

平面波导阵列布喇格光栅及其光辐照制作方法*

杨德兴 张鹏 赵建林 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 本文提出了一种新的平面波导阵列布喇格光栅结构,并给出了在光敏感材料中制作这种波导光栅结构的全息光辐照方法.以 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体作为光敏感材料,用不同空间频率的双光束干涉条纹辐照后,通过数字全息技术对晶体的光致折射率分布测量和进行的导波衍射测试结果表明,利用这种光辐照方法在光敏感材料中制作平面波导阵列全息布喇格光栅是完全可行的.其显著的导波衍射现象表明,如果在平面波导阵列中制作多重布喇格光栅,有可能使其成为超密集波分复用(UDWDM)系统中波长复用/解复用的核心器件.

关键词 波导布喇格光栅;平面波导阵列;激光干涉辐照

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

通过体全息技术在光折变晶体、玻璃以及聚合物等光敏感材料中写入多重体光栅^[1],可以利用布喇格光栅的窄带滤波和多重光栅的多信道特性来实现光通信中的复用/解复用.由多重体光栅组成的器件不需要机械装置、环形器、干涉仪等辅助设备,最重要的是,利用一块全息材料就可以对多个信道同时进行解复用,这就大大提高了设备的使用效率.近几年来,在光敏感材料中制作多重体光栅及有关应用研究引起了一些著名研究机构的重视.1998年,S. Breer 和 K. Buse 用 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体实现了在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 区域两个信道的解复用^[2].2001年取得了较大的进展,韩国 W. An 等人^[3]设计了基于 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体的 16 信道,波长间隔为 0.5 nm 的解复用器,且串扰低至 30 dB 、各信道 3 dB 带宽为 0.16 nm ,2002年^[4]报道了采用这种技术制作的一种 50 GHz 的 42 信道解复用器.2002年,Ph. Dittrich 等人^[5]利用带间光折变效应,在纯质 KNbO_3 晶体中记录了动态体全息反射光栅滤波器,其 3 dB 带宽为 0.13 nm ,具有很高的波长选择性,并且调谐时间非常短(对于较弱的记录光强,调谐时间可达数百微秒数量级).2003年,O. Beyer 等人^[6]提出了利用光折变聚合物制作波分复用器的设想,并在聚合物中记录了四重光栅,其衍射效率高达 99% .在产品化方面,Caltech(加州理工)的 D. Psaltis 等人^[7]利用风险投资(其中有科宁、阿尔卡特等公司)于2000年在加利福尼亚的蒙罗维亚(Monrovia)组建了名为 Ondax 的全光器件公司,推出了利用

LiNbO_3 光折变晶体制成的满足标准 ITU (the International Telecommunication Union) 波长的体布喇格光栅光通信器件,其产品主要有波长固定和可调谐的光插分复用器(OADM: optical add-drop multiplexer),以及可调谐带通滤波器,各产品的插入损耗低于 2 dB .这些工作都是在整块材料中形成多重光栅或在一块材料中形成条形分区的体光栅.本文提出一种以平面波导阵列分层的全息布喇格光栅,这种结构既可以保持严格的布喇格选择性,又可充分利用材料的体积形成超密集的布喇格光栅.通过全息光辐照方法在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中形成的平面波导阵列全息布喇格光栅,验证在光敏感材料中形成这种新型波导光栅的可行性以及将其用于波分复用的可能性.

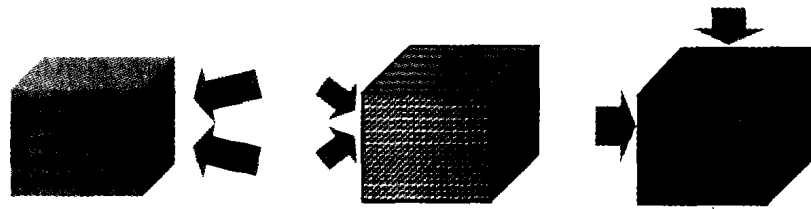
1 平面波导阵列布喇格光栅

利用空间频率不同的双光束干涉图样以一定的夹角先后两次或两对双光束同时辐照体块光敏感材料,在其中产生两种周期性折射率分布,两种分布的排列方向相互垂直.这种结构可以作为平面波导阵列布喇格光栅,其中与低、高空间频率的干涉图样对应的结构分别作为平面波导阵列^[8]和布喇格光栅,每个波导上都有布喇格光栅.在低频干涉图样写入平面波导阵列的基础上,利用高频干涉图样以不同角度多次曝光可以在波导中写入多重布喇格光栅,从而形成平面波导阵列多重布喇格光栅.其典型结构与制作方法如图1所示,其中图1(a)为制作平面波导阵列的示意图,图1(b)为在平面波导阵列中通过透射全息和邻面照射法制作布喇格光栅的示意图,根据需要也可以通过反射全息法制作相应的布喇格光栅.

