

应用等效规则优化法设计光通信光栅

张善文, 潘明忠

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:基于光栅电磁场理论,应用光栅等效规则计算光栅槽形初始值、结合衍射效率等高线法优化设计光栅槽形,给出了具有几何对称中心的任意槽形光栅.以全息工艺上易于制作的正弦、矩形和两种梯形典型槽形光栅为例进行优化设计,结果表明,正弦槽形光栅 C 波段 TM 波衍射效率理论峰值为 95%,测量值为 92%.较互易定理优化方法,等效规则优化法拓宽了光通信光栅的制作方法、降低了制作难度,为全息方法制作光通信光栅提供了理论依据.

关键词:等效规则;WDM;高衍射效率;C 波段;全息光栅

中图分类号:TP79 **文献标识码:**A

Design of the optical fiber grating with the equivalence rule

ZHANG Shan-Wen, PAN Ming-Zhong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Based on grating electromagnetic theory, initial values of the grating groove were computed with grating equivalence rule. The design was then optimized with the diffraction efficiency contour method. Gratings of arbitrary groove shape with a geometry symmetry center can be designed in this way. As examples, four kinds of groove gratings were designed and fabricated with groove shapes of sine, rectangle and trapeze. The peak efficiency of TM mode for sine groove grating is 95% theoretically and 92% experimentally in C band.

Key words: equivalence rule, WDM, diffraction efficiency, C band, holographic grating

PACS: 42.25.Dd

引言

在新一代超高速光纤通信系统中,最具代表的就是波分复用(WDM)技术,其突出特点是有效地利用单模光纤低损耗区带来的巨大带宽资源,明显地提高系统的传输容量,同时将相应的成本降到最低程度^[1].光波分复用器件是 WDM 系统的核心器件,在超高速、大容量的 WDM 系统中起着关键作用,其性能的优劣对系统的传输质量有决定性的作用,系统要求器件具有低插入损耗、低串扰、通带平坦、复用路数多、温度稳定性好以及尺寸小等特点^[2-4].平面闪耀光栅作为一种主要的集成色散型 WDM 器件,具有高衍射效率、波长间隔小、信道数量多、通带

平坦等优点,是现在研究的热门课题之一,找到工艺上易于实现的优化设计方法成为研制光通信光栅的关键.

光栅闪耀是指光栅把大部分入射光的能量集中到一个非 0 衍射级次上的现象,由于要保证光栅具有相对较宽的光谱范围和避免级次重叠,所以约 90% 的光栅都使用-1 级.光栅闪耀是光栅设计者和制造者所追求的目标.光栅电磁场理论诞生以前,唯一能够获得闪耀光栅的途径就是用刻划的方式制作非对称三角槽形光栅—简称阶梯光栅,闪耀光栅也就成了阶梯光栅的代名词^[5-6].在光纤的 C 波段(或称 1.55 μm 红外窗口),TM 偏振光栅可以有效避免偏振模色散引起的通信系统误码率增加现象,同时

收稿日期:2012-12-07,修回日期:2013-09-10

Received date: 2012-12-07, revised date: 2013-09-10

基金项目:国家重大科研装备研制项目(ZBYZ2008-1);吉林省科技发展计划重大专项(20126012);长春市科技计划项目(Y3B43HU140)

Foundation items: Supported by National Major Science and Research Equipment Development Project(ZBYZ2008-1), Jilin Major Province Science and Technology Development Program Project(20126012), Changchun Science and Technology Project(Y3B43HU140)

作者简介(Biography):张善文(1980-),男,吉林通化人,副研究员,研究领域为光栅设计及光栅制作技术研究. E-mail: zhshwen007@sina.com

