

文章编号: 0258-7025(2004)10-1217-05

光折变全息光栅扭曲对波分复用应用的影响

宋 军, 庞冬青, 何赛灵

(浙江大学光及电磁波研究中心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, 浙江 杭州 310027)

摘要 介绍了光折变全息生成的布拉格光栅由于扭曲而对波分复用应用的影响, 提供了一种在器件制作前预先了解光栅扭曲对器件性能影响大小的方法。使用傅里叶分析的方法, 对布拉格光栅扭曲引起的相位改变做了修正计算。对修正了相位的光栅, 采用严格耦合波分析, 计算了光折变全息应用于波分复用的频谱响应。并用该方法计算了不同程度的光栅扭曲造成的频谱响应变化, 证明光栅扭曲会直接造成器件衍射效率下降, 旁瓣增大, 从而使串扰增大, 是光折变全息应用于波分复用必须考虑的重要因素之一。对光折变相位光栅衍射图像数据采集的过程作了介绍, 并在此基础上将记录了光栅的晶体进行波分复用损耗和串扰特性的测试, 实验结果证明提供的方法能够有效预知光折变全息光栅扭曲对器件综合性能的影响。

关键词 衍射与光栅; 光折变光栅扭曲; 相位修正; 图像傅里叶分析; 波分复用器

中图分类号 TQ 591 **文献标识码** A

Influence of the Tilting of the Photorefractive Hologram Grating on Wavelength Demultiplexer

SONG Jun, PANG Dong-qing, HE Sai-ling

(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, Zhejiang 310027, China)

Abstract The influence of the tilting of the photorefractive hologram grating on wavelength demultiplexer is studied. An effective method, which can predict the influence of the grating tilting on the demultiplexing performance, is presented in order to avoid the unnecessary experimental spending. The phase error caused by the tilting of the Bragg grating is corrected with a Fourier analysis. The spectral response of the demultiplexer is calculated by using a rigorous coupled wave analysis method. The influence of the tilting of the Bragg grating on the spectral response is analyzed. It is shown that the phase difference due to the tilting of the grating can result in a large insertion loss and a large crosstalk. It is pointed out that the hologram tilting must be avoided as much as possible since it deteriorates the final performance seriously when a photorefractive hologram Bragg grating is used for wavelength demultiplexing. The experimental method of the grating image processing is also introduced in the paper. The experimental results accorded with theoretical computation commendably by testing the spectral responses of two demultiplexers with the tilting gratings.

Key words diffraction and gratings; tilting of the photorefractive hologram grating; phase correction; Fourier analysis of image; wavelength division multiplexing

收稿日期: 2003-06-05; 收到修改稿日期: 2003-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 90101024, 60277018)资助项目。

作者简介: 宋 军(1978—), 男, 浙江大学光电信息工程学系光学工程专业博士研究生, 主要从事光纤通信波分复用器件的模拟设计与制作。E-mail: songjun@coer.zju.edu.cn

1 引 言

以 LiNbO_3 材料为主的光折变全息材料目前在光学相关各领域,如相位共振、光学图像处理、体全息光存储、信号放大、波分复用等,均得到了广泛运用,且其优越性日益显著^[1~4]。光折变全息应用于光通信中的波分复用技术^[2]是近来兴起的一种技术,并以其制作工艺简单,性能可靠,偏振独立性好,衍射效率高等优势得到广泛关注。目前有许多工作分别基于光折变全息用于波分复用的工艺改进,并在性能优化及原理研究等方面开展了不少工作。

在光折变全息记录的过程中,由于自衍射和波像差等因素的存在,不可避免的会产生记录光栅的扭曲,对此文献^[5]从实验上详细分析了这一过程,文献^[6]则着重针对自衍射现象引起的光栅扭曲,基于简单耦合波方法的结论对其结果作了讨论。

对于光折变全息光栅应用于波分复用器件,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,因此如何有效地预知记录光栅特性对器件解复用性能的影响,避免不必要的资金和人力浪费具有特别重要的意义。

