

用光辐照法在 SBN :Cr 晶体中写入 动态阵列平面光波导^{*}

赵建林[†] 李碧丽 张 鹏 杨德兴 李振伟

(西北工业大学应用物理系, 西安 710072)

(2003 年 8 月 4 日收到, 2003 年 10 月 24 日收到修改稿)

利用扩展的准直 He-Ne 激光束通过菲涅耳双棱镜所形成的干涉光场辐照 SBN :Cr 晶体, 同时沿晶体光轴方向施加适当的直流电场, 可在晶体中形成类似于体相位光栅结构的阵列平面光波导. 采用马赫-曾德干涉仪光路实时测量了所写入阵列平面光波导的横向折射率分布, 其峰值接近 10^{-4} . 初步的导光测试结果表明, 利用周期结构光辐照并辅以适当的外加电场在 SBN :Cr 晶体中写入阵列平面光波导是可行的. 并且由于 SBN :Cr 晶体的快速响应特性, 所写入的光波导是动态的, 可随着写入光的撤除而快速消失, 或通过改变双光束夹角而写入不同周期的阵列平面光波导, 从而实现阵列光波导的动态控制. 此外, 通过改变外电场的大小可以有效地控制写入波导区折射率的大小, 以调控波导参数.

关键词: SBN :Cr 晶体, 结构光辐照, 阵列平面光波导, 折射率分布, 外电场

PACC: 4265, 4280L

1. 引 言

阵列光波导在光通信、光计算以及光学神经网络等光学并行处理系统中具有重要应用. 光折变波导同时具有光折变和光波导双重特性. 通过结构光辐照光折变晶体可以直接在晶体内部形成体波导阵列, 并且所写入的波导结构可以通过适当加热或均匀光照进行擦除, 也可以通过加热或外加电场使波导结构长期固定在晶体中, 因而是制作密集体波导和各种功能波导的一种有效方法. 迄今所报道的相关研究工作主要集中在 LiNbO₃ 晶体上^[1-6], 但 LiNbO₃ 晶体较慢的光折变响应速度影响着其动态应用. SBN(Sr_xBa_{1-x}Nb₂O₆) 晶体, 特别是掺有某些过渡金属(Ce, Cr, Rh 等)离子的 SBN 晶体, 是一种优良的光折变材料, 与 LiNbO₃ 晶体相比, 具有更大的电光系数、更高的光折变灵敏度和更快的响应速度, 因而可以用来代替 LiNbO₃ 晶体. 通过光辐照法在其中写入动态体波导. Bekker 等曾在纯质的 SBN :75($x = 0.75$)中, 通过波长为 514 nm 的 Ar⁺ 激光辐照获得

了平面和光纤状波导结构^[7]. 本文报道采用双光束干涉形成的周期性结构光辐照法在 SBN :Cr 晶体中写入动态阵列平面光波导的初步实验研究结果.

2. 实验光路布置

如图 1 所示, 实验光路由两部分组成, 即阵列平面光波导的写入光路和晶体中光致折射率变化的测量光路. 写入光路中, 由 He-Ne 激光器 1 输出的细激光束(波长 $\lambda 633$ nm, 垂直偏振)经反射镜 M_3 反射后通过倒置望远镜 T_1 扩束准直, 进而通过棱脊沿水平方向的菲涅耳双棱镜 L 产生等强度双光束干涉, 形成一组沿垂直方向排列的平行光面——周期性结构光, 以此作为写入光束辐照晶体(c 轴沿垂直方向), 同时沿晶体的 c 轴施加正向直流外电场 E_0 . 测量光路为一个马赫-曾德干涉仪^[6], 由非偏振分光棱镜 BS_{*i*}($i = 1, 2$)、反射镜 M ($i = 1, 2$)、透镜 L_i ($i = 1, 2, 3$) 和 CCD 构成. 自 He-Ne 激光器 2 输出的细激光束(波长 $\lambda 633$ nm)经倒置望远镜 T_2 扩束准直后进入干涉仪. 透镜 L_1 与 L_2 , L_3 与 L_2 构成两个 $4f$ 成

^{*} 国家自然科学基金(批准号 60077018)资助的课题.

