

LiNbO₃:Fe 晶体中光写入波导时 折射率的变化规律^{*}

杨德兴^{1)†} 赵建林¹⁾ 张 鹏¹⁾ 李碧丽¹⁾ 冯锡淇²⁾

¹⁾ (西北工业大学应用物理系光子学研究室, 西安 710072)

²⁾ (中国科学院上海硅酸盐研究所无机功能材料重点实验室, 上海 200050)

(2002 年 7 月 29 日收到, 2002 年 9 月 9 日收到修改稿)

研究了利用光辐照法制作光折变波导时 LiNbO₃:Fe 晶体中折射率变化的规律. 分别采用波长为 632.8nm 和 532nm 的寻常偏振和非常偏振的细激光束和片状激光束, 在 LiNbO₃:Fe 晶体中进行了写入波导实验. 研究表明, 制作波导的写入光宜采用寻常偏振光. 在利用由光束辐照 LiNbO₃:Fe 晶体形成的正折射率变化区域作为波导结构时, 必须严格控制辐照时间. 否则, 由于长时间光辐照会带来较强的噪音栅以及折射率变化区域会发生扩展, 而难以形成优质波导. 利用片光在“三明治”方式辐照下, 以小曝光量制作波导时, 可以避免噪音栅的影响, 形成高质量的对称型光波导. 通过选择不同的光束宽度和片光间距, 可以制作具有不同折射率分布和不同尺寸的光波导.

关键词: 光致折射率变化, 光折变波导, 光辐照法, LiNbO₃:Fe 晶体

PACC: 4265, 4280L

1. 引 言

掺铁的铌酸锂(LiNbO₃:Fe)晶体作为目前应用最为广泛的光折变材料之一, 具有较高的光折变灵敏度和良好的机械稳定性, 并且比较容易获得高光质量的晶体, 因而在光学信息处理、全息数据存储以及集成光学器件等领域备受关注. 由于 LiNbO₃:Fe 晶体在毫瓦量级功率的激光辐照下产生的折射率变化可达 10^{-4} — 10^{-3} ^[1], 并且这一变化既可以通过整体或局部加热的方式固定下来, 也可以通过加热进行擦除^[2-5], 因此, 利用激光辐照在晶体表面或体内写入光折变波导, 有可能成为在 LiNbO₃:Fe 晶体中制作多功能光折变波导的重要方法之一. 目前, 对于在 LiNbO₃:Fe 晶体中利用光辐照法进行光折变波导制作的研究已有不少相关报道^[6-10], 但对于波导制作过程中晶体内折射率变化规律的研究却未见报道. 由于光辐照法是利用晶体中的光致折射率变化来制作波导, 所以, 研究波导制作过程中晶体内折

射率变化规律, 对于控制和改善波导的折射率分布以及波导的位置和质量, 都有非常重要的意义. 出于不同的目的, 使用不同的方法, 对 LiNbO₃:Fe 晶体中光致折射率变化规律的研究一直受到广泛关注. Chen^[1]于 1969 年采用偏光干涉法测量了细光束辐照导致的折射率变化 $\Delta(n_e - n_o)$. Shiratori 等^[11]于 1998 年和 Peithmann 等^[12]于 2000 年分别采用马赫-曾德干涉仪光路, 对 LiNbO₃ 晶体中的光致折射率分布进行了研究. 本文主要讨论由光辐照法制作波导时, LiNbO₃:Fe 晶体在细光束辐照和片状光束以“三明治”方式^[9]辐照下的折率变化规律, 并得出对波导制作有益的一些结论.

2. 实验装置

采用图 1 所示的光路进行波导写入和折射率分布测量. 经扩束准直的 He-Ne 激光束(波长为 632.8nm)通过分光棱镜 BS, 反射镜 M, 透镜 L 和 CCD 构成马赫-曾德干涉仪光路, 用于测量晶体中的折射率变化. 其中光束 1, 2 分别为用于制作光波导

^{*} 国家自然科学基金(批准号 60077018)资助的课题.