*国家自然科学基金资助项目(60077018)

Tel:029-88495724 Email:dxyang@nwpu.edu.cn

收稿日期:2004-05-12



(a) Fabricating PWA by two-beam interference (b) Fabricating holographic Bragg grating (HBG) in the PWA

图1 平面波导阵列布喇格光栅结构及光辐照制作方法

Fig. 1 The structure of planar waveguide array (PWA) with Bragg grating and its fabrication method by laser irradiation

为了证实上述想法的可行性,以掺铁 0.05wt%、几何参数为 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ 的 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体(光轴平行于棱边)作为光敏感材料,采用两次辐照法尝试在其中写入平面波导阵列单重布喇格光栅,并研究其导光特性. 由于 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中的光折变效应是各向异性的,其光致折射率变化主要来自沿晶体光轴(c 轴)方向的光致空间电荷场通过线性电光效应调制的贡献,而且光致电荷主要沿 c 轴方向迁移^[9]. 因此要在晶体中写入周期变化的折射率分布,就必须在 c 轴方向上具有周期性分布的光强^[10,11]. 实验中两次辐照均从晶体的同一个表面入射,且使两干涉条纹排列方向相互垂直且均与 c 轴成 45° 角,以便两次照射都可以使折射率产生明显的周期性变化. 实验光路及晶体与干涉图样间的空间取向关系如图 2 所示. 图 2(a)为实验光路示意图. 两束经扩束准直的波长为 532 nm 的连续波相干激光束,形成等强度干涉场. 晶体以特定的空间取向置于干涉场中. 图 2(b)、(c)分别为采用低、高空间频率的干涉条纹辐照 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体写入平面波导阵列和布喇格光栅时,晶体在双光束干涉场中的空间取向. 两次辐照过程中,通过将晶体旋转 90° 实现空间取向的改变,通过调整两束写入光之间的夹角来获得不同空间频率的干涉条纹.

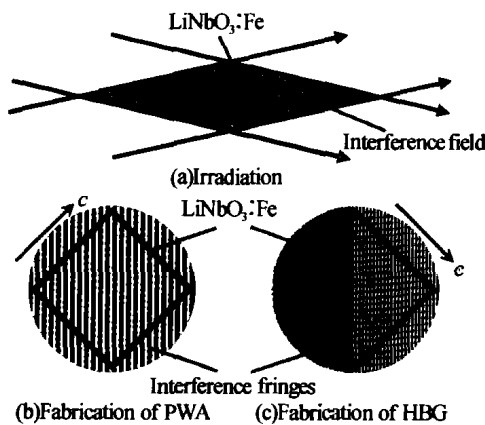


图2 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中光写入平面波导布喇格光栅阵列的实验光路及干涉条纹与晶体取向之间的关系

Fig. 2 The Scheme of fabricating the PWA with HBG and the geometry of the crystal axis and the interference fringes

2 实验结果

晶体样品以图 2(b)所示的空间取向置于夹角

约为 0.7° 的双光束干涉场中,此时,平均光功率密度约为 $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$,晶体内干涉条纹的频率约为 $10 \text{ lp}/\text{mm}$,曝光 30 min 后,得到的实验结果如图 3 所示. 其中,图 3(a)为干涉场辐照后,晶体在平行光照射时的近场投影图,3(b)为由数字全息术^[12]测得的部分平面波导区的非常光折射率变化分布曲线. 图 4 为对所制作平面波导阵列进行导光测试的光路及结果. 导光光路如图 4(a)所示,扩束准直的

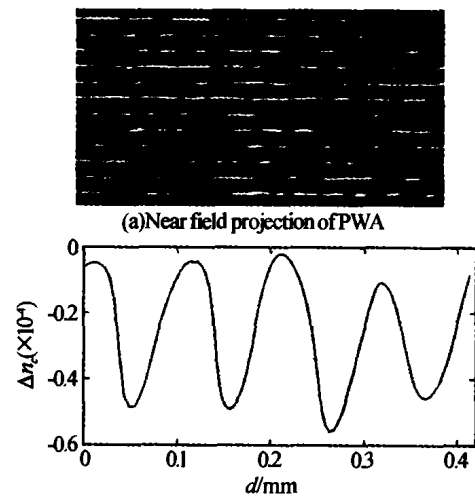
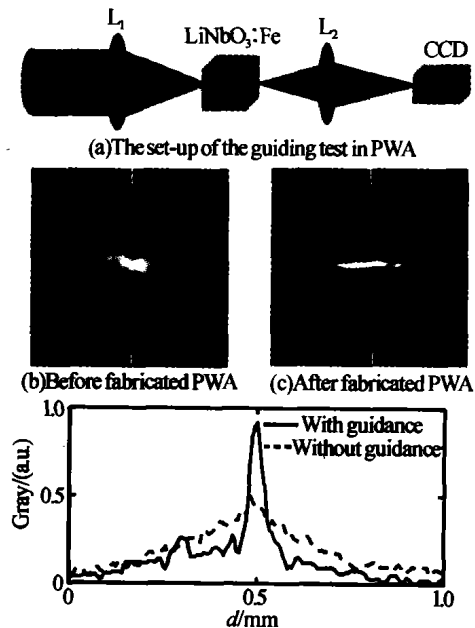


