

文章编号: 0258-7025(2005)03-0301-05

9.77 μm 激光器零级耦合输出选频振荡 光栅的设计和研制

巴音贺希格, 高键翔, 齐向东, 李英海, 张坊城, 李春启

(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 建立了实际刻划光栅的物理模型, 给出了相应的衍射效率表达式, 进而阐述了红外激光器零级耦合输出选频振荡闪耀光栅的设计原理。根据理论分析结果, 采用调整刻划负载控制三角槽形闪耀光栅零级面, 双向逐步逼近 1 级和零级衍射效率设计值的方法和工艺, 研制了在利特罗(Littrow)安装下 1 级衍射效率为 86.5%, 零级衍射效率为 10.3% 的 9.77 μm 红外激光器零级耦合输出选频振荡镀金闪耀光栅。检验结果表明, 由加工误差引入的 1 级和零级衍射效率与设计中心值的偏离量分别仅为 0.6% 和 3%。

关键词 激光器; 闪耀光栅; 刻划工艺; 选频振荡; 零级耦合输出; 衍射效率

中图分类号 TN 243 文献标识码 A

Design and Manufacture for Select Frequency Oscillation Grating in the Zero-Order Coupling Output of 9.77 μm Laser

Bayanheshig, GAO Jian-xiang, QI Xiang-dong,
LI Ying-hai, ZHANG Fang-cheng, LI Chun-qi

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

Abstract The physical model of real ruled grating is proposed, the corresponding expression of diffraction efficiency is given, and design principle of blazed grating for frequency-selection oscillation in zero-order output for an infrared (IR) laser is introduced. On the base of the result of theory analysis, the technologies are adopted that adjusting the ruled load to control the zero-order plane of the grating and bi-directionally gradually approach the design value of the diffraction efficiencies of the zero-order and first-order, the gilt blazed grating is made with the first-order diffraction efficiency of 86.5% and the zero-order diffraction efficiency of 10.3% in Littrow form. The testing result shows that the deviations of the zero-order and first-order diffraction efficiency from the designed central value are only 0.6% and 3%, respectively.

Key words lasers; blazed grating; ruling techniques; select frequency oscillation; the zero-order coupling output; diffraction efficiency

1 引 言

当激光工作物质具有多条工作荧光谱线或一条较宽的荧光谱带时, 可使用棱镜或反射光栅等色散元件使工作物质激发的不同波长辐射光束发生空间

分离, 进而选择其中特定波长的光束使其获得光学反馈能力并在谐振腔内往返振荡, 其他波长的光辐射则被抑制^[1]。这种具有色散元件的选频振荡谐振腔称为色散腔, 且光栅色散腔对振荡波长范围的限制能力要强于棱镜色散腔。光栅色散腔较广泛地应

收稿日期: 2003-10-10; 收到修改稿日期: 2004-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(60478034, 10004011)和中国科学院知识创新工程(ZJ00K05B)资助项目。

作者简介: 巴音贺希格(1962—), 男, 蒙古族, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士, 现主要从事光栅理论研究和微光学元件设计与制作研究。E-mail: bayin888@sina.com

用于气体激光器远红外光谱区域多条工作谱线的选择振荡^[2~5],也用于有机染料激光器的单色选频振荡^[2],近年来外腔半导体激光器以光栅作为反馈元件^[6]亦较为常见。光栅谐振腔通常有两种类型^[7]:一种是光栅作为全反射镜装在一端,另一端是平面或球面的部分反射镜作输出耦合,其工作方式为一级振荡,一级输出^[2~5,7]。另一种是光栅作为全反射镜装在一端,另一端是平面或球面全反射镜,其工作方式为一级振荡,零级输出^[7]。激光光栅一般工作在一级利特罗(Littrow)状态下,而且,第一种类型的谐振腔要求尽可能大的一级衍射效率,自然零级衍射效率越小越好;第二种类型的谐振腔则需要一级和零级都有一定比例的能量,这样才能实现激光的零级耦合输出。注入式锁模激光器中用于激光耦合的光栅也相当于第二种类型^[7]。就光栅的刻划工艺而言,第二种类型金属光栅的制作难度要大于第一种类型。因为,第一种类型激光光栅面对的是如何在机械刻划工艺中达到光栅刻槽“全槽”,使得零级面达到最小即可,而第二种类型激光光栅面对的则是根据激光器设计者提出的技术指标,通过调整刻划负载控制三角槽形闪耀光栅零级面,使得一级和零级能量分配逐步逼近激光器工作需要,因而它也是刻划光栅中制作难度较大的一个种类。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所早在1958年就开始进行衍射光栅的研制,并于1959年制造出了光栅刻划机和衍射光栅^[8]。本文仅以9.77 μm红外激光器零级耦合输出选频振荡闪耀光栅的研制为例,从一个侧面报道我国机械刻划光栅制作技术的发展水平。