本文对光栅扭曲引起的相位改变提出一种全新的修正计算方法。并应用该方法计算给出了扭曲的布拉格光栅的相位改变,分析其对布拉格衍射效率的影响。

2 光栅记录及图像处理

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 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中写入不同空间频率的布拉格光栅。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,恰好满足布拉格条件,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。其光栅写入和读出原理如图 1 所示。

选用 LiNbO_3 晶体为材料,是因为其在光通信 1.55 μm 波段具有高的透射率,却有着低的光折变性能这一特性。对于稳定记录的光栅,在使用 1.55 μm 波长解复用时,既实现了高效率,也避免了对原有光栅特性产生影响。记录光栅使用波长为 514.5 nm 的 Ar 离子激光器,在该波段, LiNbO_3 晶体光折变效应相对敏感。激光器出射光经过准直、扩束、分束以后,形成两束特定角度入射的相干光,在晶体上

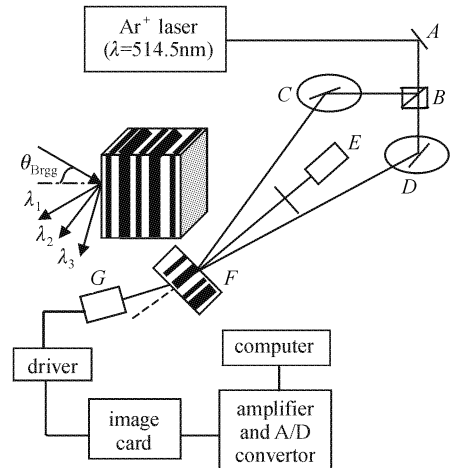


图 1 光折变全息布拉格光栅生成实验示意图
Fig. 1 Experimental setup for making a Bragg grating with photorefractive hologram

发生干涉,记录光栅。晶体在记录的同时,被恒温加热到 120 $^{\circ}\text{C}$,以便使由于光折变效应产生的不稳定的电子电场分布转变为常温稳定的离子电场分布^[7]。反射镜 C, D 分别被固定于两个精密转台上,以实现精度为 0.003 $^{\circ}$ 的角度调节。通过改变两束相干光各自与晶体法线的夹角,可以先后在同一块晶体中写入周期、角度不同的多个布拉格光栅。每一个光栅的写入,均按照预期解复用波长极大衍射效率需要满足的条件设定。对读出光则是使用该晶体与光栅成 90 $^{\circ}$ 夹角的侧面,如图 1 所示,对与晶体成相同角度入射的不同入射波长,由于光栅矢量的不同,分别在对应波长满足布拉格条件,相应波长信号被衍射到其极大方向。

图中使用了晶体光折变不敏感的波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器 E 对光栅写入情况进行探测, G 是对应的衍射光谱探测器及 CCD 装置。该 CCD 采用了加拿大 Dalsa 公司的 2048 像素的线阵 CCD,其光敏元件在空间上和电气上彼此独立,其输出电荷空间分布与光强分布成比例关系。系统采用帧存方式实现 CCD 视频信号的动态采集。硬件电路将 CCD 视频信号采集到一个外部存储器里暂存,待全部数据采集完成以后,交由 PC 机再处理。数据采集靠硬件完成,用 6264 静态存储器构成外部存储区,芯片最小周期 100 ns,其帧存储数据工作最高速率可达 10 MHz。

采集信号经过滤波放大以后,经过一个分辨率为 8 bit 的高速 A/D 转换器,将每一个脉冲幅值(模拟量)转换成为数字量,交由 PC 机采样处理。

PC 机采用普通的个人计算机,通过软件系统,可以将得到的数据图像进行预处理,主要包括图像增强、图像锐化、边缘检测、噪声隔离、轮廓细化等过程。图 2 给出了几种存在扭曲时的光栅最后的 CCD 采样处理结果。其中图(a)~(c)为低空间频率光折变光栅局部,(d)~(f)为高空间频率光折变光栅局部。

