

# 低偏振相关损耗全息光栅波分复用器的设计\*

成丽华 宋军\*\* 王建

(浙江大学光及电磁波研究中心, 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室,  
浙江大学与瑞典皇家工学院联合光子研究中心, 杭州 310027)

**摘要** 对基于掺杂铌酸锂材料的体光栅波分复用器主要结构和光栅记录参量提出了一种优化设计方法. 采用严格耦合波理论, 对两种偏振不同入射角和不同记录晶体厚度下的器件关键性能参量, 如插入损耗和偏振相关损耗等进行了优化. 数值结果证明采用优化设计的晶体厚度和光栅记录时的入射角, 在获得相当低的偏振相关损耗的同时, 也能够获得较低的插入损耗, 实现了综合性能优化的波分复用器设计. 实验结果证明用优化设计的参量能有效降低波分复用器件的插入损耗和偏振相关损耗.

**关键词** 信息光学; 偏振相关损耗; 严格耦合波分析; 波分复用器

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A

## 0 引言

以  $\text{LiNbO}_3$  材料为主的光折变全息材料<sup>[1]</sup>目前在光学相关各领域, 如光学图像处理, 体全息光存储, 波分复用等, 均得到了广泛运用, 且其优越性日益显著. 密集波分复用(DWDM)技术<sup>[2,3]</sup>是光纤通信扩容, 建设大容量光传输网的最佳手段, 波分复用/解复用器件是波分复用系统中的关键元件之一. 光折变全息术应用于光通信中的波分复用技术<sup>[4]</sup>是近来兴起的一种技术, 并以其制作工艺简单, 角度和波长选择性好, 衍射效率高, 对偏振的影响容易控制等优势得到广泛关注. 因而随着光通信和全光网络的迅速发展, 目前有许多基于光折变全息光栅的波分复用器的工艺改进, 性能优化及原理研究等方面的工作正在开展并取得了较大的进展.

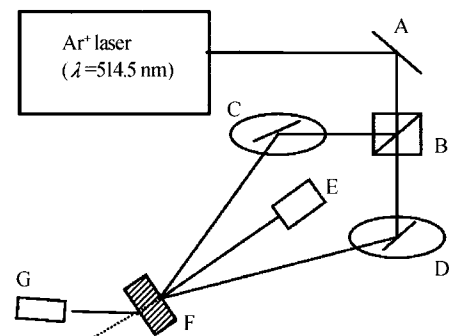
对于光折变全息光栅波分复用器件, 由于加工以及实验过程器件的废品率相对较高, 而对波分复用器件综合性能的检测费用却比较昂贵, 因此有效的预知记录光栅特性对器件解复用性能的影响, 选择能使光栅达到最佳效果的光折变材料的尺寸和记录时的最佳角度等参量, 可以适当地避免不必要的资金和人力浪费.

本文采用严格耦合波分析<sup>[5,6]</sup>, 对不同厚度的晶体, 在两种偏振下以 Bragg 角入射时的损耗进行模拟分析, 从而选取了偏振相关损耗(PDL)较低, 同时又能保证较低插入损耗的最佳厚度. 改变入射角大小, 对每个特定的入射角, 可以找到相应的最佳晶

体厚度. 对这些最佳厚度对应下的器件性能再进行综合比较, 最终确定了最佳的入射角度和最佳的晶体厚度, 此时器件可以获得较优越的综合性能.

## 1 基本原理

光折变全息应用于波分复用技术, 是通过角度、空间频率复用的方法, 在同一块晶体中写入不同空间频率的 Bragg 光栅. 对于一束含有多波长复用的信号光, 通过光纤入射在该晶体上时, 每一波长均对应于晶体内某一特定的光栅, 恰好满足 Bragg 条件, 从而在相应衍射级上得到最大的衍射效率, 实现解复用功能. 其光栅读出和写入的原理<sup>[7]</sup>如图 1. 通常光折变记录的光栅是电子光栅, 电子常温活跃, 因此性能不稳定, 不能满足波分复用需要, 当掺入金属离子(如铁等), 利用离子常温不活跃而高温活跃的特性, 通过退火, 在高温下让离子补偿电子光栅, 再迅速降到室温, 就形成了常温稳定的离子光栅, 可以满足波分复用的需要.