有较大的功率承载能力、有效克服非线性,因此适用于 WDM 技术网络^[7]. 按照传统方法设计此种光栅,得到的光栅闪耀角较大,无论采用机械刻划的方式^[8]还是离子束刻蚀全息^[9-10]的加工方式,制作难度都非常大. 互易定理优化法利用光栅的互易定理计算光栅槽形初始值、结合衍射效率等高线法优化设计光栅槽形,能够给出机械刻划方式易于制作的三角槽形光栅^[11],但是,使用全息的方法制作三角槽形光栅工艺较为复杂、难度较大. 光栅电磁场理论证明了在共振区,即使是具有对称槽形的正弦、矩形和梯形光栅经过优化设计槽深、占宽比等参数也能做到闪耀^[12-15]. 本文基于光栅电磁场理论,应用光栅等效规则计算光栅槽形初始值、结合衍射效率等高线法优化设计光栅槽形,该法能够给出了具有几何对称中心的任意槽形光栅,以全息工艺上易于制作的正弦、矩形和两种典型梯形槽形光栅为例,优化设计得到三种光栅 C 波段 TM 波峰值衍射效率分别为 95.0%、91.1%、91.7% 和 91.4%. 等效规则优化法的应用为光通信光栅的研制提供了更多的途径,同时也为全息方法制作此种光栅提供了理论依据.

1 光栅槽形优化设计

广义地说,光栅的优化设计问题可以被视为一个反问题^[16],即已知光栅的衍射性能的部分信息,求解光栅的某些未知几何、物理参数. 但反演计算量较大且较为复杂,本文采用的方法还是在正问题的范畴,通过不断改变光栅几何参数求解衍射效率,确定衍射效率下限,其对应的光栅几何参数即为优化设计结果. 光栅衍射效率依赖于光栅和入射光的许多参数,其中被依赖最强的参数是波长、周期和槽深,更准确地说,是波长分别与周期和槽深的比值,其次才是折射率、槽形、入射角和偏振态等. 在实际应用中,由于折射率的选择余地极为有限,而波长、入射角和光栅周期主要由光学系统设计来决定,因此,以下主要研究衍射效率对槽深和槽形的依赖关系.

1.1 光栅等效规则

光栅理论中有一个著名的“等效规则”,它在理解不同槽形光栅的衍射能量分布时有很大的实用价值. 其表述为:若光栅满足以下两个条件,1) 只有两个衍射级次(0 级和-1 级);2) 光栅槽形函数有一个空间反演中心,即做适当的坐标原点平移,槽形函数可以写成正弦级数

$$f(x) = \sum_{m=0}^{\infty} f_m \sin mKx \quad , \quad (1)$$

则具有不同槽形函数但有相同一阶 Fourier 系数 f_1 的光栅有着相似的衍射效率^[17]. 其中, f_m 为 Fourier 系数, m 为正整数, $K=2/d$, d 为光栅常数.

等效规则虽然只是一个经验规则,并非定理,但对于槽深周期比小于 1/3 的理想导体和金属导体光栅,具有等效槽形光栅的衍射效率相差在 10% 在以内,因此,对实际应用中所遇到的大多数满足上述两个条件的光栅是非常有效的.

槽形满足式(1)的光栅有许多,以三角形、正弦形和矩形槽形光栅为例,等效规则的应用可以使一种光栅槽形转化为其他槽形. 对于三角槽形,闪耀角为 α 、槽顶角为 ϕ ,则光栅的一阶 Fourier 系数由下式给出

$$f_1 = \frac{d}{\pi} [\tan\alpha - \tan(\alpha + \phi)] \sin\left[\pi \frac{\sin(\alpha + \phi)\cos\alpha}{\sin\phi}\right] \quad . \quad (2)$$

对于正弦槽形,槽深为 h_{\sin} ,则 $f_1 = h_{\sin}/2$; 对应矩形槽形,槽深为 h_{rect} 、占宽比为 0.5,则 $f_1 = 2h_{\text{rect}}/\pi$. 根据等效规则,令三种槽形的 f_1 相等,则可以画出三种光栅槽形的等效图,如图 1 所示,其中,纵坐标为三角槽形光栅的闪耀角 α ,上方横坐标为正弦槽形光栅的归一化槽深 h_{\sin}/d ,下方横坐标为矩形槽形的归一化槽深 h_{rect}/d ,图中曲线是以三角槽形的槽顶角为参变量,其变化范围为 170° 到 60° . 按照此图可以找到具有相似衍射效率的三角槽形、正弦槽形和占宽比为 0.5 的矩形槽形光栅.