[†] 联系人, 电话 029-8495724(办), E-mail: dxxyang168@eyou.com

的细激光束和由柱透镜产生的片状激光束. 晶体样品 $\alpha(\text{LiNbO}_3:\text{Fe})$ 的光轴同时垂直于辐照晶体的光束以及测量光束, 并且其后表面置于透镜 L_1 的前焦平面, CCD 的靶面位于透镜 L_2 的后焦平面. 透镜 L_1 与 L_2 , L_3 与 L_2 分别构成 $4f$ 系统, 其作用是将通过晶体后表面的光束变换到 CCD 靶面上与另一束光形成干涉条纹, 并经 CCD 作光电转换后由图像卡采集. 通过调节 M_2 可以调整干涉条纹的方向及疏密. 实验所用的晶体样品分别为掺铁浓度为 0.03wt% 的 xz 切薄片 LiNbO_3 晶体(厚度为 0.65mm)和掺铁浓度为 0.07wt% 的块状 LiNbO_3 晶体(尺寸为 4.8mm \times 4.8mm \times 4.8mm). 写入光束分别采用波长为 632.8nm 和 532nm 的寻常和非寻常平面偏振光, 两光源的输出功率分别为 30mW 和 60mW. 当利用片光以“三明治”方式进行波导制作时, 通过沿 c 轴移动晶体完成两次曝光. 实验过程中用于折射率测量的 He-Ne 激光为非常光, 并且强度被调至很小以保证写入的波导不被擦除. 晶体中的折射率变化通过对 CCD 接收到的干涉条纹变化进行测量而得到, 与测量光纤芯径折射率分布的切片干涉法类似.

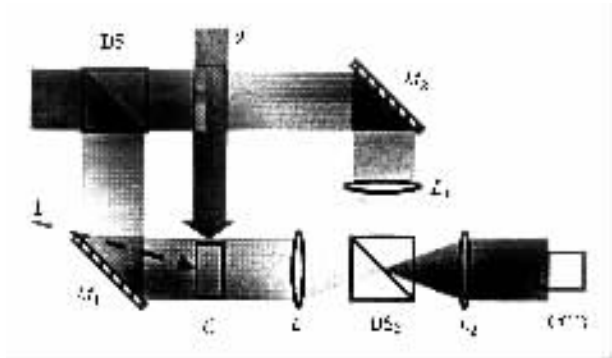


图1 波导写入和折射率测量实验装置 BS 为分光棱镜, L 为傅里叶透镜, M 为反射镜, CCD 为电荷耦合器件, C 为 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体, 1 为细激光束 2 为片状激光束

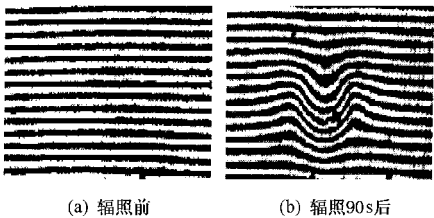


图2 细光束辐照片状 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体时 CCD 接收到的干涉条纹图样

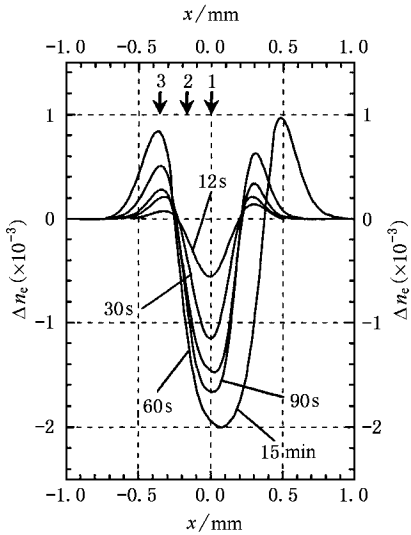


图3 细光束辐照片状 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体时, 辐照不同时间后沿辐照区中平行于 c 轴的光斑直径方向的折射率变化分布

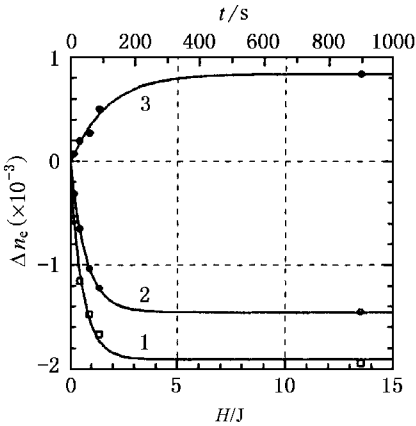


图4 与图3中箭头 1, 2, 3 所对应的辐照区中三个特征点的折射率变化量与辐照时间(或曝光量)的关系

3. 实验结果及讨论

实验结果表明, 两种波长的激光都可以使晶体的非常光折射率发生显著的变化, 而寻常光的折射率变化却小得多, 并且非常光和寻常光引起的折射率变化差别不大. 由于在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中寻常光的光感应光散射效应比非常光小得多^[13], 也就是说非常光辐照晶体时的光致噪音栅的折射率调制度更大, 这对于制作高质量的波导是不利的, 因此制作波导时应选择寻常光作为写入光. 本文只给出在波长为 532nm 的寻常光辐照下, 对我们所关心的非常光折射率变化量 Δn_e 的研究结果.