A-Reflector; B-Split prism; C,D-Reflector on rotating stage; E-He-Ne laser; F-Recording crystal; G-Detector

图 1 光折变全息 Bragg 光栅生成实验  
Fig. 1 The experimental set-up for making a Bragg grating with photorefractive hologram

\* 国家基础研究项目(2004CB719800)资助

\*\* Tel:0571-87952640 Email:songjun@coer.zju.edu.cn

收稿日期:2005-03-24

然而,对一个波分复用器,不同偏振的插入损耗差,即 PDL 也是影响器件性能的一个重要参量<sup>[8]</sup>. 实际上,每个器件都表现为一种偏振相关传输. 由于传输信号的偏振不仅局限于光纤网络之内,因此器件的插入损耗随偏振状态而异. 这种效应会沿传输链路不可控制地增长,对传输质量带来严重影响. 个别器件的 PDL 会在系统内造成大的功率波动,从而提高了系统的比特错误率,甚至会导致网络故障. 结合偏振模色散(PMD),PDL 可能成为脉冲失真和扩散的主要来源. 目前,抑制 PDL 的不同方法在一些文献中已经被提及<sup>[9]</sup>. 而在本文中,从选取适当的光束入射角和晶体厚度的方向来考虑,采用严格耦合波理论来计算对特定入射角,不同厚度体光栅在不同偏振态的插入损耗和 PDL,使器件的插入损耗和偏振相关损耗综合起来达到一个最低值,以达到对器件性能进行优化的目的.

考虑的全息光栅如图 2,以垂直入射平面偏振的电磁波(H模式)入射到光栅的衍射情形为例,则

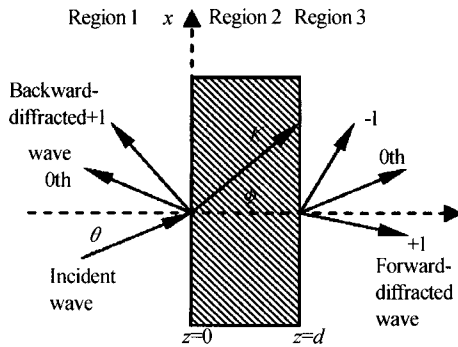


图 2 全息光栅衍射

Fig. 2 Geometry for holographic grating diffraction

电场只有  $y$  分量,可以表示为:  $\vec{E} = \hat{y} E_y(x, z) e^{-j\omega t}$ ,  $\hat{y}$  为  $y$  方向上的单位矢量. 对于 TE 偏振的入射平面波,电场满足下列波动方程

$$\nabla^2 E_y(x, z) + k^2 \epsilon(x, z) E_y(x, z) = 0 \quad (1)$$

式中,  $k = \omega(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}$ ,  $\lambda = 2\pi/k$ ,  $\lambda$  为光波在真空中的波长. 光栅被两种介质包围,其相对介电常量分别为  $\epsilon_1, \epsilon_3$ ,在光栅区域内的相对介电常量为

$$\epsilon(x, z) = \epsilon_2 + \Delta\epsilon \cos[\vec{K} \cdot \vec{r}] \quad (2)$$

式中,  $\vec{r} = (xyz)^T$  为方向矢量,  $\vec{K} = K(\sin\phi \cos\phi)^T$  为光栅矢量,  $\phi$  为光栅倾斜角,  $K = 2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\epsilon_2$  是光栅的平均介电常量,  $\Delta\epsilon$  为简谐相对介电常量的振幅.