2 物理模型及设计原理

以往在建立锯齿形光栅的物理模型时,不约而同地将光栅槽形看作为三角形^[9,10],其实,这既不符合刻划光栅的实际情况,更无法分析像零级耦合输出选频振荡光栅这种一级和零级都有能量的光栅的衍射效率。实际的刻划光栅剖面如图1所示,金刚石刻划刀对铝膜进行两次刻划(挤压、抛光)后隆起的栅线顶端一般不是一条几何线,在显微镜下会明显地呈现为具有一定宽度的双线结构(即不是严格的三角形),通常称其为金属闪耀光栅的零级面。对

于光谱仪光栅以及激光谐振腔一级耦合输出光栅来讲,零级面是无益的,因为它要损耗能量,然而,红外激光器零级耦合输出原理却正是有效地利用了光栅零级面的镜面反射。

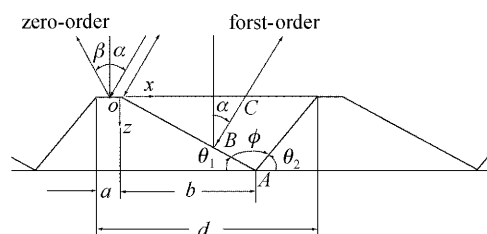


图1 闪耀光栅的一个周期单元
Fig.1 A period unit of blazed grating

为了能够推导出衍射效率的解析表达式,在此将闪耀光栅的零级面近似为平面。在图1中,设 d 为光栅常数, a 为零级面宽度, b 为有效闪耀面横向尺寸, θ_1 为定向角(闪耀角), θ_2 为非定向角, ϕ 为刀尖角, α 为入射角, β 为衍射角,利特罗安装下 $\alpha = \beta = \theta_1$ 。

根据能量守恒定律知,只要通过控制零级面尺寸使一级衍射效率定位于所要求的值,零级光强自然也被确定。设激光器色散腔使用的是反射式闪耀光栅,在透射孔径范围内的零级面属于镜面反射,所以,如图1所示反射式闪耀光栅一个周期单元内的等效透射函数可表示为(以坐标原点 o 为 x 方向的零点)

$$t(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{b}\right)e^{i\phi(x)} - \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \otimes \delta\left(x + \frac{a}{2}\right), \quad (1)$$

反射式闪耀光栅总的等效透射函数为

$$T(x) = t(x) \otimes \sum_{m=1}^N \delta[x - (m-1)d], \quad (2)$$

其中 \otimes 为卷积符号, N 为光栅刻槽数, m 为整数, $\text{rect}(x)$ 为矩形函数,有效闪耀面内反射光束的相位因子可由图1求出

$$\phi(x) = \frac{4\pi}{\lambda}x \sin\theta_1. \quad (3)$$

如果照明函数为

$$E(x) = e^{i2\pi f_0 x}, \quad (4)$$

则在光栅入射面上光振动分布为

$$U(x) = T(x) \cdot E(x), \quad (5)$$

衍射光振动分布 $U(f_x)$ 为 $U(x)$ 的傅里叶变换,即

$$U(f_x) = \left\{ b \text{sinc}\left[b\left(f_x - f_0 - \frac{2\sin\theta_1}{\lambda}\right)\right] - a \text{sinc}\left[a\left(f_x - f_0\right)\right] e^{-i\pi a(f_x - f_0)} \right\} \frac{\sin N\pi d(f_x - f_0)}{\sin \pi d(f_x - f_0)}, \quad (6)$$

