

# LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中光写入平面光波导的 导光特性研究\*

张 鹏<sup>†</sup> 赵建林 杨德兴 王美蓉 孙一栋

(西北工业大学应用物理系, 西安 710072)

(2003 年 11 月 23 日收到 2004 年 2 月 9 日收到修改稿)

从光折变效应的单中心模型和载流子的光伏迁移机理出发给出了高斯片光在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中导致的折射率变化分布的解析表达式. 利用片光以“三明治”辐照方式在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中写入了平面光波导结构. 用切片干涉法测量了波导区的折射率分布, 并对波导进行了简单的导光测试. 根据射线方程以及波导的折射率分布对光写入波导的导光特性进行了模拟计算分析. 研究结果表明, 在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中光写入光波导是可行的.

关键词: LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体, 光辐照法, 平面光波导, 导光特性, 高斯片光

PACC: 4265, 4280L

## 1. 引 言

光波导作为集成光学系统的基本元件, 在下一代光通信系统中举足轻重. 扩散、离子交换、离子注入、刻蚀以及薄膜沉积等方法为波导的传统制作技术<sup>[1]</sup>, 但它们都存在工艺繁杂、制作周期长、成本高的缺点, 且不利于在材料体内制作波导结构. 近年来人们提出的利用光辐照在波导材料的表面层或体内写入各种波导结构的技术被认为是一种直接、快速、低成本、高效益的波导制作技术<sup>[2-21]</sup>. 目前, 用于光写入波导的材料有很多, 主要包括玻璃<sup>[2-4]</sup>、有机材料<sup>[5-7]</sup>以及光折变晶体<sup>[8-21]</sup>等. 在众多的材料中, 光折变晶体是最适合被用于光写入波导的材料之一. 利用毫瓦量级功率的激光可以在光折变晶体中写入波导. 而且写入的波导结构可以再用光学方法实时改变或擦除. 这一特性使得这种波导有望被用于动态光互连或光学神经网络系统<sup>[8, 9]</sup>. 同时还可以通过热固定<sup>[22]</sup>或电固定<sup>[10]</sup>的方式将波导结构长期存储在晶体中. 此外, 材料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各种功能波导器件. 迄今为止, 人们提出了很多基于光折变

晶体的波导写入技术, 概括起来大致可以分为三类: 第一类是激光微细加工技术, 这种技术利用一个高度会聚的光点逐点扫描晶体来制作波导结构<sup>[8, 11]</sup>; 第二类是用掩模板或多光束干涉形成的结构光辐照晶体<sup>[12-17]</sup>; 第三类是用光折变空间孤子写入波导<sup>[18-21]</sup>. LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体由于具有良好的机械稳定性、强的电光和声光效应, 并且容易获得大尺寸、高光学质量的晶体, 因而是制作波导的理想材料. 同时, LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体又是优良的光折变材料之一, 具有较高的光折变灵敏度. 晶体中光致折射率的改变值可以达到 10<sup>-4</sup>—10<sup>-3</sup>量级, 并且具有较长的暗存储时间(几天到几个月)<sup>[23]</sup>. 因此, LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中光写入光波导的技术引起人们的广泛关注<sup>[8, 11, 12, 14-18]</sup>. 我们已经研究了片光以“三明治”方式辐照 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体时, 片光间距对折射率变化的影响<sup>[16]</sup>. 本文首先从光折变效应的单中心模型和载流子的光伏迁移机理出发, 推导高斯片光在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中导致的折射率变化分布的解析表达式. 然后在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中写入平面光波导结构, 并研究其折射率分布及导光特性. 结合射线方程及折射率分布的解析式, 对光写入平面波导的导光特性进行模拟计算分析.

\* 国家自然科学基金(批准号 60077018)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zp17171@eyou.com; 电话: 029-88495724.