当电磁波倾斜入射时,光栅同时显示出透射和反射行为. 在光栅区域( $0 < z < d$ )中,电场可以表示成相位为  $\vec{k}_{2m} \cdot \vec{r}$ ,振幅为  $S_m(z)$  的空间谐波的叠加

$$E_{2y}(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} S_m(z) \exp(-j \vec{k}_{2m} \cdot \vec{r}) \quad (3)$$

$\vec{k}_{2m} = \vec{k}_2 - m \vec{K}$ , 其中  $\vec{k}_2$  是大小为  $k \sqrt{\epsilon_2}$  的参考波矢,  $m$  为衍射波的级次. 将式(3)代入标量 Helmholtz 方程式(1)中,经过推导可以得到关于  $S_m(z)$  的二阶耦合微分方程

$$S_m'' + \sum_n a_{mn} S_n' + \sum_n b_{mn} S_n = 0 \quad (4)$$

式中  $()'$  表示关于  $z$  的导数. 系数  $a_{mn}$  和  $b_{mn}$  的定义如下

$$a_{mn} = \begin{cases} -2j(\vec{k}_{2n} \cdot \hat{z}) & \text{if } n=m \\ 0 & \text{if } n \neq m \end{cases} \quad (5)$$

$$[k_2^2 - (\vec{k}_{2n} \cdot \hat{x})^2 - (\vec{k}_{2n} \cdot \hat{z})^2] \quad n=m$$

$$b_{mn} = \begin{cases} k^2 \Delta\epsilon / 2 & n=m-1 \text{ or } n=m+1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$\hat{x}$  和  $\hat{z}$  分别是  $x$  和  $z$  方向的单位矢量. 在区域1( $z < 0$ )和区域3( $z > d$ )中的电场分别由下面两式给出

$$E_{1y} = \exp(-j \vec{k}_1 \cdot \vec{r}) + \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_m \exp(-j \vec{k}_{1m} \cdot \vec{r}) \quad (7)$$

$$E_{3y} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} T_m \exp(-j \vec{k}_{3m} \cdot (\vec{r} - d \hat{z})) \quad (8)$$

在式(7)中第一项为入射波,第二项为光栅衍射到区域1的向后衍射波的和.  $R_m$  是第  $m$  级反射波的归一化振幅,  $T_m$  是第  $m$  级透射波的归一化振幅. 三个区域中的波矢  $\vec{k}_{1m}$ ,  $\vec{k}_{2m}$  和  $\vec{k}_{3m}$  的  $x$  分量满足相位匹配条件

$$(\vec{k}_{1m} \cdot \hat{x}) = (\vec{k}_{2m} \cdot \hat{x}) = (\vec{k}_{3m} \cdot \hat{x}) \quad (9)$$

区域1和3中的波矢大小分别为

$$k_1 = |\vec{k}_1| = |\vec{k}_{1m}| = k \sqrt{\epsilon_1}, k_3 = |\vec{k}_3| = |\vec{k}_{3m}| = k \sqrt{\epsilon_3}$$

因此  $\vec{k}_{1m}$  和  $\vec{k}_{3m}$  的  $z$  分量可以由下面的式子表示

$$(\vec{k}_{1m} \cdot \hat{z}) = -[k_1^2 - (\vec{k}_{2m} \cdot \hat{x})^2]^{1/2} \quad (10)$$

$$(\vec{k}_{3m} \cdot \hat{z}) = +[k_3^2 - (\vec{k}_{2m} \cdot \hat{x})^2]^{1/2}$$

电磁场的边界条件要求所有边界处的电场和磁场的切向分量连续,因而在  $z=0$  和  $z=d$  处切向电场和切向磁场偏导数连续,可以得到如下关系

$$S_m(0) - \delta_{0m} = R_m \quad (11)$$

$$-j[k_1^2 - (\vec{k}_{2m} \cdot \hat{x})^2]^{1/2} (\delta_{0m} - R_m) =$$

$$S_m'(0) - j(\vec{k}_{2m} \cdot \hat{z}) S_m(0) \quad (12)$$

$$S_m(d) \exp[-j(\vec{k}_{2m} \cdot \hat{z})d] = T_m \quad (13)$$

$$j[S_m'(d) - j(\vec{k}_{2m} \cdot \hat{z}) S_m(d)] \exp[-j(\vec{k}_{2m} \cdot \hat{z})d] = (\vec{k}_{3m} \cdot \hat{z}) T_m \quad (14)$$