3.1. 细光束辐照下晶体折射率的变化规律

图 2 给出了细光束辐照薄片 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体时,由 CCD 接收到的干涉条纹图样.其中(a)图对应光照前的辐照区,(b)图对应辐照 90s 后的辐照区,条纹方向平行于光轴.对不同辐照时间下晶体的非常光折射率沿辐照区中平行于 c 轴的光斑直径方向的变化 Δn_e 进行了测量.结果如图 3 和图 4 所示.图 3 为不同辐照时间下测量区域中 Δn_e 的分布图,与早期 Chen^[1]用偏光干涉法测得的结果相似,图中两侧的高折射率区可以作为非对称波导使用.图 4 为与图 3 中箭头 1、2、3 所对应的辐照区中三个特征点(分别代表辐照区域中心点、中心左侧辐照光束二分之一束腰处和暗区折射率变化峰值点)的折射率变化量随辐照时间或曝光量的变化关系及拟合曲线.拟合结果表明,三个特征点的折射率变化量 Δn_e 随曝光量呈 $[a - b \exp(-cH)]$ 形式的指数变化,其中 a, b, c 为与辐照区内各点位置有关的系数, H 为曝光量.同时可以看出,当辐照时间达到 100s(相当于接收到了 1.5J 的能量)后,特征点 1、2 处的 Δn_e

趋于稳定,而特征点 3 处的 Δn_e 则在 200s(相当于接收到了 3.0J 的能量)后才逐渐趋于稳定.此外,从图 3 还可以看出,当辐照时间较长时,折射率变化区域会向 $+c$ 轴方向(右侧)扩展,这种偏移将直接影响波导区的位置.同时,由于辐照时间较长时,光感应光散射导致的噪音栅可能会使波导质量显著下降.因此,利用因细光束辐照 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体而在光斑两侧形成的正折射率变化峰作为波导时,必须严格控制辐照时间.

3.2. 片光以“三明治”方式辐照晶体时折射率的变化规律

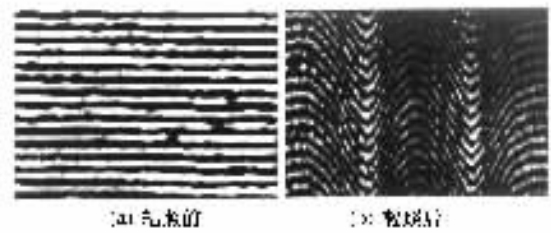


图 5 片光以“三明治”方式在块状 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中写入波导时的干涉条纹图样(片光间距约为 1 倍光斑束腰宽度,曝光时间为 60min)

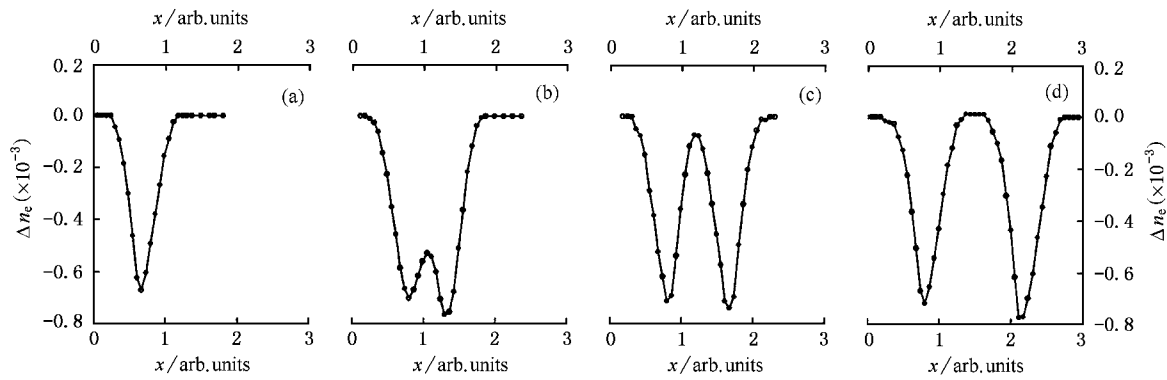


图 6 片光以“三明治”方式在块状 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中写入波导时的非常光折射率沿 c 轴方向的变化 (a)为单片光照射的结果;(b)(c)及(d)为“三明治”方式辐照后的结果,片光间距分别为片光束腰的 0.5、1 和 1.5 倍,曝光时间均为 60min

寻常偏振的片光以“三明治”方式在块状 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中制作波导的结果如图 5 和图 6 所示.图 5 是在片光间距约为 1 倍光斑束腰宽度、曝光时间约为 60min 的情况下得到的干涉条纹图样.其中图 5(a)和 5(b)分别为辐照前和辐照后的干涉条纹图样.图 6 为不同间距情况下沿 c 轴方向的非常光折射率变化量 Δn_e 的分布图.其中(a)为单片光照射的结果,(b)(c)及(d)为“三明治”方式辐照的结

果.片光间距分别为片光束腰的 0.5、1 和 1.5 倍,曝光时间均为 60min.由于实验中采用片光辐照时的功率密度比采用细光束辐照时小得多,因此晶体在被辐照 60min 后尚未形成正的折射率峰.从图 6 可以看出,随着片光间距的增大,折射率的调制度以及波导区的宽度都逐渐增大;当片光间距增大到片光束束腰宽度附近时,折射率调制度将达到饱和,进一步增加片光间距,折射率调制度不再变化,而波导的宽