[†] E-mail: jlzha@nwpu.edu.cn

像系统,前者的作用是将自晶体后表面出射的光束变换到 CCD 光敏面上并使之与来自后者的平行光产生干涉.偏振片 P 的作用是将测量光束调节为垂直偏振,以与晶体光轴平行(使读出光在晶体中为 e 光).激光束的功率密度调至很小,以避免引起附加的折射率变化.两部分光路之所以组合在一起,是因为 SBN 晶体的光折变响应速度很快,一旦撤掉写入光束,所写入的波导即刻就会消失,因此必须进行实时测量.

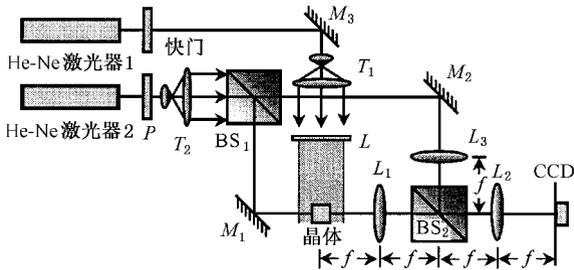


图 1 SBN :Cr 晶体中写入阵列平面光波导的实验光路

实验中使用了两块经单畴化处理的固溶同成分 ($x = 0.61$)SBN :Cr 晶体样品,其掺 Cr 浓度分别为 1/2000 和 1/1000,几何尺寸分别为 $5.5 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm} \times 4.4 \text{ mm}$ 和 $6.6 \text{ mm} \times 6.7 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$.同时,实验中使用了两块角度不同的菲涅耳双棱镜,所形成的干涉条纹的周期分别为 $100 \mu\text{m}$ (1#) 和 $60 \mu\text{m}$ (2#).

3. 光写入阵列平面光波导的实验结果

3.1. 掺 Cr 浓度为 1/2000 的晶体样品

将掺 Cr 浓度为 1/2000 的晶体样品置于图 1 所示光路中,在干涉光场辐照晶体的同时,沿晶体的 c 轴方向施加直流外电场 E_0 ,即可在晶体中引起明显的折射率变化.图 2 给出了外加电场 E_0 分别为 1500V (341V/mm) 和 2000V (455V/mm) 且干涉条纹周期为 $100 \mu\text{m}$ (1# 双棱镜) 时,由马赫-曾德干涉仪光路测量得到的实验结果.其中图 2(a) 和 (c) 为经晶体调制的干涉图样,图 2(b) 和 (d) 为晶体在平行光垂直照射下的投影图样.干涉条纹的周期性弯曲或投影图样中亮线的出现均说明晶体的折射率发生了周期性变化.图 3 为采用干涉法^[8,9]测得的阵列平面光波导沿某一横截面的相对折射率分布曲线.从图 3 可以看出:所写入阵列平面光波导的周期为 $100 \mu\text{m}$.外加电场为 341V/mm 时,测得折射率变化的最大值为 0.62×10^{-4} ;外加电场为 455V/mm 时,折射率变化的最大值为 0.74×10^{-4} .即外加电场增大时,折射率变化值也增大.这是因为折射率的变化与空间电荷场成正比,而后者随外电场的增大而增大^[10].该结果表明,可以通过改变外加电场的大小来适当调控写入波导的折射率参数.