式中 $f_0 = \sin\alpha/\lambda$, $f_x = \sin\beta/\lambda$ 。根据闪耀条件 $f_x - f_0 - 2\sin\theta_1/\lambda = 0$ 和 $f_x - f_0 = k/d$ 可得衍射光强分布(k

为衍射级次),并用衍射效率表示为

$$\eta_k = a^2 \text{sinc}^2\left(k \frac{a}{d}\right) + b^2 \text{sinc}^2\left[b\left(\frac{k}{d} - \frac{2\sin\theta_1}{\lambda}\right)\right] - 2ab \text{sinc}\left(k \frac{a}{d}\right) \text{sinc}\left[b\left(\frac{k}{d} - \frac{2\sin\theta_1}{\lambda}\right)\right] \cos\pi\left(k \frac{a}{d}\right), \quad (7)$$

(7)式的物理意义为第一部分为零级面的衍射因子,第二部分为有效闪耀面的衍射因子,第三部分代表了二者的叠加。在数值计算时需以第二项的系数 b^2 归一。考虑到金刚石刻划刀的耐磨性,刀尖角一般要大于 90° ,由图 1 可以求出有效闪耀面横向尺寸 b 与光栅常数 d ,零级面宽度 a ,定向角 θ_1 和非定向角 θ_2 的关系

$$b = \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2}(d - a), \quad (8)$$

因此,实际光栅不可能是 $b = d$,设计时要考虑到这一点。

9.77 μm 激光光栅的刻线密度为 130 mm^{-1} ,1 级衍射效率为 0.86 ± 0.01 ,零级衍射效率为 0.10 ± 0.01 。在 1 级闪耀模式下,由利特罗状态的光栅方程 $2d\sin\theta_1 = k\lambda$ 求得闪耀角 $\theta_1 = 39.43^\circ$,若将刀尖角磨制为 $\phi = 94^\circ$,则非定向角 $\theta_2 = 46.57^\circ$,于是,由(8)式求得有效闪耀面横向尺寸 $b = 0.5623(d - a)$ 。有了上述光栅参数之后,可以利用(7)式大致看出零级面对衍射效率产生影响的变化规律。经测试铝膜对 9.77 μm 红外光的反射率为 97.1%,下面的数值分析中计入了这一系数。

图 2 显示了 9.77 μm 红外闪耀光栅零级面对 1 级衍射效率的影响。可以看出,零级面与闪耀波长衍射效率的关系呈现非线性特征。当零级面 $a = 0$ 时,计算衍射效率等于铝膜对 9.77 μm 红外光的反射率 0.971;当零级面以 $\Delta a = 0.25 \mu\text{m}$ 递增时,1 级衍射效率的下降过程不是等间隔的。对应 0.25 μm 零级面的衍射效率为 0.86%。

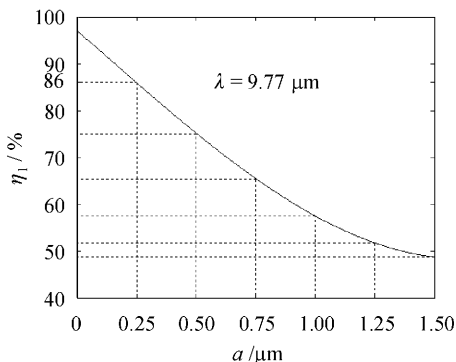


图 2 9.77 μm 闪耀光栅零级面与 1 级衍射效率关系
Fig. 2 Zero-order plane of 9.77 μm blazed grating as a function of diffraction efficiency of the first-order

在作理论分析时,还可以采用对(7)式数值求根的途径求得零级面宽度 a 的精确值,据此结果进行刻制。无论采用哪一种方法,只要能够给出零级面的大致范围以及零级面与闪耀波长衍射效率的关系就可认为已达到目的。因为,刻划衍射光栅是一个复杂的工艺过程,在实际刻划光栅时还需要根据膜层厚度、铝材纯度和韧性、刻划刀角度、刻划负载以及刻划刀的刃线与刻线方向保留的张角(即刃线与刻线方向不严格平行,保留约 $2' \sim 3'$ 的经验值,以加大刻划过程中刻划刀对栅线的侧向压力,强化刻划刀定向面对光栅闪耀面的抛光作用)大小等条件经过若干次实验和检验,最终确定待刻光栅的正式刻划参数。