## 2. 片光在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中产生的折射率变化分布

近 30 年来,人们对  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中光折变效应的产生机理进行了深入细致的研究.在无外加电场以及光强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.单中心模型可以很好地解释低功率密度的激光在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中产生的各种光折变效应<sup>[24]</sup>.当片光垂直于  $c$  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 所示.沿晶体  $c$  轴方向上光强分布为高斯分布(图 1(a))的片光在晶体中从施主  $\text{Fe}^{2+}$  将电子激发至导带,导带中的电子在体光伏效应的作用下沿着  $+c$  轴方向运动,其平均迁移距离为  $l_{\text{ph}}$ <sup>[25]</sup>.迁移后导带中的电子又会被晶体中的受主  $\text{Fe}^{3+}$  俘获,如图 1(b)(c)所示.经过一系列的激发、迁移、再激发的过程,最终在晶体中形成了图 1(d)所示的  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  的空间分布.这些空间分布的电荷按照泊松方程产生沿  $c$  轴方向如图 1(e)所示的电场分布.这一空间电场由线性电光效应调制晶体的折射率空间分布,如图 1(f)所示.

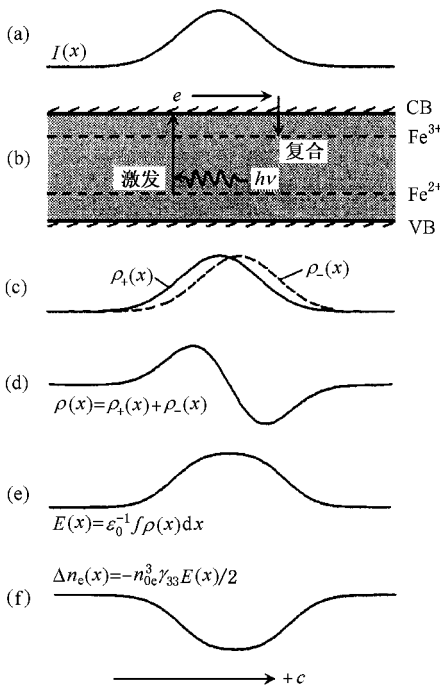


图 1 片光在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中引起折射率变化的过程示意图.(a)光强分布 (b)能带结构图 (c)正负载流子密度分布 (d)空间电荷密度分布 (e)电场强度分布; (f)折射率变化分布

片光辐照晶体时,在不考虑沿光传播方向上的光强变化时,晶体中沿片光展开方向和光传播方向上,光照导致的变化情况是均匀的,此时分析晶体中光致折射率变化分布的问题转化成一维问题.由于光强的分布为高斯分布,设为

$$I(x) = I_0 \exp[-a(x-b)^2], \quad (1)$$

其中  $I_0, a, b$  均为正的常数,则晶体中的光激发载流子的密度分布也为高斯分布.在电子漂移后被复合前,晶体中光激发出的  $\text{Fe}^{3+}$  和电子的密度分布分别为

$$\rho_+(x) = \rho_0 \exp[-a(x-b)^2], \quad (2)$$

和

$$\rho_-(x) = -\rho_0 \exp[-a(x-b-l_{\text{ph}})^2], \quad (3)$$

其中  $\rho_0$  为正的常数.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

$$\begin{aligned} E(x) &= \frac{1}{\epsilon} \int \rho(x) dx = \frac{\rho_0}{\epsilon} \int \{ \exp[-a(x-b)^2] \\ &\quad - \exp[-a(x-b-l_{\text{ph}})^2] \} dx \\ &= \frac{\rho_0}{2\epsilon} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \{ \text{erf}[\sqrt{a}(x-b)] \\ &\quad - \text{erf}[\sqrt{a}(x-b-l_{\text{ph}})] \}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\text{erf}(x)$  为误差函数(error function)<sup>[26]</sup>.由线性电光效应可得晶体中折射率变化的分布为

$$\begin{aligned} \Delta n_e(x) &= -\frac{1}{2} n_{0e}^3 \gamma_{33} E(x) \\ &= -\frac{n_{0e}^3 \gamma_{33} \rho_0}{4\epsilon} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \{ \text{erf}[\sqrt{a}(x-b)] \\ &\quad - \text{erf}[\sqrt{a}(x-b-l_{\text{ph}})] \}. \end{aligned} \quad (5)$$

以“三明治”方式辐照晶体时,根据电场的叠加原理可知,在两次辐照引起折射率变化的最大值之和达到饱和值之前,最终的折射率变化分布可以用两次单独曝光时折射率变化分布之和来表示.