1.2 等效规则优化法

根据等效规则优化设计光栅,其表述如下,已知一种光栅槽形参数,在光栅等效图中找到与之相对应的另两种光栅槽形参数,考虑到等效规则并非严格定理,得到光栅的衍射效率并非最优值,因此以得到的光栅槽形参数作为严格矢量衍射理论优化设计的初始点,再结合衍射效率等高线图分别以光栅槽形参数为变量,在一定范围内计算光栅衍射效率,给出衍射效率随光栅槽形参数变化的曲线或等高线,选取满足衍射效率要求的区域作为光栅优化设计结果.

下面将等效规则优化法用于光通信光栅的设计. 光栅表面材料为铝、刻槽密度为 1 200 gr/mm、入射光谱范围为 $1.52 \sim 1.59 \mu\text{m}$ 、中心波长 λ 为 $1.55 \mu\text{m}$ 、偏振状态为 TM 偏振、入射角度为 76° . 波

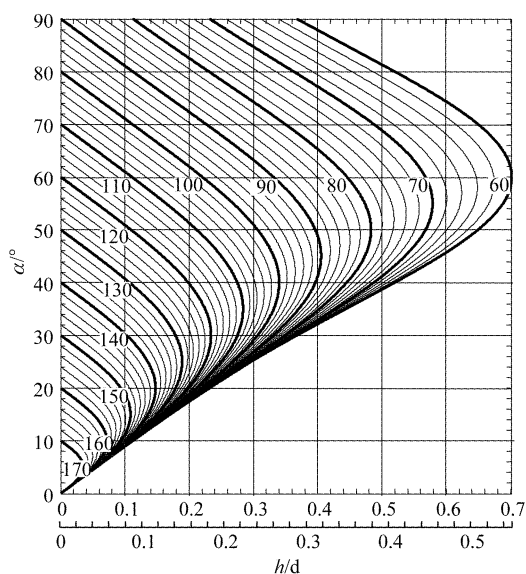


图1 三种常用光栅等效图

Fig. 1 Equivalence map for the three kinds of traditional gratings

长与光栅周期之比 $\lambda/d \approx 0.93 > 2/3$, 光栅只有两个衍射级次, 同时选取三角形、正弦、矩形和梯形槽形光栅作为研究对象, 满足等效规则, 因此在光栅等效图中可以找到具有相近衍射效率的几种光栅槽形. 如图2所示, 上方横坐标正弦光栅归一化槽深取值范围为 $0.2 \sim 0.25$, 下方横坐标矩形光栅归一化槽深取值范围为 $0.157 \sim 0.196$, 纵坐标三角槽形闪耀角取值范围为 $21^\circ \sim 35^\circ$, 图中曲线对应槽顶角 $118^\circ \sim 122^\circ$.

