

基于宽光谱应用的波长解复用多重体光栅的光写入特性*

杨德兴 向红丽 赵建林 李继锋 王海滨

(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 针对光通信中波长覆盖范围日益增宽的特点,从理论上研究了用于宽光谱范围波长解复用器件的多重体光栅的布喇格匹配和各波长对应光栅衍射效率的均匀性. 计算及实验结果均表明,由于记录介质的色散效应将导致多重体全息光栅读出过程中明显的布喇格失配,并且在写入过程中获得的均匀折射率调制度的多重体光栅,在读出过程中各通信波长对应光栅的衍射效率将不均匀. 为此,提出了改进多重体光栅的光写入方法,给出了利用角度复用写入透射型多重体光栅时解复用波长与写入角度的关系,以及写入体光栅过程中记录介质的折射率调制度修正公式.

关键词 体全息光栅;波分复用;布喇格匹配;折射率调制度

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

由于体全息光栅具有严格的波长和角度选择性,因此,近年来利用体全息光栅制作波分复用/解复用器件已引起了广泛的重视^[1~7]. 1997年, S. Breer, K. Buse在掺铁LiNbO₃晶体中实现了1550 nm波长附近双通道的波长解复用,其通道间隔为0.8 nm^[2];2000年,Boffi等人写入的多重体全息光栅实现了1550 nm附近区域光谱带宽为3.6 nm、通道间隔为1.2 nm的4通道的波长解复用器^[3];2001年,韩国的J. W. An等人用LiNbO₃:Fe晶体实现了光谱范围为670~677.5 nm(通道间隔为0.5 nm)的16通道的波长解复用^[4]. 这些研究涉及的光谱区很窄,因此一般可不考虑介质的色散等因素对体光栅衍射特性的影响. 但是随着通信的不断扩容及全波光纤的出现,通信波长已逐渐向1280~1625 nm的更宽光谱范围扩展,制作能够充分利用所有通信光谱波段的波分复用(Wavelength Division Multiplexing,简称WDM)器件是必然的发展趋势. 与窄光谱区不同,在宽光谱应用中,由于波长范围宽,不同波长所对应介质的折射率相差较大,这将影响进入介质后不同波长光波的传播方向,从而影响光波与体光栅之间的布喇格匹配. 而且通常采用光写入法制作多重体全息光栅时,要选用一定的曝光时间序列,然而无论是时间递减法^[8,9],还是循环曝光法^[10]都是基于写入相等折射率调制度的多重光栅,这种具有相同折射率调制度的多重体光栅,在宽

光谱应用时各光栅衍射效率将不同. 因此,本文针对这些影响从理论和实验上展开研究,提出了消除这些不利因素的方法.

1 宽光谱多重体全息光栅的布喇格匹配

1.1 体光栅的布喇格失配

现有文献中在写入多重体光栅时,由于光谱区很窄而没有考虑体光栅在读出过程中记录介质色散的影响,认为不同波长的读出光在以相同方向照射介质时在介质内的折射方向相同. 实际上,由于多波长读出光中不同波长对应介质的折射率有差异,同向入射的光波,进入介质后各波长光波的折射角不同,这将导致读出光偏离布喇格角入射条件.

以波长依次增大的 $\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_N$ 为待分离输入光波,不考虑介质色散影响,以其中间波长 $\lambda_{N/2}$ 的读出光在介质内的折射角作为其它波长的折射角,分析色散效应对多重光栅衍射效率的影响. 各波长光对应的介质折射率分别为 $n_1, \dots, n_i, \dots, n_N$ ($1 \leq i \leq N$). 设在波长解复用时读出光在晶体外的入射角为 θ_r ,那么读出光在晶体内偏离光栅布喇格入射角的大小为

$$\Delta\theta_i = \arcsin [(\sin \theta_r)/n_i] - \arcsin [(\sin \theta_r)/n_{N/2}] \quad (1)$$

式(1)中,等号右边第一项为读出光在介质内的实际折射角,第二项为波长 $\lambda_{N/2}$ 的读出光在介质内的折射角. 由于折射率随波长增加而减小,从式(1)可知读出光偏离 $\lambda_{N/2}$ 越远,角度偏离量 $\Delta\theta_i$ 就越大. 又根据Kogelnik的体光栅耦合波理论^[11],在布喇格波长入射时,无吸收的透射式体全息光栅衍射效率

*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:2005-01-04

η 可表示为

$$\eta = \frac{\sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2}}{1 + (\xi/\nu)^2} \quad (2)$$

