文章编号:1001-9014(2014)02-0158-06

DOI: 10. 3724/SP. J. 1010. 2014. 00158

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 志林 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、低窜扰、通带平坦、复 用路数多、温度稳定性好以及尺寸小等特点^[24].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一简称阶梯光栅,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

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

收稿日期: 2012 -12 -07,修回日期: 2013 -09 -10 **Received date**: 2012 -12 -07, revised date: 2013 -09 -10

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^[9-40]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^[12-45].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-4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

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

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

$$f_{1} = \frac{d}{\pi} \left[\tan \alpha - \tan(\alpha + \phi) \right]$$
$$\sin \left[\pi \frac{\sin(\alpha + \phi) \cos \alpha}{\sin \phi} \right] \qquad (2)$$

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 $f_1 = 2h_{rect}/\pi$.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 ~ 1.59 μm、中心波长 λ 为 1.55 μm、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 ~ 0.25,下方横坐标矩形光栅归一化槽 深取值范围为 0.157 ~ 0.196,纵坐标三角槽形闪耀 角取值范围为 21°~35°,图中曲线对应槽顶角 118°~122°.



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 $h_{sin}/d = 0.2324$ 和 $h_{reet}/d = 0.1825$,则对应 的槽深 $h_{sin} \approx 194$ nm 和 $h_{ree}t \approx 152$ 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 正弦光栅衍射效率一槽深变化曲线 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	底角	槽深 h/nm		占宽比 c/d		衍射效率		备注
		最优	取值范围	最优 值	取值范围	峰值	取值范围	连续
		值						性
正弦		195	$175\sim 220$			95.0%	>94%	好
矩形	90°	160	$140\sim 180$	0.39	$0.30\sim\!0.45$	91.1%	>90%	稍差
梯形1	70°	180	$160\sim\!210$	0.40	$0.27\sim\!0.47$	91.7%	>90%	差
梯形2	50°	160	$160\sim 180$	0.42	$0.38 \sim 0.42$	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 上一定厚度的光刻胶膜层,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,将得 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 μm×10 μm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 的优化范围内.以此槽形计算得到光栅1.55 μm 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 μm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. $8\mu m$ 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. U-sing reciprocity theorem optimized method to design optical fiber telecommunication grating [J]. Acta Optica Sinica (张善文 蒼建新 高键翔. 应用互易定理优化法设计光

(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 heterost ructure [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 Re*view B, 1993, 48(11): 7767-7771.
- [20] Sakoda K , Shiroma H. Numerical method for localized defect modes in photonic lattices [J], Physical Review B ,

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.

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.