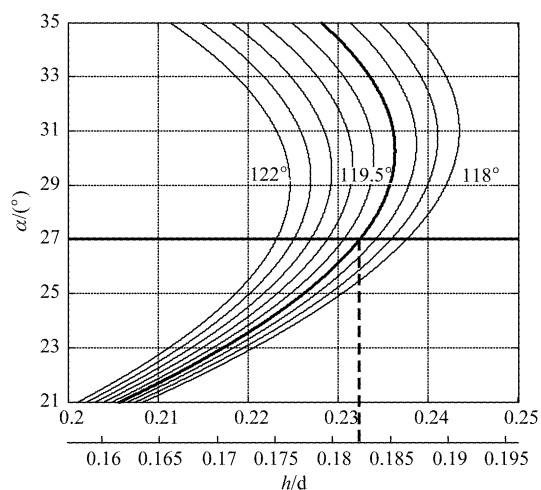


图2 局部光栅等效图

Fig. 2 Local equivalence rule map

以互易定理优化法得到的高衍射效率三角槽形

光通信光栅为参考^[11], 峰值衍射效率为 94.9% 的光栅闪耀角为 27° 、槽顶角 119.5° , 分别对应图中粗线直线和粗线曲线, 从两者的交点做垂线交横轴于两点 $h_{\text{sin}}/d = 0.2324$ 和 $h_{\text{rect}}/d = 0.1825$, 则对应的槽深 $h_{\text{sin}} \approx 194 \text{ nm}$ 和 $h_{\text{rect}} \approx 152 \text{ nm}$. 根据等效规则优化法, 具有 194 nm 槽深的正弦光栅和 152 nm 槽深占宽比为 0.5 的矩形光栅与闪耀角 27° 和槽顶角 119.5° 的三角形光栅有相近的衍射效率, 都具有高衍射效率, 因此, 以此为初始点对两种光栅槽形进行优化设计.

对于正弦槽形光栅, 在槽深 150 ~ 250 nm 范围, 基于光栅电磁场理论计算光栅衍射效率, 如图3所示, 横坐标为槽深、纵坐标为衍射效率, 整个范围衍射效率基本大于 90%, 选取衍射效率大于 94% 的区域作为最优化范围, 其对应的光栅槽深为 175 ~ 220 nm, 峰值衍射效率 95% 处对应槽深最优值为 195 nm.

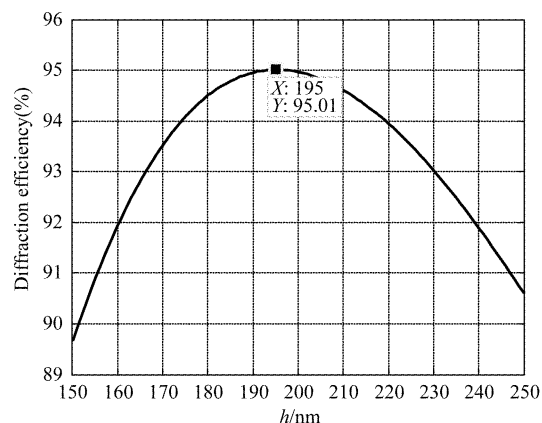


图3 正弦光栅衍射效率—槽深变化曲线

Fig. 3 Diffraction efficiency varies with the groove depth for sine grating

对于矩形光栅, 在槽深为 100 ~ 300 nm 和占宽比为 0.15 ~ 0.55 的范围内计算衍射效率, 如图4所示, 横坐标为槽深、纵坐标为占宽比, 其中深红色的范围为衍射效率 90% 的区域, 作为最优化范围, 对应的槽深在 150 nm 附近、占宽比基本处于 0.3 ~ 0.45 范围内, 峰值衍射效率 91.1% 处对应槽深最优值 160 nm、占宽比 0.39, 可以看出优化范围内出现了局部的衍射效率分布不连续现象.

对于梯形光栅, 其占宽比定义为腰与周期之比, 由于其槽形更接近矩形, 可以将矩形光栅的槽深、0.5 的占宽比作为初始点进行优化, 图5上下两幅等高线图在槽深 100 ~ 300 nm 和占宽比 0.15 ~ 0.55 范围内分别计算了底角为 70° 和 50° 两种等腰