式中 ν 为调制参量, ξ 为计算参量. 在只有角度失配, 无波长失配时, ξ 与角度偏移量成正比, 于是由式(2)可知, 当入射角偏离布喇格角时, 光栅衍射效率将发生变化. 这种由介质色散效应带来的影响可通过多重光栅写入与读出实验来分析. 以中间波长 $\lambda_{N/2}$ 为 1530 nm 的宽带光源为读出光谱, 在考虑色散和不考虑色散的情况下, 以 632.8 nm 的 He-Ne 激光作为光源, 分两次在厚度为 2 mm 的 LiNbO₃ 晶体内记录光栅, 每次都记录三重光栅, 每重光栅对应不同的 λ_N . 所记录光栅的衍射谱如图 1, 实线为考虑色散效应时光栅衍射谱, 各重光栅衍射谱的中心波长分别为 1540.20 nm、1571.15 nm、1602.05 nm; 虚线为不考虑色散效应影响时光栅衍射谱, 各重光栅衍射谱的中心波长分别为 1540.30 nm、1572.00 nm、1603.65 nm. 两种情况下衍射峰不重合, 其偏离量 $\Delta\lambda$ 如表 1 中随波长呈增大趋势. 于是在不考虑色散时, 多重光栅对波长为 1540.20 nm、1571.15 nm、1602.05 nm 光束衍射效率发生变化, 其改变量可由图 1 读出, 结果如表 1 中 $\Delta\eta$ 所示. 当最大波长 λ_N 为 1540.30 nm 时, 光谱宽度最窄, 波长偏移量最小, 衍射效率的改变量接近于 0, 随着光谱宽度变大, 波长偏移量也变大, 衍射效率的改变量也增大. 从实验结果可以看出, 当光谱较宽时, 如果不考虑色散效应, 读出光波长必定会严重偏离光栅的布喇格波长, 光栅的衍射效率将显著下降.

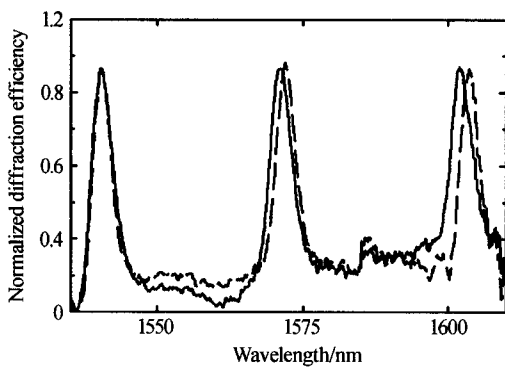


图 1 介质色散效应对光栅衍射的影响

Fig. 1 Influence of the medium dispersion on grating diffraction

表 1 随光谱宽度光栅衍射参量的变化

λ_N/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$\Delta\eta/(\%)$
1540.20	0.10	0.27
1571.15	0.85	9.39
1602.05	1.60	21.84

1.2 解复用波长与写入角的关系

以角度复用写入透射型多重体光栅为例. 在图 2

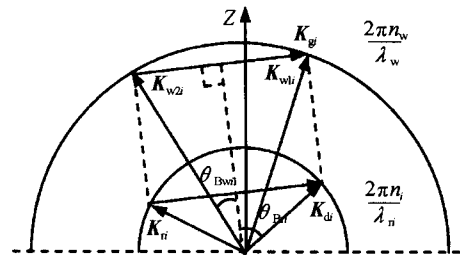


图 2 两通道的解复用波矢原理

Fig. 2 Wave-vector diagram for wavelengths demultiplexing of two channels

中的波矢空间中, $(\mathbf{K}_{w1i}, \mathbf{K}_{w2i})$ 是波长为 λ_w 的两写入光波矢量, $(\mathbf{K}_{ri}, \mathbf{K}_{di})$ 分别是波长为 λ_i 的读出和衍射光波矢量(这里 $\lambda_w < \lambda_i$); \mathbf{K}_{gi} 为写入光栅矢量, 且有

$$\mathbf{K}_{gi} = \mathbf{K}_{w1i} - \mathbf{K}_{w2i} = \mathbf{K}_{di} - \mathbf{K}_{ri} \quad (3)$$

因此, 不同波长的读出光可以在同一个体全息光栅上满足布喇格条件, 同时根据布喇格条件可以确定对应第 i 重光栅的光栅常量 Λ_i 为^[12]

$$\Lambda_i = \frac{\lambda_w}{2n_w \sin \theta_{Bwi}} = \frac{\lambda_i}{2n_i \sin \theta_{Bri}} \quad (4)$$

n_w, n_i 是与波长 λ_w, λ_i 对应的介质折射率. λ_{Bwi} 是波长为 λ_w 的写入光相对于第 i 重光栅的布喇格入射角, θ_{Bri} 是波长为 λ_i 的读出光相对于第 i 重光栅的布喇格入射角. 图 3 为写入第 i 重光栅的平面示意图, 图中虚线和实线方框代表记录介质. 当记录介