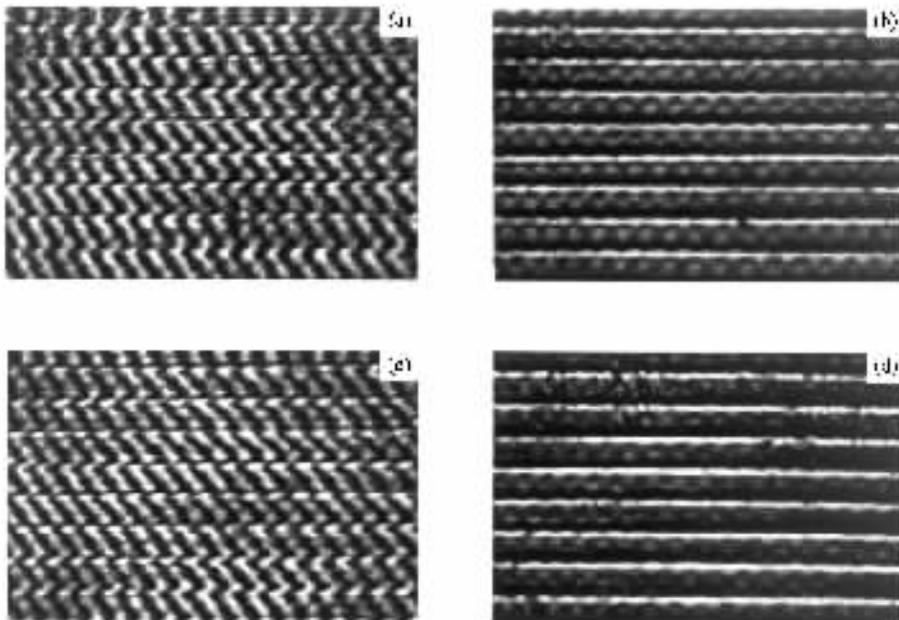


图 2 不同外电场作用下 SBN :Cr 晶体中写入阵列平面光波导的实验结果(掺 Cr 浓度 :1/2000,采用 1# 双棱镜) (a) 干涉图样 (341V/mm) (b) 投影图样 (341V/mm) (c) 干涉图样 (455V/mm) (d) 投影图样 (455V/mm)

保持上述写入阵列平面波导的实验条件不变, 仅将干涉条纹周期变为 $60 \mu\text{m}$ (2# 双棱镜), 所得结果如图 4 所示. 图 5 为相应的阵列平面光波导的折射率分布测量曲线. 由于干涉条纹很密, 为了便于观

察 图 4 中作了适当放大. 由图 5 可见 所写入阵列平面光波导的周期约为 $60 \mu\text{m}$. 外加电场为 341 V/mm 时 折射率变化的最大值为 0.66×10^{-4} ; 外加电场为 455 V/mm 时, 折射率变化的最大值为 0.80×10^{-4} .

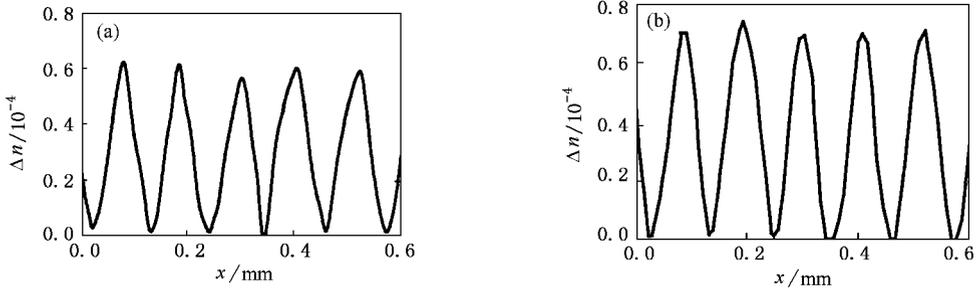


图 3 不同外电场作用下 SBN :Cr 晶体中写入的阵列平面光波导的横向折射率分布(掺 Cr 浓度 :1/2000 采用 1# 双棱镜)
(a) $E_0 = 341 \text{ V/mm}$. (b) $E_0 = 455 \text{ V/mm}$