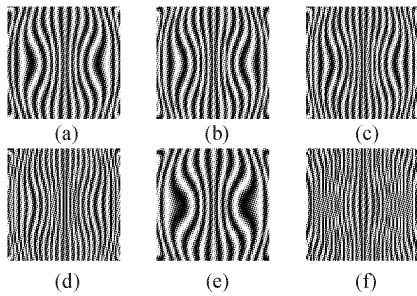


图 2 光折变全息布拉格光栅的扭曲
Fig. 2 Tilting of Bragg gratings made by photorefractive holograms

3 光栅扭曲的相位修正

在记录过程中,一方面由于必然存在自衍射效应,另外由于记录过程里使用了大量反射镜、分束镜及扩束镜等光学镜头,不可避免地会给记录光引入波像差,这两者综合作用,会给最终的布拉格光栅造成不同程度的扭曲,如图 2。记录使用大小为 1 cm^3 的正方体晶体,光轴沿记录法线方向。对高频光栅,扭曲限制的需求也相应更严格。从直观图像看,对两种频率,(c),(f)两种光栅扭曲程度相对较小,是可以实用的。而对高频的(e)光栅,有着严重的扭曲,是无法实用的。本文提出一种方法,对那些存在相对较小扭曲的光栅,如(a),(b)和(d)在制作器件前预知其对性能的影响,从而避免不必要的实验消耗。下面的分析中,高低频率各选一种,分别以(a)和(d)光栅为例进行说明。

产生扭曲的光栅其相位分布已经不是理想全息光栅的余弦分布,而存在扭曲现象的布拉格光栅必定会对最终的波分复用性能产生影响。为了准确考察已记录光栅对于波分复用效果的影响,必须准确写出发生扭曲的光栅实际相位分布。

首先可以将 CCD 采集的光栅相位分布表示为

$$\omega(x, z) = a + \frac{b}{2} \exp(i2\pi f_0 x) \exp[i\Phi(x, z)] + \frac{b}{2} \exp(-i2\pi f_0 x) \exp[-i\Phi(x, z)] \quad (1)$$

其中 $\Phi(x, z)$ 表示产生光栅扭曲以后的相位分布, $f_0 x$ 描绘了波前的倾斜量, a, b 为常数,与具体光栅记录引起的折射率改变有关。通过对(1)式进行傅里叶变换,可以得到其频谱分布,将其表示为中央极大项和边缘旁瓣项的形式

$$W(f, z) = M(f, z) + N(f + f_0, z) + N^*(f - f_0, z) \quad (2)$$

其中 f 表示空间频率。

可以采用矩形窗口空间滤波的形式提取出其两个旁瓣中的任意一个,并做反傅里叶变换,就可以对应地得到 $\frac{1}{2} \exp[i\Phi(x, z)]$ 和 $\frac{1}{2} \exp[-i\Phi(x, z)]$ 中的任意一项。例如得到了 $\frac{1}{2} \exp[i\Phi(x, z)]$ (用 $n(x, z)$ 表示),对其求取复对数,就可以得到扭曲后的相位分布

$$i\Phi(x, z) = \ln[n(x, z)] \quad (3)$$

对图 2 中的(a)光栅和(d)光栅,可以计算出其修正后的由于光栅扭曲引起的相位分布 $\Phi(x, z)$ 如图 3 所示,其中(a)对应于图 2 中的(a)光栅,(b)对应于(d)光栅。

在 $\Phi(x, z)$ 被求得以后,依据(1)式,可以准确地写出其相位分布。

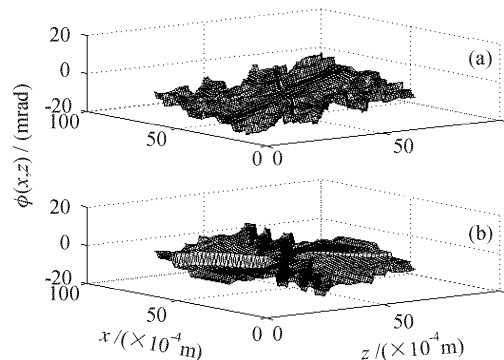


图 3 全息光栅弯曲过程的相位恢复
Fig. 3 Reconstructed phase distribution due to the tilting in the photorefractive holograms