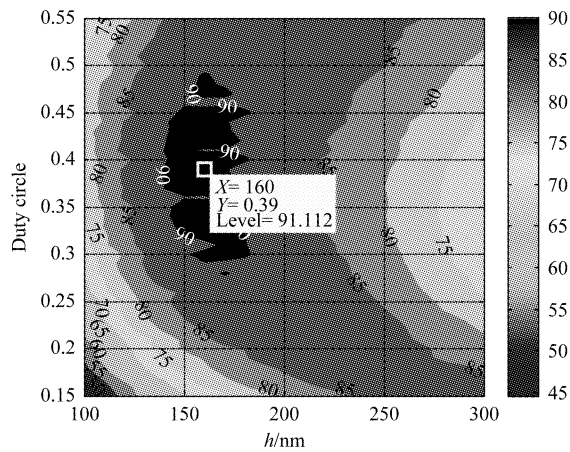


图4 矩形光栅衍射效率等高线图
Fig. 4 Diffraction efficiency contour of rectangle grating

梯形光栅衍射效率,选取衍射效率大于90%的范围作为优化范围,可以看出,两者都出现了明显的不连续分布现象。

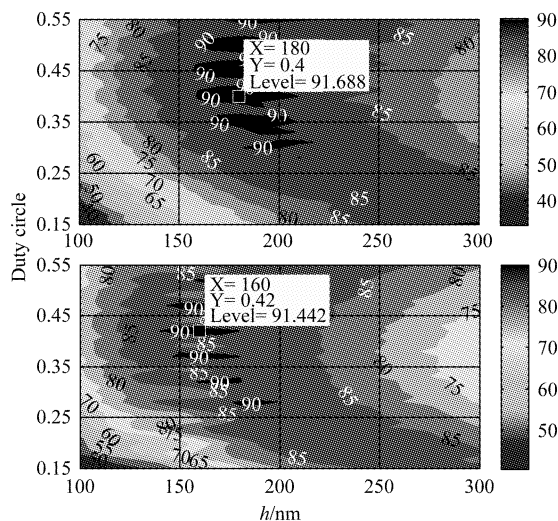


图5 梯形光栅衍射效率等高线图
Fig. 5 Diffraction efficiency contour of trapeze grating

1.3 优化结果分析

四种槽形的优化设计结果如表1所示,给出了光栅槽形几何参数最优值及其取值范围、对应的衍射效率峰值及取值范围和衍射效率曲线连续性的评价。优化结果给出了底角、槽深和占宽比与衍射效率的定量关系,通过比较分析可以看出,正弦槽形光栅较其他三种槽形:1)衍射效率峰值最高,高于其他3~4个百分点;2)槽形参数取值范围内对应的衍射效率最高,高于其他4个百分点;3)曲线连续性最好。另外,从全息光栅的制作工艺上来讲,正弦光栅的制作槽深控制在175~220 nm范围内可得到最高

的衍射效率,工艺上相对易于实现;其他三种槽形光栅需要同时控制底角、槽深和占宽比三个参数,而且参数取值范围具有不连续性,在对衍射效率不是十分高的情况下可以采用。因此,等效规则优化法设计的195 nm槽深正弦光栅无论从理论设计还是工艺实现上都具有明显的优势。

表1 四种槽形光栅优化设计结果比较
Table 1 The comparisons of optimized design for gratings with four kinds of groove shape gratings

槽形参数	槽深 h/nm		占宽比 c/d		衍射效率		备注
	底角	最优值	取值范围	最优值	取值范围	峰值	
正弦		195	175~220			95.0%	>94% 好
矩形	90°	160	140~180	0.39	0.30~0.45	91.1%	>90% 稍差
梯形1	70°	180	160~210	0.40	0.27~0.47	91.7%	>90% 差
梯形2	50°	160	160~180	0.42	0.38~0.42	91.4%	>90% 较差

下面将等效规优化法与互易定理优化法计算结果进行比较,如图6所示。

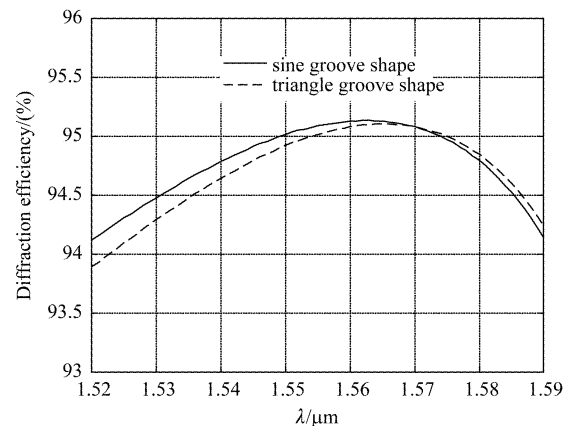


图6 传统设计法与互易定理优化法计算结果比较
Fig. 6 Comparisons of the result from traditional design and reciprocity theorem optimized method