$\delta_{0m}$  是 Kronecker 符号,从上述方程中消去  $R_m$  和  $T_m$ ,便得到有关  $S_m$  的方程组

$$S_m'(0) - j\{(\vec{k}_{2m} \cdot \hat{z}) + [k_1^2 - (\vec{k}_{2m} \cdot \hat{x})^2]^{1/2}\} S_m(0) = -2j[k_1^2 - (\vec{k}_{2m} \cdot \hat{x})^2]^{1/2} \delta_{0m} \quad (15)$$

$$S'_m(d) - j[(\bar{k}_{2m} \cdot \hat{z}) - (\bar{k}_{3m} \cdot \hat{z})]S_m(d) = 0 \quad (16)$$

光栅中的电场可由边界条件式(15),(16),结合方程(4)求得:再结合式(11)~(14)即可得到  $R_m$ ,  $T_m$  的值,也就求得了区域 1、3 中的值. 对于 TM 偏振的情况也采用同样的方法来考虑.

## 2 理论模拟

记录光折变全息光栅的晶体厚度不同,会对不同偏振光以特定入射角入射后的衍射效率产生不同的影响. 这是因为不同偏振态以同样的入射角入射到光栅边界的时候,具有不同的边界条件,在算法里直接表现为反射和透射振幅(即  $R_m$  和  $T_m$ )的不同. 显然,当光栅厚度发生改变的时候,由不同边界条件变化带来的衍射效率变化也是不同的. 所以对任一特定入射角,先对光栅的厚度做选择,目标是设计出综合性能优化的体光栅波分复用器件. 光栅厚度选取方面要保证在获得较低的 PDL 的同时,两种偏振的插入损耗也较低,当然在考虑厚度选择的时候,也要考虑实际工艺情况,如果太薄器件不易封装,反之如果太厚,器件体积过大,不利于集成.

考虑设计应用于中心波长为 1550nm 的波分复用系统中的光折变全息光栅,铌酸锂材料在波长为 1550 nm 时 o 光和 e 光的折射率分别为  $n_o = 2.211$ ,  $n_e = 2.138$ ,通过光折变全息引起的折射率调制度为  $9 \times 10^{-4}$ . 如要满足 Bragg 条件  $2ds \sin \theta = \lambda$ ,对于特定的入射角,光栅周期已经被严格确定,因此在优化设计的时候,只需要对入射角和光栅周期中任意一个进行优化. 从选择光栅的最佳厚度来考虑,首先以  $30^\circ$  入射角为例,波长为 1550 nm 的 TE 偏振和 TM 偏振的入射平面波分别入射到  $30^\circ$  入射角所对应的 Bragg 光栅,光栅倾斜角  $\Phi$  为  $90^\circ$ ,晶体光轴与光栅波矢的取向如图 2,考虑透射式衍射. 通过模拟计算,可以得到经过光折变全息光栅的作用后,各自的 Bragg 衍射损耗如图 3. 图 4 为 PDL 随厚度

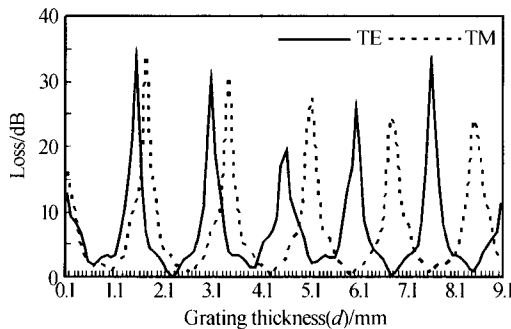


图 3 入射角为  $30^\circ$  时,两种偏振入射的损耗随光栅厚度的变化关系  
Fig. 3 The loss for both polarizations varies with the grating thickness when the incident angle is  $30^\circ$