4 对波分复用的影响

当已精确求得光栅相位分布的时候,可以更精确地计算其衍射后的频谱分布。计算厚光栅衍射较精确的方法是通过严格耦合波分析^[8]。

以一个频带间隔 100 GHz,中心波长 1550 nm 的波分复用器件为例。其光栅厚度 10 mm,晶体折射率为 2.211,通过光折变全息引起的折射率调制

度为 7.1×10^{-5} , 且不考虑光栅扭曲时, 图 4 给出了五个通道的频谱响应。从图中可以看到, 光折变全息布拉格光栅应用于波分复用, 可以获得较高的衍射效率, 其峰值效率已达 -0.1873 dB。其带间串扰也低于 -50 dB。

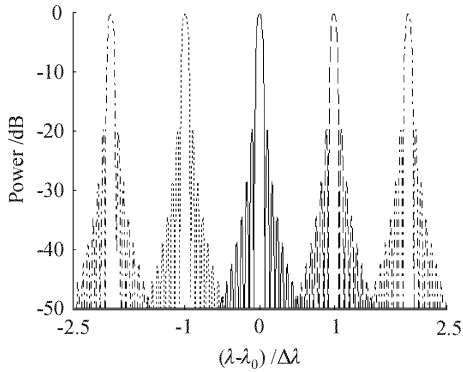


图 4 光折变全息用于波分复用的频谱响应

Fig. 4 Spectral responses of different channels for the designed demultiplexer based on photorefractive hologram

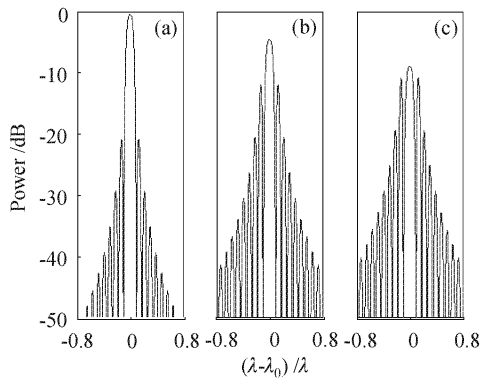


图 5 考虑光栅扭曲后的频谱响应

(a) 无扭曲光栅; (b) 对应图 2(a) 光栅; (c) 对应图 2(d) 光栅

Fig. 5 Tilting effect of the Bragg grating on the spectral response of the demultiplexer

(a) the spectral response of a perfect Bragg grating; (b) and (c) are the spectral responses corresponding to the tilted gratings shown in Fig. 2(a) and (d), respectively

考虑光栅产生扭曲对频谱响应的影响, 同样考虑图 2 中的(a), (d)两个光栅, 其频带间隔, 中心波长以及晶体折射率参数完全与图 4 相同, 可以做出对应的中心通道频谱响应曲线, 如图 5 所示。其中(a)为图 4 中没有扭曲时的中心通道频谱响应曲线, (b)和(c)分别为图 2(a)和(d)光栅用于中心波长 $\lambda_0 = 1550$ nm 布拉格衍射的频谱响应曲线。其峰值衍射效率分别为 -0.1873 dB, -3.5286 dB 和 -8.4466 dB。可以看到存在扭曲的时候, 峰值效率

明显降低。对图 2(d)光栅这样大程度扭曲的光栅, 其损耗已经严重破坏器件性能。另外, 从计算结果也可以明显看出, 随着光栅扭曲程度的增大, 其频谱响应的旁瓣也会明显增大, 这将会导致带间串扰的明显增加。因此要使光折变全息能够应用于波分复用器件的研制, 必须有效地减小光栅扭曲。

5 实验

对波分复用器件综合性能的检测必须搭建一套比较齐全的检测平台, 以完成对器件插入损耗、带间串扰、带间均匀性、色散等基本性能参数的检测。同时必须考虑好已记录光栅的晶体端面抛光, 及光纤对接等过程, 因此对一个成型器件完成检测, 所需费用是比较昂贵的。