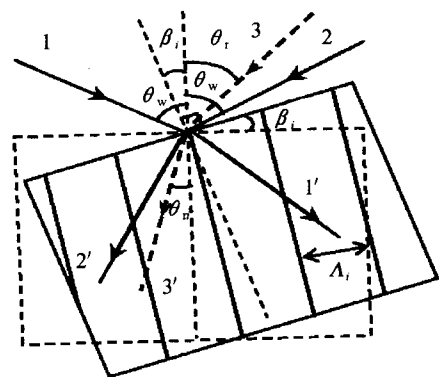


图 3 写入第 i 重光栅的平面图

Fig. 3 Diagram for recording the i th grating

质处在虚线框位置时, 两记录光束 1、2 以 θ_w 为入射角对称入射, 写入与读出光谱中间波长 $\lambda_{N/2}$ 对应的非倾斜体光栅. 保持两记录光束 1、2 不动, 将介质旋转 β_i 角后, 在实线框位置记录第 i 重光栅, 这时两写入光在介质内的折射方向分别为 $1'$ 、 $2'$. 由于介质的色散作用, 读出光束 3 以 θ_r 为入射角进入介质并沿 $3'$ 方向折射, θ_{ri} 为其折射角. 由图 2 和图 3, 可以确定第 i 重光栅的两个布喇格角分别为

$$\theta_{Bwi} = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{1}{n_w} \sin (\theta_w - \beta_i) \right] + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{1}{n_w} \sin (\theta_w + \beta_i) \right] \quad (5)$$

$$\theta_{Bi} = \arcsin \left[\frac{\sin(\theta_r)}{n_i} \right] - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{\sin(\theta_w + \beta_i)}{n_w} \right] + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{\sin(\theta_w - \beta_i)}{n_w} \right] \quad (6)$$

根据具体解复用器件设计的要求,解复时光束入射角选定为某一值 θ_r . 写入光栅时,首先确定写入角 θ_w ,因为 $\lambda_{N/2}$ 对应的光栅为非倾斜光栅,所以取 $\beta_{N/2} = 0$,由式(4)~(6)即可确定 θ_w . 之后两写入光束固定不变,旋转介质写入多重光栅,介质旋转角 β_i 由式(4)~(6)联立确定,关于 β_i 的方程为

$$\frac{\lambda_i n_w}{\lambda_w n_i} \sin \left\{ \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{\sin(\theta_w - \beta_i)}{n_w} \right] + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{\sin(\theta_w + \beta_i)}{n_w} \right] \right\} = \sin \left\{ \arcsin \left[\frac{\sin(\theta_r)}{n_i} \right] - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{\sin(\theta_w - \beta_i)}{n_w} \right] + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{\sin(\theta_w + \beta_i)}{n_w} \right] \right\} \quad (7)$$

式中 i 为整数,其取值范围为 $1 \leq i \leq N$.

2 宽光谱多重体全息光栅的衍射效率

2.1 影响解复用衍射效率均匀性的因素

对于透射型体全息光栅,在布喇格匹配时的衍射效率为^[11]

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi d \Delta n}{\lambda \cos \theta_B} \right] \quad (8)$$

式(8)中, Δn 为折射率调制度, d 为介质厚度. 对于光折变材料,折射率调制度 Δn 为

$$\Delta n = \frac{1}{2} n^3 \gamma_{\text{eff}} E_{\text{sc}} \quad (9)$$

式中 γ_{eff} 为有效电光系数, E_{sc} 为空间电荷场. 通常采用光写入法制作多重体全息光栅时,要选用一定的曝光时间序列,不管是时间递减法,还是循环曝光法都是基于写入相等折射率调制度的光栅. 如果事先给定光栅衍射效率,就可以由式(8)确定与读出光波对应的折射率调制度 Δn_r ,再由式(9)确定需要达到的与写入光波对应的折射率调制度

$$\Delta n_w = \Delta n_r \left(\frac{n_w}{n_r} \right)^3 \left(\frac{\gamma_{\text{eff}w}}{\gamma_{\text{eff}r}} \right) \quad (10)$$

n_w 、 $\gamma_{\text{eff}w}$ 和 n_r 、 $\gamma_{\text{eff}r}$ 分别为介质相对于写入光和读出光的折射率、有效电光系数. 由式(10)可以看出,如果各重光栅在写入时的折射率调制度相等,则不同波长的读出光所对应的光栅调制度将不同,这将影响到光栅的衍射效率.