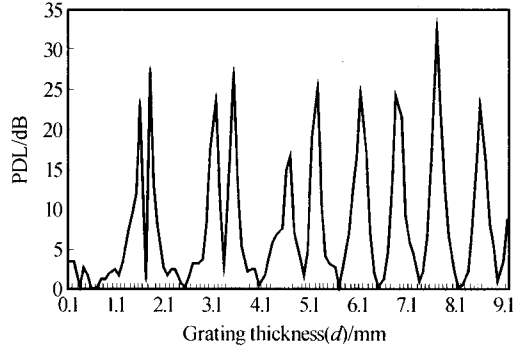


图 4 入射角为  $30^\circ$  时的 PDL 随光栅厚度变化关系  
Fig. 4 The PDL varies with the grating thickness when the incident angle is  $30^\circ$

不同的变化情况,PDL 是表征光器件或系统在所有偏振状态下的最大传输差值,此处定义为 TE 和 TM 偏振状态下的光入射后的损耗差值.

从图 3 中可以看出,两种偏振的衍射效率都不是随着晶体厚度增大而单调变化,均具有特定的变化周期. 这种现象早在 1969 年就由 Kogelnik 做出了解释<sup>[10]</sup>,其采用二波耦合的分析方法证明透射式相位光栅衍射效率随着厚度增加以正弦的二次方函数变化,而其变化周期只由波长、折射率和入射角决定. 现在的模拟结果与 Kogelnik 理论是一致的. 此外,不同的偏振态在晶体内的有效折射率明显不同,导致其衍射效率随厚度变化的周期也不同. 这就导致了两种偏振光经过光栅后其 Bragg 衍射的效率也是不同的,不能同时达到损耗的最小值. 但也正是由于两者的周期不同,必然导致在某些长度下,两者的衍射效率包络恰好接近重合,从而可以获得一个相对较小的 PDL. 从图 3 可以看到,对于某些厚度,如  $d = 8.4$  mm 左右,TE 波的损耗达到 33.2994 dB,而 TM 波的损耗却只有 0.2749 dB,此时的 PDL 达到 33.0245 dB,该厚度的光栅受入射光偏振态的影响相当严重,不利于波分复用应用. 从图 4 中可以看出,在光栅厚度为 2.7 mm,6.2 mm,7.1 mm,8.9 mm 等处,PDL 都相对较小,但从图 3 中可以看出在厚度为 8.9 mm,7.1 mm,6.2 mm 等处,TE 和 TM 波的损耗都明显偏大,不符合实际的应用. 综合这些因素,可以看到在厚度 2.7 mm 处,TE 波的损耗为 1.8772 dB, TM 波的损耗为 1.7524 dB,PDL 为 0.1248 dB,是较为理想的选择.

根据同样的方法,对入射角为  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  的情况也分别做了模拟,然后按照相同的最佳厚度选取原则,即保证获得低 PDL 的同时,衍射效率要高,从而得到如图 5,图 6 的结果.

从两图中可以看到,在入射角为  $15^\circ$  时,最佳厚度为 6 mm,其对应的 TE 波和 TM 波的损耗与其他入射角度相比小很多,尽管其 PDL 值就相对其他入

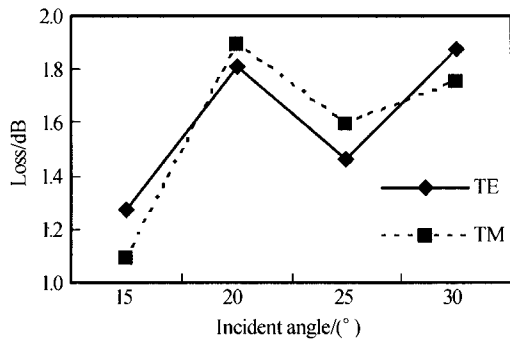


图5 最佳厚度对应损耗随入射角变化  
Fig. 5 The loss with an optimal crystal thickness for different incident angles