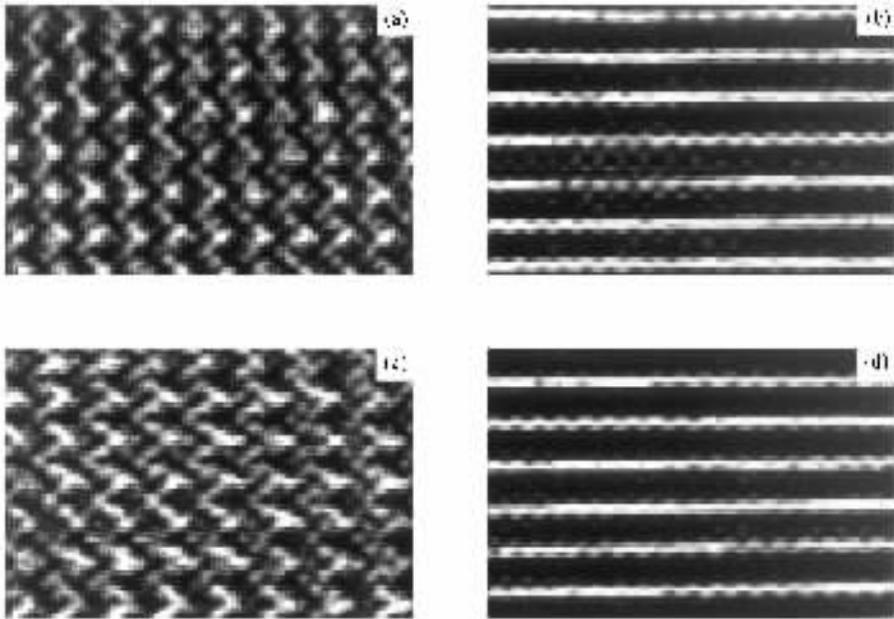


图 4 不同外电场作用下 SBN :Cr 晶体中写入阵列平面光波导的实验结果(掺 Cr 浓度 :1/2000 采用 2# 双棱镜) (a)干涉图样(341 V/mm) (b)投影图样(341 V/mm) (c)干涉图样(455 V/mm) (d)投影图样(455 V/mm)

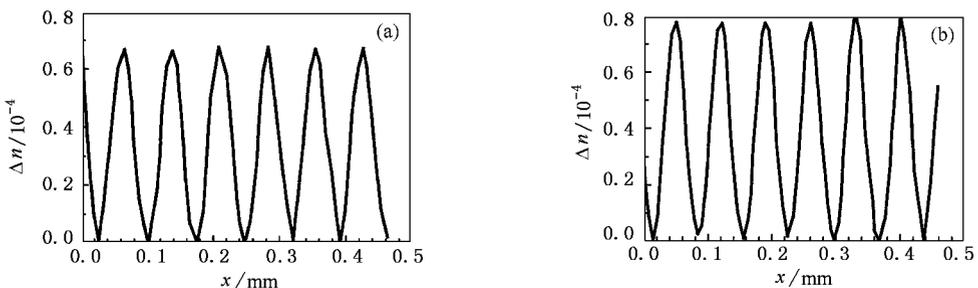


图 5 不同外电场作用下 SBN :Cr 晶体中写入的阵列平面光波导的横向折射率分布(掺 Cr 浓度 :1/2000 采用 2# 双棱镜)
(a) $E_0 = 341 \text{ V/mm}$ (b) $E_0 = 455 \text{ V/mm}$

3.2. 掺 Cr 浓度为 1/1000 的晶体样品

将掺 Cr 浓度为 1/1000 的晶体样品置于图 1 光路中,用周期为 100 μm 的干涉光场(1# 双棱镜所形成)辐照晶体,同时沿晶体的 c 轴施加正向直流外电场 E_0 ,同样在晶体中写入了阵列平面光波导. 图

6 给出外加电场 E_0 为 272 和 364V/mm 时写入阵列平面光波导的实验结果. 图 7 所示为相应的阵列平面光波导的横向折射率分布测量曲线. 其中,外加电场为 272V/mm 时,测得折射率变化的最大值为 0.84×10^{-4} ;外加电场为 364V/mm 时,折射率变化的最大值为 0.88×10^{-4} .