下面进一步探讨影响各读出光衍射效率均匀性的各主要因素. 首先以光谱中间波长 $\lambda_{N/2}$ 的读出光对应的第 $N/2$ 重光栅衍射效率 $\eta_{N/2}$ 作为器件设计要求的衍射效率,由式(8)确定读出折射率调制度 Δn_r ,再根据式(10)确定写入的多重光栅应达到的折

射率调制度 Δn_w ,那么在读出时各重光栅的衍射效率 η_i 应为

$$\eta_i = \sin^2 \left[\left(\frac{\lambda_{N/2}}{\lambda_i} \right) \left(\frac{\cos \theta_{N/2}}{\cos \theta_i} \right) \left(\frac{n_i}{n_{N/2}} \right)^3 \cdot \left(\frac{\gamma_{\text{eff}i}}{\gamma_{\text{eff}N/2}} \right) \arcsin \sqrt{\eta_{N/2}} \right] \quad (11)$$

式中 $\theta_{N/2}$ 、 $n_{N/2}$ 、 $\gamma_{\text{eff}N/2}$ 和 θ_i 、 n_i 、 $\gamma_{\text{eff}i}$ 分别为读出光波长 $\lambda_{N/2}$ 和 λ_i 对应的光栅布喇格角、介质折射率、有效电光系数,可见光栅的衍射效率与这几个参量都有关.

下面以 LiNbO_3 晶体为例具体分析上述各种因素对衍射效率均匀性的影响. 由于受实验误差的限制,在实验中写入 Δn 绝对相等的多重光栅存在困难. 为了准确反映光波长、光栅布喇格角、介质折射率、有效电光系数这些因素带来的影响,以单重光栅代替多重光栅,这样对每个波长可以得到 Δn 相等的条件. 实验中取入射角 $\theta_r = 60^\circ$ 、 $\lambda_{N/2} = 1529.12 \text{ nm}$,对应光栅的衍射效率 $\eta_{N/2}$ 为 55.85%,当 λ_N 分别为 1546.65 nm、1555.59 nm、1564.69 nm、1583.02 nm、1591.66 nm 时,即光谱宽度不同时,对应波长在布喇格匹配时的衍射效率如图 4 的倒立三角形标明的数据点. 从图中可以看出,写入相同折射率调制度的光栅在通信波长区较宽时各通道衍射效率随波长增加而减小.

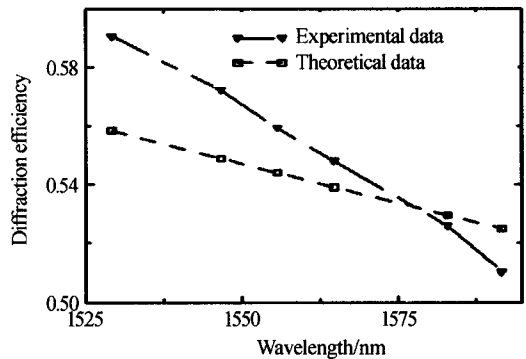


图 4 不同 λ_N 对应单重光栅的衍射效率

Fig. 4 Dependence of the η_i on the different angle λ_N

下面假设 $\gamma_{\text{eff}N/2} = \eta_{\text{eff}N}$,由式(11)得到各 λ_N 所对应的衍射效率随 λ_N 的变化趋势如图 4 小方框标明的数据点,衍射效率随波长的增加而减小. 由于电光系数随波长的增加而减小^[13],因此,如果再考虑电光系数的影响,衍射效率随 λ_N 的变化会更明显. 表明理论计算与实验结果是相符的. 可见在通信波长区较宽时,通过写入均匀折射率调制度光栅制作波长解复用器会导致各通道衍射效率出现显著的差异.

2.2 写入过程折射率调制度的修正

对于宽光谱应用,其解复用波长范围较宽,并且 n 、 γ_{eff} 随波长增加而减小,在波长相隔较大时,差异也较大. 因此,对于写入均匀调制度光栅的曝光时

间序列,为了得到具有均匀衍射效率的多重光栅,在充分考虑上述因素的基础上,对各写入光栅的折射率调制度进行修正. 首先,在式(8)中,由器件设计需要来确定解复用衍射效率 η_0 ,确定出与解复用波长有关的折射率调制度 Δn_{ri} 为

$$\Delta n_{ri} = \frac{\lambda_i \cos \theta_i \arcsin \eta_0}{\pi d} \quad (12)$$

再由式(10)和(12)得出各光栅在写入过程中的折射率调制度 Δn_{wi} ,以此作为确定曝光参量的依据.