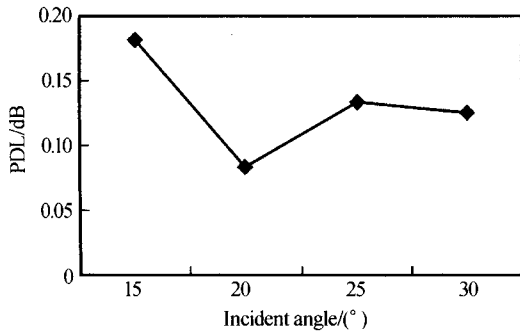


图6 最佳厚度对应 PDL 随入射角变化  
Fig. 6 The PDL with an optimal crystal thickness for different incident angles

射角下的最优值稍大,但也足以满足波分复用的实用要求.而在入射角为 $20^\circ$ 和 $30^\circ$ 时(对应的最佳厚度分别为 $7.9\text{ mm}$ 和 $2.7\text{ mm}$ ),尽管它们各自的PDL都较小,但损耗就明显偏大(相应的Bragg衍射效率都只有 $65\%$ 左右),这将严重恶化器件性能.对于入射角为 $25^\circ$ 时(相应最佳厚度为 $0.9\text{ mm}$ ),虽然其损耗和PDL跟其他入射角相比都处于较理想的水平,但这样薄的厚度不利于器件封装.所以经过综合比较,可以选择入射角 $15^\circ$ 为最佳入射角度(对应的最佳厚度为 $6\text{ mm}$ ),此时TE波和TM波的损耗分别为 $1.2697\text{ dB}$ 和 $1.0877\text{ dB}$ ,Bragg衍射效率分别为 $74.6\%$ 和 $77.8\%$ ,PDL为 $0.1820\text{ dB}$ .

### 3 实验

根据优化结果,在实验中,选用人射角为 $30^\circ$ 所对应的厚度为 $2.7\text{ mm}$ 和 $6.2\text{ mm}$ 的Bragg光栅和入射角为 $15^\circ$ 所对应的厚度为 $6\text{ mm}$ 的Bragg光栅做检测,可以得到表1中的性能参量.

表1 不同光栅实验特性比较

Grating	Loss <sub>TE</sub> /dB	Loss <sub>TM</sub> /dB	PDL/dB
a	3.4979	3.3329	0.1650
b	4.6080	4.8572	0.2492
c	2.9826	2.7630	0.2196

(Grating a:  $\theta=30^\circ$ ,  $d=2.7\text{ mm}$ ; b:  $\theta=30^\circ$ ,  $d=6.2\text{ mm}$ ; c:  $\theta=15^\circ$ ,  $d=6\text{ mm}$ . Loss<sub>TE</sub>和 Loss<sub>TM</sub>分别表示TE和TM偏振状态下的光入射后的损耗)

因为在实际器件使用过程中,必然存在材料吸收和加工工艺误差等因素的影响,所以实验参量同理论模拟必然存在较大差距.但是这些因素对三种样品的影响是相近的,因此从表中实验数据可以看出,虽然TE和TM波Bragg衍射后的损耗都比模拟结果大,但是其差值即PDL,与理论值是非常接近的.例如样品a与样品b的PDL值与理论数值只分别相差 $0.0402\text{ dB}$ 与 $0.0452\text{ dB}$ .此外也可看到a的损耗比b小很多,这也与模拟结果保持一致,证明样品a相对样品b在波分复用应用上是更为理想的选择.同样,样品c与样品a相比损耗小很多,PDL值稍大,这都和模拟结果很接近.这说明可以通过优化晶体厚度和光栅记录时的入射角度来考虑降低器件的偏振相关损耗.