度一直增大.当片光间距约为辐照光束半个束腰宽度时,波导区折射率的峰值只有其最大时的 27% 左右.相对于最小折射率处的折射率差约为 2×10^{-4} (如图 6(b)所示).而间距为 1.5 倍束腰宽度时,得到的折射率差约为 7.3×10^{-4} (如图 6(d)所示).“三明治”方式辐照形成图 6 所示折射率分布的原因是两次曝光产生的折射率变化叠加的结果.片光间距越小,第二次辐照对第一次辐照产生的折射率变化分布的影响越大.由于折射率分布随照射间距的变化具有上述规律,因此可以通过选择不同的光束宽度和片光间距来制作具有不同折射率分布和不同尺寸的光波导.

4. 结 论

本文实验研究了在利用光辐照法制作光折变波导时,掺铁浓度分别为 0.03wt% 和 0.07wt% 的薄片

和块状 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体,在细光束和片状光束辐照时的折射率变化规律.实验结果表明,利用光辐照法制作波导时写入光宜采用寻常光.利用由细光束辐照 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体时在光斑两侧形成的正折射率变化峰作为波导时,必须严格控制辐照时间.否则,由于长时间光辐照会带来较强的噪音栅以及折射率变化区域会发生扩展而难以形成优质的波导.利用片光在“三明治”方式辐照下,以小曝光量写入波导时,可以避免噪音栅的影响,而形成高质量的对称型光波导.波导区的折射率调制度和波导宽度强烈地依赖于两次曝光的间距.随间距的增大,折射率调制度逐渐变大;当间距增大到片光束束腰宽度附近时,折射率调制度将达到饱和.进一步增加曝光间距,折射率调制度不再变化,而波导的宽度一直增大.因此可以通过选择不同的光束宽度和片光间距来制作具有不同折射率分布和不同尺寸的光波导.

- [1] Chen F S 1969 *J. Appl. Phys.* **40** 3389
- [2] Chen F S *et al* 1968 *Appl. Phys. Lett.* **13** 223
- [3] Amodei D *et al* 1971 *Appl. Phys. Lett.* **18** 540
- [4] Staebler D *et al* 1975 *Appl. Phys. Lett.* **26** 182
- [5] Arizmendi L *et al* 1998 *Opt. Lett.* **23** 960
- [6] Itoh K *et al* 1994 *Opt. Lett.* **19** 652
- [7] Matoba O *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 122
- [8] Shiratori A *et al* 1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** 225

- [9] Matoba O *et al* 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 2006
- [10] Liu S M *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 432 (in Chinese) [刘思敏等 1998 物理学报 **47** 432]
- [11] Shiratori A *et al* 1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** 225
- [12] Peithmann K *et al* 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 586
- [13] Yang D X *et al* 2000 *J. Northwest. Polytech. Univ.* **18** 190 (in Chinese) [杨德兴等 2000 西北工业大学学报 **18** 190]

The index changes of waveguides fabricated by light irradiation in LiNbO₃ :Fe crystals^{*}

Yang De-Xing¹⁾ Zhao Jian-Lin¹⁾ Zhang Peng¹⁾ Li Bi-Li¹⁾ Feng Xi-Qi²⁾

¹⁾ *Department of Applied Physics , Northwestern Polytechnical University , Xi 'an 710072 , China)*

²⁾ *Laboratory of Functional Inorganic Materials , Shanghai Institute of Ceramics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200050 , China)*

(Received 29 July 2002 ; revised manuscript received 9 September 2002)

Abstract

The refractive index changes of waveguides fabricated by light irradiation in LiNbO₃ :Fe crystals were investigated by using ordinary and extraordinary laser beams at wavelengths of 632.8nm and 532nm. The experimental results show that the waveguide fabricated by ordinary light is better than that by extraordinary light , as the ordinary light causes much less light-induced scattering. The illuminated time must be strictly controlled when the region with a positive index change , formed by a single thin laser beam , is used as waveguide structure. This is beacuse the waveguide properties may be influenced by the strong noise grating and the shift of the waveguide region after the LiNbO₃ :Fe crystal was irradiated for a long time. For avoiding the influence of the noise grating , the symmetric waveguide structure with high quality can be fabricated by sheet beam illumination employing the sandwich method at a relatively low exposure intensity. Moreover , waveguides with different index distributions and different dimensions can be fabricated by changing the width of the irradiating beam and the distance between twice irradiations.

Keywords : light-induced index change , photorefractive waveguide , light irradiation , LiNbO₃ :Fe crystal

PACC : 4265 , 4280L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.60077018).