此外,由图 1(f)和文献 16 可以看出,细光束辐照晶体得到的折射率变化是中心减小,沿光轴方向的边缘有所增加,形成“小峰”,而用片光辐照晶体得到的折射率变化分布中却没有“小峰”出现.该现象的成因与晶体中光致空间电荷场的分布有关.细光束辐照后,晶体中的净余电荷分布形成的电场分布,比较接近于两种异性点电荷形成的电场分布,其电力线分布如图 2(a);片光辐照后,晶体中的净余电荷分布形成的电场分布,比较接近于无穷大平行板电容器中的电场分布,其电力线分布如图 2(b).由

图 2(a)可以看出:对于细光束入射的情况,在光轴方向上,光斑中心与边缘的电场方向相反,根据 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体的线性电光效应特点可知,光斑中心折射率降低,而沿光轴的两边缘折射率增加,出现“小峰”。同理,由图 2(b)可以看出:光照区边缘不会出现折射率变大的区域,即不会出现“小峰”。

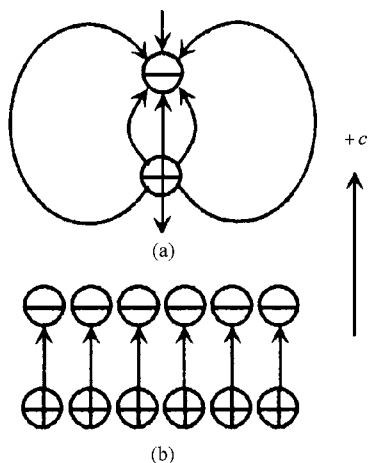


图 2 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中光生载流子形成的电力线分布。(a)(b)分别对应细光束和片光照射时的情形

### 3. 光写入平面光波导的实验研究

#### 3.1. 实验装置

采用图 3 所示的光路,在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中写入波导结构并对其进行导光测试。由半导体抽运的固体激光器(DPL,  $\lambda = 532\text{nm}$ , 输出功率 64mW)发出的细光束经望远镜系统压缩光束直径后,垂直通过细玻璃棒形成片光辐照晶体<sup>[27]</sup>。片光的展开方向和偏振方向均与晶体光轴垂直。通过沿  $c$  轴方向移动晶体完成两次曝光。同时一束经扩束准直后的 He-Ne 激光通过短焦距透镜  $L_1$  会聚于晶体的前表面,晶体的后表面经  $L_2$  成像于 CCD 靶面。通过观察 CCD 中的光斑图样可以判断晶体中是否写入了波导结构。用马赫-曾德干涉仪光路由切片干涉法对光写入波导的折射率分布进行测量,测量光路与文献[16]中图 1 所示的光路一致。实验所用的晶体样品为掺铁浓度为 0.07wt%、尺寸为 4.8mm × 4.8mm × 4.8mm 的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体。

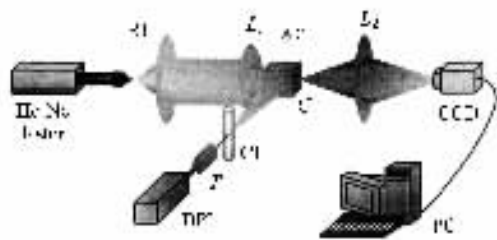


图 3 平面光波导的写入和导光测试光路。RT 为倒置望远镜;L 为透镜;C 为晶体;DPL 为半导体抽运的固体激光器;T 为望远镜;CL 为玻璃棒;CCD 为 CCD 相机;PC 为计算机