### 4 结论

在设计波分复用器件时在保证较低损耗的同时,也必须考虑如何有效降低器件的偏振独立损耗.文中运用严格耦合波理论的计算方法对不同厚度晶体在不同偏振态入射时的情况进行模拟分析.通过优化晶体厚度和光栅记录时的入射角度来考虑降低器件的偏振独立损耗,减少偏振对器件的影响.通过模拟分析,得到光折变全息光栅满足低PDL的同时又保证衍射效率较高时的最佳入射角度及对应的最佳厚度.实验结果也充分说明了提出方法的有效性.

### 参考文献

- 郑威,周玉祥,刘彩霞. Ce:Co:LiNbO<sub>3</sub>晶体光折变性能研究. 光子学报, 2003, **32**(12):1492~1494  
Zheng W, Zhou Y X, Liu C X. Acta Photonica Sinica, 2003, **32**(12):1492~1494
- Lee Kwinyeon, An Junwon, Nam Kim. Experimental demonstration of 50 GHz-spaced 42-channel volume holographic demultiplexer. Electron Lett, 2002, **38**(14):730~732
- 陈益新. 光纤通信中光电器件的新进展. 光子学报, 2000, **29**(Z1):1~7  
Chen Y X. Acta Photonica Sinica, 2000, **29**(Z1):1~7
- Breer S, Buse K. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate. Appl Phys B, 1998, **66**:339~345
- Glytsis E N, Gaylord T K. Three-dimensional (vector) rigorous coupled-wave analysis of anisotropic grating diffraction. Optical Society of America, 1990, **7**(8):1399~1420
- 姜永远, 候春风, 李炎, 等. 光折变相位栅衍射动态特性的严格耦合波分析. 光子学报, 2000, **29**(3):216~222  
Jiang Y Y, Hou C F, Li Y, et al. Acta Photonica Sinica, 2000, **29**(3):216~222

- 7 宋军, 庞冬青, 何赛灵. 光折变全息光栅扭曲对波分复用应用的影响. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1217~1221  
Song J, Pang D Q, He S L. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(10): 1217~1221
- 8 邵钟浩, 沈晓强. 极化相关损耗和偏振模色散的相互作用及其对传输性能的影响. *光通信技术*, 2002, **26**(6): 35~38  
Shao Z H, Shen X Q. *Optical Communication Technology*, 2002, **26**(6): 35~38
- 9 Zhao J L, Li J F, et al. Polarization dependent loss of photorefractive volume grating and suppression. *Applied Optics*, 2005, **44**(15):
- 10 Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell Syst Tech J*, 1969, **48**: 2909~2947

## Design of Wavelength Division Demultiplexers Based on Holographic Gratings with a Low Polarization Dependent Loss

Cheng Lihua, Song Jun, Wang Jian

*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Centre for Optical and Electromagnetic Research, Joint Research Center of Photonics of the Royal Institute of Technology (Sweden) and Zhejiang University, Zhejiang University, Hangzhou 310027*

Received date: 2005-03-24

**Abstract** An optimizing method of main structure parameters (e. g. , the thickness of the crystal) and writing conditions (e. g. , the incident angle) is presented for a holographic grating wavelength division demultiplexer based on photorefractive  $\text{LiNbO}_3$  crystals. The key performance parameters of the demultiplexer, such as the loss and the polarization dependent loss (PDL), are optimized by selecting favourite structure parameters using a rigorous coupled wave analysis method. Numerical results show that a low loss and a low PDL can be achieved by using the optimal crystal thickness and incident angle. The designed demultiplexer obtains the favourite synthetical performance for an actual application. The experimental method of the grating recorded is also introduced in the present paper. The experimental results accorded with theoretical computation commendably by testing the three different specimens.

**Keywords** Information optics; Polarization dependent loss; Rigorous coupled wave analysis; Wavelength division multiplexing



**Cheng Lihua** is a graduate student, majored in optical engineering in Optical and Electrical Engineering Department of Zhejiang University. Her main interest is in the technology of the optical communication, particularly those concerning DWDM devices, including the design, numerical simulation and the manufacture.