图3 晶体中写入平面波导阵列的实验结果
Fig. 3 The measurement results of the fabricated PWA

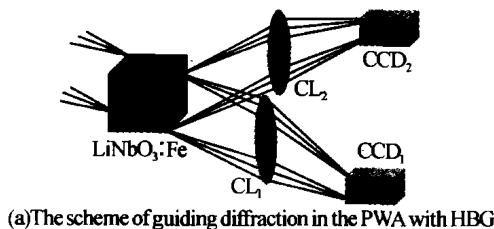


(d) The gray distributions along the direction of the white lines in (b) and (c)

图4 平面波导阵列导光实验结果
Fig. 4 The guidance test in the PWA

He-Ne 激光束 ($\lambda = 633 \text{ nm}$) 经透镜 L_1 会聚于晶体前表面, 透镜 L_2 将晶体的后表面成像于 CCD 靶面. 图 4(b)、(c) 分别为波导阵列写入前后 CCD 接收到的光斑图样, 可以看出晶体中写入波导阵列前, CCD 接收到一弥散光斑; 写入波导阵列后, 当探测光会聚于波导阵列中一条波导的前端时, 由 CCD 接收到的光斑变为一条亮线, 表明光束在晶体中被约束在一个平面内传播. 竖直移动晶体, 上述现象周期性地出现. 图 4(d) 中的两条曲线分别是沿图 4(b) 和 4(c) 中短白线方向的灰度分布, 从中能明显看出干涉条纹照射晶体对光束传播行为的影响. 上述结果表明, 晶体中已经形成了周期性的平面波导阵列.

将写入平面波导阵列后的晶体样品在干涉场中绕晶体入射表面法线旋转 90° (即得到图 2(b) 所示的空间取向关系) 后, 调节双光束夹角至 55° , 以便在晶体中形成空间频率约为 800 lp/mm 的干涉条纹, 此时平均光功率密度为 3 mW/cm^2 . 将曝光 60 min 后的晶体, 放入图 5(a) 所示的光路中观察波导的导光衍射现象. 利用一束入射方向满足布喇格条件的会聚于晶体前表面且焦点与波导平面平行的柱面波在平面波导中激发导模, 分别在晶体后布喇格光栅直透方向 (0 级衍射方向) 和 $+1$ 级衍射方向放置柱透镜 CL 和 CCD 摄像机, 并调节 CL 和 CCD 的位置使晶体后表面成象于 CCD 靶面上, 以观察写入布喇格光栅后波导的导光情况. 上下缓慢移动晶体, 在 CCD_1 和 CCD_2 中可以同时周期性地观察到图 5(b) 和 5(c) 中的亮线. CCD_2 在偏离衍射方向上, 未观察到衍射光; 且当入射光不满足布喇格条件时, 也未观察到衍射光. 这表明平面波导中的布喇格光栅具有严格的角度选择性, 根据布喇格条件 $2\Lambda \sin \theta = \lambda$ (只取 $+1$ 级, 其中 Λ 为布喇格光栅周期, λ 为光波长, θ 为入射角) 可知, 这种波导布喇格光栅也同样具有严格的波长选择性. 由于导波衍射实验中的



(a) The scheme of guiding diffraction in the PWA with HBG



(b) The guidance pattern in CCD_1 (c) The diffraction pattern in CCD_2

图 5 写入布喇格光栅后的平面波导阵列的导光光路与实验结果

Fig. 5 The guiding diffraction test in the PWA with HBG

入射光不是平行光, 这与写入光栅时的条件不一样, 因此不能完全满足布喇格条件, 从而导致观察到的衍射光较弱. 因此, 只要通过适当的方法获得薄的片状平行光, 就可以得到很好的滤波衍射效果.