#### 3.2. 实验结果

图 4 给出了功率密度约为  $20\text{mW}/\text{cm}^2$  的片光在晶体中写入平面光波导的实验结果。两次曝光时间均为 30min,片光间距约为 1 倍光斑束腰宽度。图 4(a)为光照后波导区的干涉条纹图样(b)为光照后波导区在平行光照射下的近场投影图(c)为由切片干涉法得到的沿(a)图中黑色箭头方向的折射率变化分布曲线,其中实曲线为对测量数据点进行拟合的结果,拟合模型为方程(5),从图中可以看出波导区的宽度约为  $300\mu\text{m}$ (d)为晶体中波导区折射率变化分布的三维图(e)(f)分别为波导写入前后的导光实验中 CCD 接收到的光斑强度图样(g)为沿图(e)(f)中白色箭头的灰度分布曲线,其中虚线对应(e)图,实线对应(f)图。由(c)图可以看出,第 2 节中得到的折射率分布的解析表达式与实验结果符合得相当好。图(e)(f)(g)表明,晶体中写入波导前,CCD 接收到弥散的光斑;写入波导后,由 CCD 接收到的光斑变为一条亮线,这说明光线明显被限制在波导区中传输。

### 4. 光写入平面光波导的导光特性分析

由第二节的分析可知,晶体中平面光波导写入后折射率的分布可以表示为

$$n_c(x) = n_{0c} - \frac{n_{0c}^3 \gamma_{33} \rho_0}{4\epsilon} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \{ \text{erf}[\sqrt{a}(x-b)] - \text{erf}[\sqrt{a}(x-b-l_{ph})] + \text{erf}[\sqrt{a}(x-b-\delta)] - \text{erf}[\sqrt{a}(x-b-l_{ph}-\delta)] \}, \quad (6)$$

其中  $\delta$  为片光间距。将(6)式代入射线方程可以对波导的导光特性进行分析。这里讨论利用不同宽度的片光制作的波导的导光特性。

在近轴的情况下,层状梯度折射率介质中的射

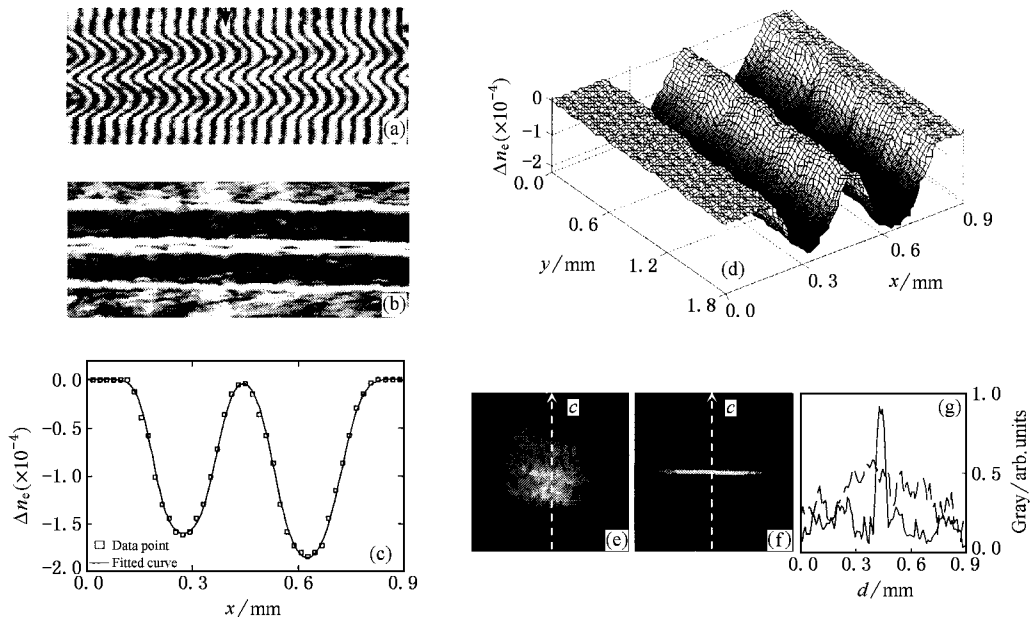


图 4 利用片光在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中写入平面光波导的实验结果

线方程可表示为<sup>[28]</sup>

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx}, \quad (7)$$

其中  $z$  方向为光线的传播方向. 将图 4(c) 中对测量数据点拟合得到的折射率分布表达式进行坐标平移

后代入 (7) 式, 利用 Matlab 编程进行数值运算, 可以得到波导区导光时光线的轨迹. 通过改变  $a$  的取值可以得到在折射率差值相同的情况下, 不同宽度波导的导光情况. 图 5(a)(b)(c)(d) 分别给出了利用透镜会聚直接耦合进行导光实验时, 晶体中无波