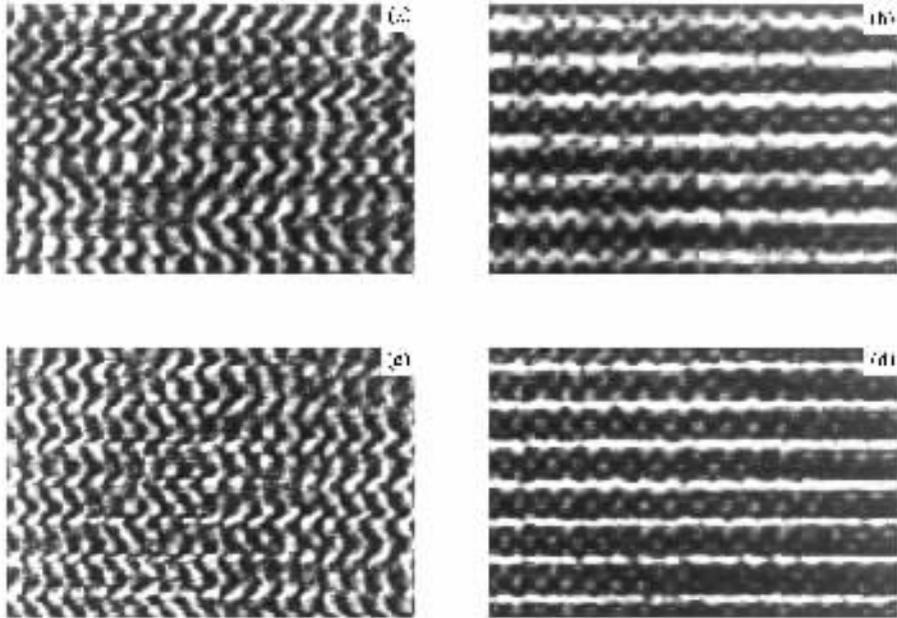


图 6 不同外电场作用下 SBN :Cr 晶体中写入阵列平面光波导的实验结果(掺 Cr 浓度 :1/1000,采用 1# 双棱镜) (a)干涉图样(272V/mm) (b)投影图样(272V/mm) (c)干涉图样(364V/mm) (d)投影图样(364V/mm)

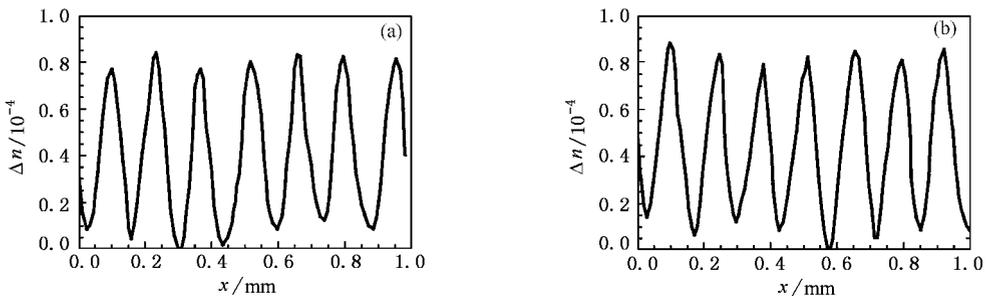


图 7 不同外电场作用下 SBN :Cr 晶体中写入的阵列平面光波导的横向折射率分布(掺 Cr 浓度 :1/1000,采用 1# 双棱镜) (a) $E_0 = 272\text{V/mm}$ (b) $E_0 = 364\text{V/mm}$

4. 阵列平面光波导的性能测试

由于 SBN :Cr 晶体的响应速度很快,须对写入的阵列平面光波导进行实时的导光测试. 在图 1 测量光路中反射镜 M_1 到晶体之间插入短焦距的会聚

透镜,通过调节使会聚点正好位于阵列光波导的一个导光层端面,在干涉光场辐照晶体的同时,观察其后端面的出射光束,结果如图 8 所示. 可以看出,写入波导前,晶体后端面的出射光强分布为圆形光斑. 写入波导后,导波光束被限制在平面光波导中传输,出射光强分布变为沿波导层扩展的带状光斑. 撤掉



外电场和写入光束,所写入的波导很快便消失,出射光束恢复原状。可见,所写入波导是一种动态光

波导。

关掉图 1 中用于测量的 He-Ne 激光器 2,在

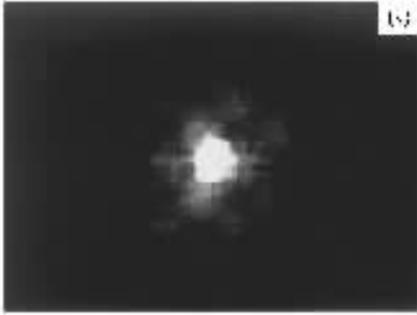


图 8 阵列平面光波导的导光测试结果 (a) 无导光 (b) 导光后

SBN :Cr 晶体中写入阵列平面波导的同时,代替图 1 中的测量光束,从晶体的左侧沿测量光束行进方向引入一束波长为 532 nm 且功率密度很小的细激光束,并垂直照射晶体,用线阵 CCD 接收到的衍射光强分布如图 9 所示。实验中,实际可用肉眼观察到多级衍射条纹,但高级次相对较弱,无法正常显示出来,故图中只有 0 级和 ± 1 级。