表 1 不同光栅实验特性比较

Table 1 Experiment performances for different gratings

Grating	Normal	Fig. 2(a)	Fig. 2(d)
Loss /dB	6.2	10.5	16.3
Crosstalk /dB	-29.7	-18.6	-17.5

仍旧对图 2 中的(a), (d)两光栅和一基本无扭曲的标准光栅的器件做检测。可以得到表 1 中的性能参数。可以看到实验参数同理论参数存在较大差距, 这是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, 特别是存在解复用光束同光纤表面的一个较大的耦合损耗。但是这些因素对 3 种样品的影响是相近的, 因此我们考虑两种存在扭曲的光栅同标准光栅的性能参数差值。例如对图 2(a)光栅, 其插入损耗与标准光栅插损的差值为 4.3 dB, 通过前面的理论计算这个差值为 3.4 dB; 对于串扰, 实验得到这个差值为 11.1 dB, 而理论值为 10.2 dB 左右。同样, 对图 2(d)光栅, 实验上插入损耗对应于标准光栅差值为 10.1 dB, 理论上为 8.3 dB 左右; 对串扰, 实验上差值为 12.2 dB, 理论上为 11.3 dB 左右。通过比较可以看到以存在扭曲的光栅和标准光栅制作的器件, 其性能参数差值同理论结果几乎吻合。一方面说明这个差值主要是由于光栅扭曲引起的, 另一方面也充分证明了提出相位补偿计算方法的准确性。

6 结论

对光折变全息光栅扭曲对波分复用应用的影响

做出了分析。采用傅里叶分析的方法,得到了光栅扭曲引起相位改变的修正计算方法。利用严格耦合波分析,计算了光折变全息应用于波分复用的频谱响应,并计算分析了光栅扭曲对器件损耗串扰等特性的影响。证明光栅扭曲是光折变全息应用于波分复用时直接影响其最终性能的重要因素之一。实验结果也充分说明了该方法的准确性。

利用此方法可以在制作出光栅以后通过光栅质量预先评估波分复用器件的综合性能,而不必等到器件制作完成以后再进行测试。从而有效解决了器件制作及实验过程中,废品率高同波分复用器件性能检测高代价的矛盾。

参 考 文 献

- 1 Zhou Yuanlin, Xie Jinghui, Sun Ping *et al.*. Selective erasure of photorefractive hologram in Fe:LiNbO₃ by introducing π phase shift on the reference wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):726~730
周元林, 谢敬辉, 孙萍等. LiNbO₃ 晶体中引入 π 位相差实现选择性擦除 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):726~730
- 2 S. Breer, K. Buse. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **66**:339~345
- 3 Wan Yuhong, Yuan Wei, Liu Guoqing *et al.*. Study on the characteristics of scattering noise in photorefractive holographic storage [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):529~532
万玉红, 袁 骅, 刘国庆 等. 光折变晶体全息存储中散射噪声特性的研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):529~532
- 4 Liu Youwen, Liu Liren, Liu De'an *et al.*. Realization of non-volatile holographic storage in LiNbO₃:Cu:Ce crystals with two illumination schemes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(12):1099~1102
刘友文, 刘立人, 刘德安 等. 用两种照明方法在 LiNbO₃:Cu:Ce 晶体中实现非挥发全息存储 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(12):1099~1102
- 5 A. A. Freschi, P. M. Garcia, I. Rasnik *et al.*. Avoiding hologram bending in photorefractive crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(2):152~154
- 6 K. Buse, S. Kamper, J. Frejlich *et al.*. Tilting of holograms in photorefractive Sr_{0.61}Ba_{0.39}Nb₂O₆ crystals by self-diffraction [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(21):2249~2251
- 7 Song Xuehua, Tao Shiquan, Jiang Zhuqing *et al.*. Study on thermal fixing process of holograms in photorefractive crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):59~62
宋雪华, 陶世荃, 江竹青 等. 光折变晶体中全息图的热固定过程研究 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1):59~62
- 8 P. P. Banerjee, J. M. Jarem. Rigorous coupled wave analysis of induced photorefractive gratings [J]. *Proc. IEEE*, 1999, **87**(11):1870~1896