实线和虚线对应正弦槽形和三角槽形光栅,分别对应等效规则优化法和互易定理优化法的计算结果,可以看出,在整个C波段范围内两者衍射效率基本都大于94%,在1.52~1.57 μm 波段前者略高于后者,1.57~1.59 μm 波段前者略低于后者,峰值基本相等,两者设计结果相当。但是,三角槽形光栅需要同时考虑到闪耀角和槽顶角两个参数对衍射效率的影响,选用全息加离子束刻蚀的方法制作,工艺相对复杂、困难相对较大,而正弦槽形光栅仅需控制光栅槽深一个参数,使用全息曝光显影工艺即可,无需使用离子束刻蚀工艺,制作相对容易,从这个角度来讲,等效规则优化法比互易定理优化法更适合全

息法制作光通信光栅.

2 实验与结果

通过光敏材料记录激光干涉条纹制作得到全息光栅,正弦槽形全息光栅最重要的工艺就是掩模的制作:首先将处理好的光学玻璃或熔石英等基底涂上一层厚度的光刻胶膜层,接着放入烤箱进行前烘;然后将准备好的基底放入干涉系统中曝光,记录干涉条纹;曝光后的基底放入显影液中显影,即获得光刻胶浮雕光栅图形.

按照等效规则优化法,衍射效率大于 94% 的正弦槽形光栅对应槽深为 175 ~ 220 nm,以此作为光栅设计参数,利用全息的方法制作了光通信光栅,得到的光栅用原子力显微镜对其槽形进行测试,光栅的剖面图和三维照片如图 7 所示,左图下方黑框区域为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 范围内光栅槽形的平均测试结果,三处槽深分别为 178.5 nm、185.5 nm 和 180.5 nm,都在优化范围内. 以此槽形计算得到光栅 $1.55 \mu\text{m}$ 处 TM 偏振波-1 级平均衍射效率为 94.2%.

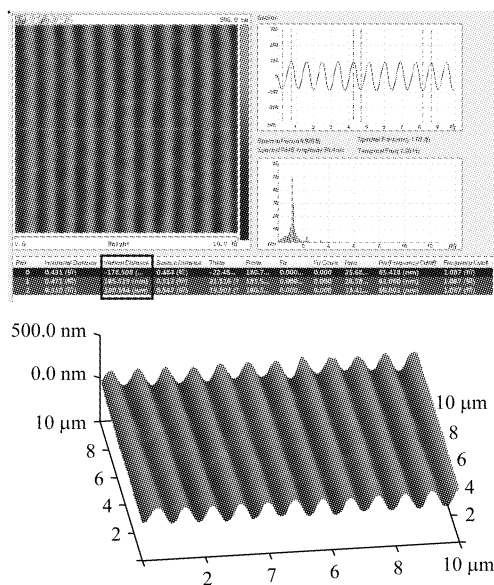


图 7 光栅槽形原子力显微镜测试结果

Fig. 7 Surface morphology of the grating grooves revealed by AFM

使用自制衍射效率测试装置对光栅进行测试,示意图如图 8 所示,图中激光器输出波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的 TM 偏振波,测试时首先直接测量激光器的输出功率,然后测量光栅在 76° 入射角下-1 级衍射光的功率,后者比前者得到光栅衍射效率,经多次测量平均衍射效率为 92.0%,比计算值低了 2.2 个百分点,其原因主要有 3 点:(1) 实际槽形与理想

槽形的偏差;(2) 理论计算的光栅槽形表面为理想光滑表面,而实际经过曝光显影后的光刻胶光栅刻槽难免存在一些缺陷,造成刻槽表面不光滑,表面粗糙度高;(3) 理论计算光栅铝膜的折射率与实际铝膜的折射率有差异.