3 结论

本文提出了一种新的平面波导阵列布喇格光栅结构, 可以通过全息光辐照方法在光敏感材料中形成这种结构. 通过对 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体所做的实验表明, 用文中描述的方法可以在光敏感材料中获得预想的折射率空间三维结构, 这种结构在波导平面内具有很好的导波衍射行为, 其衍射光具备布喇格衍射的基本特性. 根据全息存储的角度复用特性, 还可以在这种平面波导阵列中制作衍射不同波长的多重布喇格光栅, 因此有可能用于波分复用系统. 由文献 [13] 可知, 在 LiNbO_3 晶体中利用双光束干涉图样写入的阵列波导密度可达 70 mm^{-1} , 如果每个波导中都写入多重布喇格光栅, 则在一块不大的光敏感材料中就可以形成大量的光学窄带滤波器. 因此以平面波导阵列分层并在其中形成多重布喇格光栅结构, 有可能用于制作 UDWDM 系统中的 MUX/DEMUX 等器件. 进一步提高激光功率密度或/和改变激光波长, 该方法也能被用于在玻璃、聚合物等其他体块光敏材料中制作出类似器件.

参考文献

- 1 刘继芳, 李家立, 李育林, 等. 光折变多重存储的栅自增强读出特性研究. 光子学报, 1999, 28(3): 209 ~ 213
Liu J F, Li J L, Li Y L, et al. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(3): 209 ~ 213
- 2 Breer S, Buse K. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate. Appl Phys B, 1998, 66(3): 339 ~ 345
- 3 An J W, Kim N, Lee K W. Volume holographic wavelength demultiplexer based on rotation multiplexing in the 90° geometry. Opt Comm, 2001, 197(4-6): 247 ~ 254
- 4 Lee K Y, An J W, Kim N. Experimental demonstration of 50 GHz-spaced 42-channel volume holographic demultiplexer. Electronics Letters, 2002, 38(14): 730 ~ 732
- 5 Dittrich P, Montemezzani G, Günter P. Tunable optical filter for wavelength division multiplexing using dynamic interband photorefractive gratings. Opt Comm, 2002, 214(1-6): 363 ~ 370
- 6 Beyer O, Nee I, Havermeier F, et al. Holographic recording of Bragg gratings for wavelength division multiplexing in doped and partially polymerized poly(methyl methacrylate). Appl Opt, 2003, 42(1): 30 ~ 37
- 7 OADM & Tunable Bandpass Filter with Volume Bragg Grating (VBG) in LiNbO_3 Crystal. <http://www.ondax.com>

- 8 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): 422 ~ 424
Zhao J L, Li B L, Yang D X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(4): 422 ~ 424
- 9 Glass A, Linde D, Negran T. High-voltage bulk photovoltaic effect and photorefractive process in LiNbO_3 . *Appl Phys Lett*, 1974,25(4): 233 ~ 235
- 10 Chen F S. Optically induced change of refractive indices in LiNbO_3 and LiTaO_3 . *J Appl Phys*, 1969,40(8): 3389 ~ 3396
- 11 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 Phys Sin*, 2003,52(5): 1179 ~ 1183
- 12 Zhao J L, Zhang P, Zhou J B, et al. Visualizations of light-induced refractive index changes in photorefractive crystals employing digital holography. *Chin Phys Lett*, 2003,20(10): 1748 ~ 1751
- 13 Matoba O, Itoh K, Ichioka Y. Array of photorefractive waveguides for massively parallel optical interconnections in lithium niobate. *Opt Lett*, 1996,21(2): 122 ~ 124

Planar Waveguide Array with Bragg Grating and Its Fabrication Method by Laser Irradiation

Yang Dexing, Zhang Peng, Zhao Jianlin, Su Kun

Institute of Optical Information Science and Technology & Department of Applied Physics, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Received date:2004-05-12

Abstract A new kind of planar waveguide array (PWA) with holographic Bragg grating (HBG) fabricated in photosensitive materials irradiated by two-beam interference fringes with different spatial frequency is presented in this paper. The PWA with HBG was fabricated in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal as the photosensitive material. Then the light-induced index changes in the crystal were measured by employing digital holography and the guiding diffractions from the waveguide grating were observed in detail. There periodically emerges marked diffraction from the photorefractive HBG in the individual PWA plane as the test beam moves along the direction of the PWA vector. The results show that the PWA with multi-HBG formed by irradiation is feasible and may be used as a potential MUX/DEMUX in ultra-dense WDM system.

Keywords Waveguide Bragg grating; Planar waveguide array; Laser interference

Yang Dexing received the B. S. degree in physics in 1987 from Sichuan University and the M. S. degree in materials processing engineering in 1998 from Northwestern Polytechnical University (NPU). He is currently an associate professor at NPU, where he is deputy director of the Institute of Optical Information Science and Technology. His current research interests include photorefractive effect and devices, real-time optical pattern recognition, and photonic crystal optics. He has published more than 30 journal articles. He is a member of the Chinese Optical Society and the Chinese Physical Society.