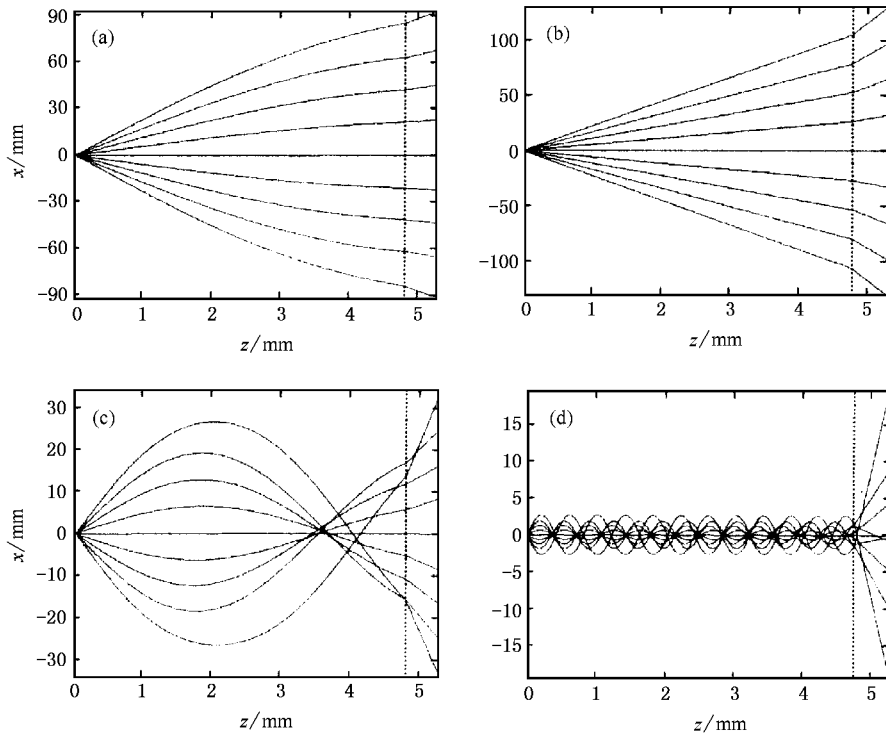


图 5 对光写入平面波导进行导光实验时, 波导区光线轨迹的模拟结果. (a)(b)(c)(d) 分别对应无波导、波导宽度 300 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 10 $\mu$ m 的情况. 图中的虚线表示晶体的后表面位置

导和波导区宽度分别为  $300\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$  时波导区的光线轨迹.由模拟结果可以看出:在折射率变化的峰值相等的情况下,波导宽度越小,波导对光线的约束能力越强.这说明利用功率密度为  $\text{mW}$  量级的激光束辐照  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体来制作光波导是完全可行的.

## 5. 结 论

从光折变效应的单中心模型和载流子的光伏迁

移机理出发推导了高斯片光在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中导致的折射率变化分布的解析表达式.利用片光以“三明治”辐照方式在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中写入了平面光波导结构.用切片干涉法测量了波导区的折射率分布,给出了波导区折射率变化分布的三维图.利用所推导的折射率分布表达式很好的拟合了测量结果.对波导进行了导光测试,并根据射线方程,对光写入波导的导光特性进行了模拟分析,讨论了不同宽度波导的导光特性.实验结果表明在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中利用光辐照法写入光波导是可行的.

