin Phys Lett*, 2004, **21**(8): 1558~1561
- 赵建林, 李碧丽, 杨德兴, 等. $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中光写入阵列平面光波导的实验实现. *光子学报*, 2003, **32**(4): 421~424
Zhao J L, Li B L, Yang D X, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 421~424
- 赵建林, 李碧丽, 张鹏, 等. 用光辐照法在 SBN : Cr 晶体中写入动态阵列平面光波导. *物理学报*, 2004, **53**(8): 2583~2588
Zhao J L, Li B L, Zhang P, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(8): 2583~2588
- Liu S M, Zhang G Q, Sun Q, *et al.* Waveguides written and stored by photovoltaic dark spatial solitons in $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ crystals. *Chin Phys Lett*, 1996, **13**(10): 737~740
- Klotz M, Crosser M, Guo A, *et al.* Fixing solitonic y junctions in photorefractive strontium-barium-niobate. *Appl Phys Lett*, 2001, **79**(10): 1423~1425
- Buse K, Breer S, Peithmann K, *et al.* Origin of thermal fixing in photorefractive lithium niobate crystals. *Phys Rev B*, 1997, **56**(3): 1225~1235
- Phelps C W, Barry T S, Rode D L, *et al.* Low-loss, single-mode, organic polymer waveguides utilizing refractive index tailoring. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**(9): 1900~1905
- Tervonen A, Honkanen S, Leppihalme. Control of ion-exchanged waveguide profiles with Ag thin-film sources. *J Appl Phys*, 1987, **62**(3): 759~763
- Peithmann K, Wiebrock A, Buse K, *et al.* Low-spatial-frequency refractive-index changes in iron-doped lithium niobate crystals upon illumination with a focused continuous-wave laser beam. *J Opt Soc Am B*, 2000, **17**(4): 586~592
- Loiseaux B, Huignard J. Optically addressed liquid crystal light valves for an adaptative control of amplitude and phase of laser beam. *Proc SPIE*, 1998, **3297**: 37~43

Fabrication of Waveguides with Arbitrary Index Profiles in $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ Crystal by White Light Irradiation

Zhang Peng, Yang Dexing, Zhao Jianlin, Xu Honglai, Su Kun

Institute of Optical Information Science and Technology, School of Sciences, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Received date: 2004-08-23

Abstract On the basis of the theoretical analysis of the relations between the distributions of light-induced index changes and the intensity profiles of writing beams, a novel optical approach for fabricating waveguides with arbitrary index profiles is proposed. Waveguide structures with index profiles of an error function distribution and a square law distribution are fabricated respectively employing writing beams with different intensity profiles generated by a white light beam reading out gray patterns from an electrically addressed spatial light modulator (SLM). Employing the interferometric technique, the light-induced index changes in the crystal sample are measured, which are well fitted by using the deduced analytic expressions of the index change distributions. Experimental results show that the method is feasible. High quality waveguide devices with arbitrary index profiles may be fabricated in various photorefractive media employing white light irradiations and spatial light modulators with high resolutions.

Keywords $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ crystal; Light-induced waveguides; Arbitrary index profiles; White light irradiation; Spatial light modulator (SLM)



Zhang Peng was born in 1979 in Shandong, China. He received the B. S. degree in applied physics and M. S. degree in optical engineering from Northwestern Polytechnical University (NPU) of China in 2001 and 2004, respectively. Now he works towards the Ph. D. degree in precise instrument and mechanics in NPU. His current research interests focus on the light-induced photonic devices and the photorefractive nonlinear optics.