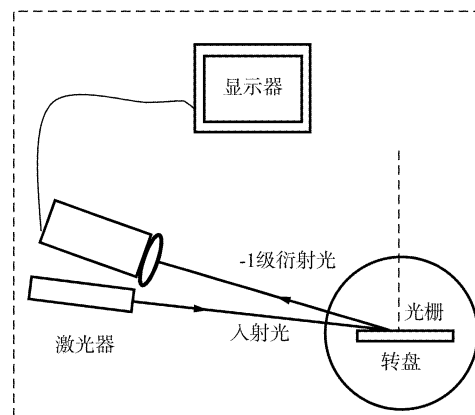


图 8 光栅衍射效率测量示意图

Fig. 8 Setup for the measurement of diffraction efficiency of grating

3 结论

为获得高衍射效率、降低光通信光栅的制作难度,本文应用等效规则找到与已知槽形参数相对应的几种未知槽形参数,以此作为初始值,结合衍射效率等高线图对光栅槽形进行优化设计,以具有几何中心对称槽形的正弦、矩形和梯形栅为研究对象,得到如下结论:1) 槽深 195 nm、容差范围 45 nm 的正弦光栅具有峰值为 95%、C 波段范围内大于 94% 的理论衍射效率,可代替三角槽形光栅;2) 等效规则优化法设计结果较互易定理设计方法,衍射效率相当,更适于但全息的方法制作;3) 等效规则优化法为全息方法制作光通信光栅提供了理论依据.

REFERENCES

- [1] QIAO Gui-Hong. *Optical fiber telecommunication* [M]. Beijing: Posts & telecom press. (桥桂红. 光纤通信. 北京:人民邮电出版社) 1986:171-176.
- [2] Aoyame K, Minowa J. Low loss optical demultiplexer for WDM systems in the $0.8 \mu\text{m}$ wavelength region [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(16):2834-2836.
- [3] Sheng Z Y, Lou L F, He S L. Design and simulation of a planar demultiplexer for coarse WDM [J]. *Optics Communication*, 2003, **225**(1-3):95-100.
- [4] Popov E, Hoose J, Frankel B, et al. Low polarisation dependent diffraction grating for wavelength demultiplexing [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(2): 269-274.
- [5] ZHU Shao-Qi, ZOU Hai-Xing, BAO Xue-Cheng, et al.