- [ 1 ] Hunsperger R G 1985 *Integrated optics : theory and technology* ( Berlin : Springer-Verlag ) p47
- [ 2 ] Davis K M *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 1729
- [ 3 ] Miura K *et al* 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 3329
- [ 4 ] Ljungström A M *et al* 2002 *Opt. Express* **10** 230
- [ 5 ] Frisken S J 1993 *Opt. Lett.* **18** 1035
- [ 6 ] Joshi M P *et al* 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 170
- [ 7 ] Kagami M *et al* 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 1079
- [ 8 ] Matoba O *et al* 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 2006
- [ 9 ] Dittrich P *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 1508
- [ 10 ] Wesner M *et al* 2001 *Appl. Phys. B* **72** 733
- [ 11 ] Itoh K *et al* 1994 *Opt. Lett.* **19** 652
- [ 12 ] Matoba O *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 122
- [ 13 ] Zhang P *et al* 2003 *Opt. Mat.* **23** 299
- [ 14 ] Zhang P *et al* 2003 *Appl. Opt.* **42** 4208
- [ 15 ] Liu S M *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 432 ( in Chinese ) [ 刘思敏等 1998 物理学报 **47** 432 ]
- [ 16 ] Yang D X *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1179 ( in Chinese ) [ 杨德兴等 2003 物理学报 **52** 1179 ]
- [ 17 ] Zhao J L *et al* 2003 *Acta Photonica Sin.* **4** 421 ( in Chinese ) [ 赵建林等 2003 光子学报 **4** 421 ]
- [ 18 ] Liu S M *et al* 1996 *Chin. Phys. Lett.* **13** 737
- [ 19 ] Shih M F *et al* 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 3091
- [ 20 ] Klotz M *et al* 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 1423
- [ 21 ] Chen Z G *et al* 2003 *Opt. Mat.* **23** 235
- [ 22 ] Buse K *et al* 1997 *Phys. Rev. B* **56** 1225
- [ 23 ] Chen F S 1969 *J. Appl. Phys.* **40** 3389
- [ 24 ] Peithmann K 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 586
- [ 25 ] Günter P and Huignard J P 1988 *Photorefractive materials and their applications I* ( Berlin : Springer-Verlag ) p12
- [ 26 ] Abramowitz M and Stegun I 1972 *Handbook of Mathematical Functions* ( New York : Dover ) p295
- [ 27 ] Zhao J L *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1972 ( in Chinese ) [ 赵建林等 2002 物理学报 **51** 1972 ]
- [ 28 ] M. Born and E. Wolf 1978 *Principles of Optics I* ( Beijing : Science Press ) p165 ( in Chinese ) [ M 波恩 E 沃夫 1978 光学原理 上册 ( 北京 : 科学出版社 ) 第 165 页 ]

# Analyses of guiding properties of light-induced planar waveguides in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystals<sup>\*</sup>

Zhang Peng<sup>†</sup> Zhao Jian-Lin Yang De-Xing Wang Mei-Rong Sun Yi-Dong

( *Department of Applied Physics , Northwestern Polytechnical University , Xi 'an 710072 , China* )

( Received 13 November 2003 ; revised manuscript received 9 February 2004 )

## Abstract

To our knowledge , we first deduced the analytic expression of the index-change-distribution in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal induced by a Gaussian sheet beam considering the photorefractive one-center model and the photovoltaic charge carriers transport mechanism. A planar waveguide structure was fabricated by sheet beam illumination employing the sandwich method in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal. The index distribution in the waveguide region was measured by using interferometric technique and the guiding test was also performed. The rationality of the deduced analytic expression was demonstrated by the fitting results of the measured data point. Based on the ray equation , the guiding properties of the light-induced waveguide were analyzed by using numerical simulation. The results show that the interferometric technique is valid for measuring the index distribution of waveguide with large width , and the guiding properties of the light-induced waveguide structures depend on the waveguide width strongly. Using sheet beam with small width , planar waveguide structure with high quality can be fabricated in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal. And the analytic expression of the index-change-distribution can be employed to predict the guiding properties of the light-induced waveguide.

**Keywords :**  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  , light-irradiation , planar waveguide , guiding properties , Gaussian sheet beam

**PACC :** 4265 , 4280L

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No.60077018 ).

<sup>†</sup> E-mail :zhp17171@eyou.com ;Tel 029-88495724.