3 制作工艺

大功率红外激光器用闪耀光栅必须是金属基底原刻光栅。一般可以选择优质紫铜、无氧铜或不锈钢等金属材料作为光栅基底。考虑到材料价格、毛坯(基底)精加工难度和表面粗糙度控制等因素,在能够满足使用要求的前提下常以优质紫铜为首选对象。光栅的大致制作过程为毛坯加工 \rightarrow 蒸镀(或电镀)金属膜(铬膜+铝膜) \rightarrow 光栅刻划 \rightarrow 效率检验 \rightarrow 附着保护膜。其中,光栅刻划的周期长、工艺难度大,过程复杂,是保证光栅技术指标的主要环节。光栅衍射效率的高低与金刚石刻划刀的刀尖角密切相关,由(7),(8)式计算可知,刀尖角小则利于实现高衍射效率,反之亦然。然而,如前所述刀尖角需大于 90° 。零级耦合输出选频振荡光栅与光谱仪光栅以及激光谐振腔 1 级耦合输出光栅显著的不同点在于它不追求最大衍射效率,而是要求 1 级和零级具有满足一定比例关系的能量分配,因此,要根据激光器不同的能量输出方式选取相应的刀尖角。对于 1 级衍射效率为 86%,零级衍射效率为 10%的光栅,刀尖角取 94° 比较适宜,因为 86% 的 1 级衍射效率已不算低,刀尖角不宜过大,否则,将会出现较大的零级面,衍射效率在刻划过程中不易得到有效控制。如果 1 级衍射效率要求较低,刀尖角可以更大一些,如 $98^\circ, 102^\circ, 110^\circ$ 等。

在已经满足光栅刻划的条件下,在刻划工艺过

程中需要通过改变刻划负载→镜下观察零级面(这一步要借助于丰富的实践经验,零级面的实际测量非常不方便,而且不容易量化)→衍射效率检验→调整刻划负载→零级面再观察→衍射效率再检验等复杂的循环,直至达到预定的技术指标。零级面与刻划负载基本成反比关系,刻划负载越大零级面越小,零级衍射效率自然要小,1级衍射效率会得到提高,反之亦然。检验手段主要为高倍显微镜下观察零级面的大小,并估算相应的衍射效率(也可以用原子力显微镜实测零级面,再做衍射效率检验,但由于这样做不够经济和方便,工艺中不当作首选方法),再用衍射效率检验设备做实际检测。当然,并非刻划负载越大越有利于1级衍射效率的提高,若刻划负载过大,会出现“过全槽”现象,导致栅线不光滑,光栅表面粗糙度增加,反而会降低衍射效率。对激光谐振腔零级耦合输出选频振荡光栅而言,必须留有一定量的零级面才能实现激光的输出。

对光栅制作来讲,杂散光检验、衍射效率检验、波阵面误差检验和分辨本领检验是必不可少的。在9.77 μm 红外激光器零级耦合输出光栅的制作中,采用的是所谓“衍射效率的双向逐步逼近法”(制作此类光栅的通用方法),即改变刻划负载(间接改变零级面),并分别从高衍射效率和低衍射效率两端向衍射效率设计值逼近,实验数据如表1所示。由于86%的1级衍射效率已属于高衍射效率范围,根据光栅刻划经验,第一次试刻划应使用较大的刻划负载,观察零级面,并检验衍射效率。若此时检验值离设计值较远则要使用较小的刻划负载,从两个方向逐步逼近设计值,最后选用合理的刻划参数进行正式刻划。从表1实验数据看出,从基本趋势来讲,随着刻划负载的加大,1级衍射效率增大,零级衍射效率减小,但不是线性关系,与图2给出的变化规律基本吻合。

表1 1级和零级衍射效率与刻划负载关系

Table 1 Relation between diffraction efficiency and ruling load

Load /g	18.0	20.2	20.5	23.0	25.0
First-order /%	70.0	85.9	86.5	87.5	89.6
Zero-order /%	24.5	11.0	10.3	7.0	6.1