3 结论

本文针对光通信光谱区日益增宽的特点,分析了用于波分复用/解复用器件的多重体全息光栅布喇格匹配和多通道信号的均匀性. 对于宽光谱应用,由于记录介质的色散效应,入射光相对光栅布喇格入射角的最大偏离量可能使光栅衍射效率降到几乎为零;并且在写入过程中获得的均匀折射率调制度的多重体光栅,在读出过程中,由于通信波长区读出波长差异较大和不同波长对应的介质折射率、电光系数不同,在解复用时衍射效率不再相等,使各信号通道的损耗产生明显的差异. 充分考虑到这些因素,本文给出了已知 θ_i 、 λ_w 、 λ_i 的情况下,利用角度复用法写入透射型多重体光栅时解复用波长与写入角度的关系以及写入时记录介质的折射率调制度的修正公式. 这样写入的多重光栅在解复用光谱较宽时,能保证光栅的布喇格匹配及各通道衍射效率的均匀性.

参考文献

- James R T B, Wah C, Iizuka K, *et al.* Optically tunable optical filter. *Appl Opt*, 1995, **34**(35): 8230~8235
- Breer S, Bsue K. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate. *Appl Phys*, 1998, **66**(3): 339~345
- Boffi P, Ubaldi M C, Piccinin D, *et al.* 1550 nm volume holography for optical communication devices. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(10): 1355~1357
- An J W, Kim N, Lee K W. Volume holographic wavelength demultiplexing based on rotation multiplexing in the 90° geometry. *Opt Comm*, 2001, **197**(4-6): 247~254
- Lee Y, An J W, Kim N. Experimental demonstration of 50 GHz-space 42-channel volume holographic demultiplexer. *Elec Lett*, 2002, **38**(14): 730~732
- Beyer B O, Nee I, Havermeier F, *et al.* Holographic recording of Bragg grating for wavelength division multiplexing in doped and partially polymerized poly (methyl methacrylate). *Appl Opt*, 2003, **42**(1): 30~37
- 王二虎,赵建林,李继锋,等. 光折变多重体光栅的制作及应用. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1229~1232
Wang E H, Zhao J L, Li J F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1229~1232
- Psaltis D, Brady D, Wagner K. Adaptive optical networks using photorefractive crystals. *Appl Opt*, 1988, **27**(9): 1752~1759
- 忽满利,刘玉华,刘继芳,等. 光折变晶体均匀多重全息图存储研究. *光子学报*, 1999, **28**(7): 641~646
Hu M L, Liu Y H, Liu J F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(7): 641~646
- Taketomi Y, Ford J E, Sasaki H, *et al.* Incremental recording for photorefractive hologram multiplexing. *Opt Lett*, 1991, **16**(22): 1774~1776
- Kogelnik B H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(9): 2909~2974
- 曹良才,马晓声,何庆声,等. 基于多重体全息光栅的光谱器件研究. *光电子·激光*, 2003, **14**(2): 114~117
Cao L C, Ma X S, He Q S, *et al.* *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(2): 114~117
- Fries S, Bauschulte S. Wavelength dependence of the electrooptic coefficients in LiNbO₃:Fe. *Physica Status Solidi (A) Applied Research*, 1991, **125**(1): 369~374

The Write-in Characteristics of Multiple Volume Holographic Gratings for Wavelength Demultiplexing with wide Spectra

Yang Dexing, Xiang Hongli, Zhao Jianlin, Li Jifeng, Wang Haibin

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

Received date: 2005-01-04

Abstract The Bragg matching and the uniformity of Bragg diffraction efficiencies of multiple volume holographic gratings (MVHG), which were used for wavelength demultiplexing devices in optical communication based on all wave optical fiber, were theoretically studied and quantitatively analyzed. It was shown that the Bragg mismatching would be caused due to the recording medium dispersion during wavelength demultiplexing with wide spectra by employing MVHGs. Moreover the Bragg diffraction efficiencies of MVHGs with homogeneous refractive index modulation obtained at short writing wavelength would not be uniform at different optical communication wavelengths. And it has been experimentally demonstrated. For this reason, the improved dependence of writing angles on communication wavelengths for fabricating angle-multiplexing transmission MVHGs and the corrected formula for refractive index modulation of individual MVHG at writing wavelength were presented in order to ensure rigorous Bragg matching and the uniformity of diffraction efficiencies.

Keywords Volume holography grating; Wavelength demultiplexing; Bragg matching; Refractive index modulation



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 a 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 also a member of the Chinese Optical Society and the Chinese Physical Society.