- Diffraction gratings* [M]. Beijing: Mechanical industry press(祝绍箕,邹海兴,包学诚,等. 衍射光栅. 北京:机械工业出版社)1986:69-73.
- [6] Loewen E G, Popov E. *Diffraction gratings and applications* [M]. New York: Marcel Dekker, 1997:191-193.
- [7] Milner D, Didona K, Bannon D. High efficiency diffraction grating technologies LPDL 900 and LPDL 1100 in telecommunications applications [J]. *SPIE Proceedings*. 2005, 5723.
- [8] ZHANG Shan-Wen, Bayanheshig. The design method of laser resonator gratings based on broadband character of TM polarized wave in non-anomaly region [J]. *Optics and Precision Engineering*(张善文,巴音贺希格. 基于非异常区 TM 偏振宽波段特性的激光器调谐光栅设计方法. 光学精密工程)2010, **18**(4):779-785.
- [9] XU Xiang-Dong, HONG Yi-Lin, FU Shao-Jun, et al. Holographic ion beam etched diffraction gratings [J]. *Physics*(徐向东,洪义麟,傅绍军,等. 全息离子束刻蚀衍射光栅. 物理)2004, **33**(5):340-344.
- [10] WU Na, TAN Xin, Bayanheshig, et al. Simulation and experiments of ion beam etching process for blazed holographic grating [J]. *Optics and Precision Engineering*(吴娜,谭鑫,巴音贺希格,等. 闪耀全息光栅离子束刻蚀工艺模拟及实验验证. 光学精密工程)2012, **20**(9):1904-1912.
- [11] ZHANG Shan-Wen, YING Jian-Xin, GAO Jian-Xiang. Using reciprocity theorem optimized method to design optical fiber telecommunication grating [J]. *Acta Optica Sinica* (张善文,营建新,高键翔. 应用互易定理优化法设计光通信光栅. 光学学报)2013, **33**(03):0305001-1-0305001-5.
- [12] PETIT R. *Electromagnetic theory of gratings* [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1980:181-188.
- [13] ZHAO Jin-Song, LI Li-Feng, WU Zhen-Hua. Method for controlling groove depth and duty cycle of rectangular photoresist gratings [J]. *Acta Optica Sinica*(赵劲松,李立峰,吴振华. 一种控制矩形光刻胶光栅槽深和占宽比的方法. 光学学报)2001, **24**(9):1285-1291.
- [14] LIU Qian, WU Jian-Hong, LI Chao-Ming. Design of beam sampling grating and study on its diffraction action [J]. *LASER TECHNOLOGY*(刘全,吴建宏,李朝明. 激光技术取样光栅的设计及衍射行为研究. 激光技术)2005, **29**(4):398-400.
- [15] LIU Shi-Jie, MA Jian-Yong, SHEN Zi-Cai, et al. Performance of multilayer dielectric grating irradiated by ultrashort optical pulse [J]. *Acta Physica Sinica*(刘世杰,麻健勇,沈自才,等. 多层介质膜脉冲宽度压缩光栅与超短脉冲作用时的性能分析. 物理学报)2007, **56**(8):4542-4549.
- [16] Paz V F, Peterha'nsel S, Frenner K, et al. Solving the inverse grating problem by white light interference Fourier scatterometry [J]. *Light: Science & Applications* 2012, **1**(1).
- [17] Breidne M, Maystre D. Equivalence of ruled, holographic, and lamellar gratings in constant deviation mountings [J]. *Appl. Opt.* 1980, **19**:1812-1821.

(上接 157 页)

- [15] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures [J], *Physical Review Letters*, 1990, **65**(25):3152-3155.
- [16] AO X, He S. Polarization beam splitters based on a two dimensional photonic crystal of negative refraction [J], *Optics Letters*, 2005, **30**(16):2152-2154.
- [17] Schonbrun E, Wu Q, Park W. Polarization beam splitter based on a photonic crystal heterostructure [J], *Optics Letters*, 2006, **31**(21):3104-3106.
- [18] Zhang Y, Jiang Y R, Xue W, et al. A broad-angle polarization beam splitter based on a simple dielectric periodic structure [J], *Optics Express*, 2007, **15**(22):14363-14368.
- [19] Leung K M, Qiu Y. Multiple-scattering calculation of the two-dimensional photonic band structure [J]. *Physical Review B*, 1993, **48**(11):7767-7771.
- [20] Sakoda K, Shiroma H. Numerical method for localized defect modes in photonic lattices [J], *Physical Review B*, 1997, **56**:4830-4835.
- [21] Pendry J B, Mackinnon A. Calculation of photon dispersion relation [J], *Physical Review Letters*, 1992, **69**(19):2772-2775.
- [22] Wang X D, Zhang X G, Yu Q L, et al. Multiple-scattering theory for electromagnetic waves [J], *Physical Review B*, 1993, **47**(8):4161-4167.
- [23] Bierwirth K, Schulz N, Arndt F. Finite-difference analysis of rectangular dielectric waveguide structures [J], *Microwave Theory and Techniques*, 1986, **34**(11):1104-1114.
- [24] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media [J], *Antennas and Propagation*, 1966, **14**:302-307.
- [25] Mekis A, Chen J C, Kurland I, et al. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides [J], *Physical Review Letters*, 1996, **77**(18):3787-3790.