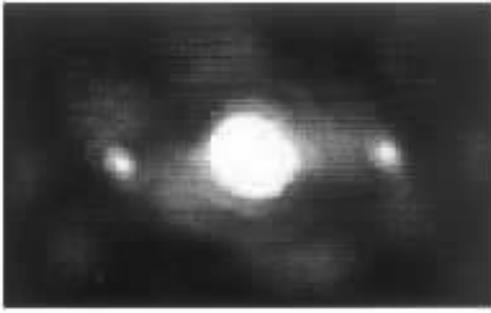


图 9 阵列平面光波导的衍射图样

5. 结 论

利用平行光通过双棱镜形成的干涉光场辐照 SBN :Cr 晶体,同时沿晶体的 c 轴方向施加适当的正向直流外电场,可以在晶体中引起折射率的空间周期性变化。初步的导光测试结果表明,这种折射率的周期性空间结构可以作为动态阵列平面光波导。采用不同的双棱镜或其他的双光束干涉装置(如菲涅耳双面镜、洛埃镜以及迈克耳孙干涉仪和马赫-曾德干涉仪等),通过调节两束干涉光之间的夹角,可以方便地写入不同周期的阵列平面光波导。由于 SBN :Cr 晶体具有较高的光折变灵敏度和较快的响应速度,并且所写入波导的折射率变化的大小可以通过改变外加电场的幅度来控制,这对于实现空间动态光互联和光光调制的应用研究具有十分重要的意义。

- [1] Itoh K *et al* 1994 *Opt. Lett.* **19** 652
- [2] Matoba O *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 122
- [3] Matoba O *et al* 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 2006
- [4] Liu S M *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 432 (in Chinese) [刘思敏等 1998 物理学报 **47** 432]
- [5] Zhao J L *et al* 2003 *Acta Phot. Sin.* **32** 426 (in Chinese) [赵建林等 2003 光子学报 **32** 426]
- [6] Zhang P *et al* 2003 *Appl. Opt.* **42** 4208
- [7] Bekker A *et al* 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 3121
- [8] Shiratori A *et al* 1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** 225
- [9] Yang D X *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1179 (in Chinese) [杨德兴等 2003 物理学报 **52** 1179]
- [10] Liu S M *et al* 1992 *Photorefractive Nonlinear Optics* (Beijing : Standards Press of China) p29 (in Chinese) [刘思敏等 1992 光折变非线性光学(北京:中国标准出版社)第 29 页]

Fabrication of dynamic planar waveguide array in SBN :Cr crystals by structure-light irradiation *

Zhao Jian-Lin[†] Li Bi-Li Zhang Peng Yang De-Xing Li Zhen-Wei

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

(Received 4 August 2003 ; revised manuscript received 24 October 2003)

Abstract

A planar waveguide array , whose structure is similar to a volume phase grating , can be fabricated in a congruent SBN :Cr ($\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$:Cr) crystal by irradiation of two-beam interference pattern , and , simultaneously , by applying an appropriate direct electrical field along the c -axis of the crystal . The transversal index profile of the waveguide array is measured in real-time using a Mach-Zehnder interferometer , and the maximum index change in the waveguide region is close to 10^{-4} . The initial guiding tests show that it is feasible to write a dynamic planar waveguide array in the SBN :Cr crystal by using irradiation of period structure-light , due to the rapid response property of SBN :Cr crystals . And the dynamic control of the waveguide can be realized by switching the writing lights on or off , or adjusting the angle of the two interferent beams . Moreover , the waveguide parameter such as the index profile in the waveguide zone can be effectively controlled by varying the external electric field .

Keywords : SBN :Cr crystal , structure-light irradiation , dynamic planar waveguide array , index profile , external electric field

PACC : 4265 , 4280L

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

[†]E-mail : jlzha@nwpu.edu.cn