当然,需要说明的是关于零级面的计算值,图2只是将光栅双线结构的栅线当作平面的近似值,因而实际值与计算值之间存在偏差不可避免。再加上标量衍射理论处理特征尺寸接近使用波长的光栅问

题时的不可靠性^[11],用反射式闪耀光栅的等效透射函数与照明函数之乘积的傅里叶变换表示光栅的衍射效率尽管物理图像清晰,也只能粗略考察大致变化规律。不过,长期的刻划经验告诉我们,能够了解到大致变化规律是十分必要的,对利特罗状态下的红外激光器光栅来讲甚至可以说已经足够了,因为,刻划光栅的技术指标最终决定于刻划工艺。当然,如果采用严格矢量理论作计算则能够考察光栅的偏振特性和光栅异常现象等,但是,更为重要的还是需要制作出合格的激光光栅来。

9.77 μm 红外激光器零级耦合输出选频振荡闪耀光栅选用优质紫铜为基底材料,并经过特殊抛光工艺和增强不同种金属间亲和力的技术做表面处理,其后蒸镀符合刻制红外光栅所需厚度的铝膜,通过机械刻划的手段在铝膜上刻制光栅,最后在铝质闪耀光栅上镀一层金膜防止光栅表面氧化。由于在红外波段金膜和铝膜反射率几乎相等^[7],经检验镀金膜后光栅的衍射效率与原刻铝膜光栅基本保持不变。

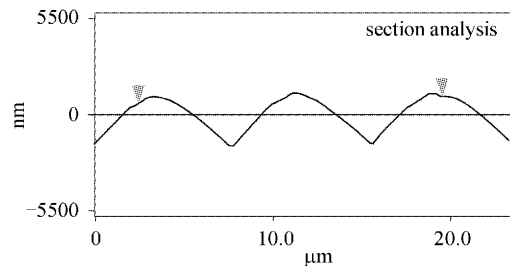


图3 成品光栅的原子力显微镜剖面分析

Fig. 3 Section plane for AFM of finished grating

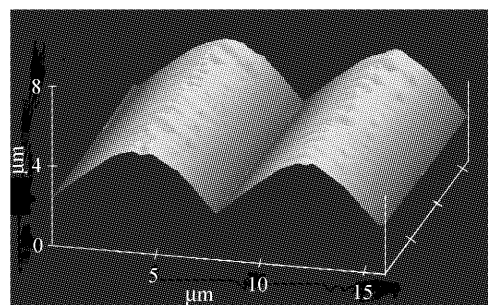


图4 成品光栅的原子力显微镜三维形貌图

Fig. 4 Three dimension AFM of finished grating

图3和图4分别为成品光栅的原子力显微镜(AFM)剖面图和原子力显微镜三维形貌图。从图3和图4可以看到零级面的结构,且零级面较为粗糙。刻划实验证明,如果1级衍射效率要求较低,双线结构则会更为明显,同时其距离会加宽,零级衍射效率

自然要增大。与此相反,1级衍射效率很高的闪耀光栅,其零级面的双线距离会更为接近,栅线将变得较为尖锐,基本趋于三角形锯齿状。9.77 μm 激光器零级耦合输出选频振荡闪耀光栅的正式刻划参数采用了表1第三列的数据(第二列的数据也符合设计要求),成品光栅在利特罗安装下1级衍射效率为86.5%,零级衍射效率为10.3%,这一结果表明,由加工误差引入的1级和零级衍射效率与设计中心值的偏离量分别仅为0.6%和3%,栅线顶端的漫反射将会有微弱的能量损耗。

4 结 论

本文建立了实际刻划光栅的物理模型,给出了相应的衍射效率表达式,阐述了红外激光器零级耦合输出选频振荡闪耀光栅的设计原理,并以9.77 μm 红外激光器用1级振荡零级输出镀金闪耀光栅的研制为例,报道了我国机械刻划光栅制作技术的发展水平。在此类光栅的制作过程中,采用了一种通过调整刻划负载来控制三角槽形闪耀光栅零级面,由高和低衍射效率两个方向逐步逼近1级和零级衍射效率设计值的方法和工艺,研制出的红外激光光栅,其由加工误差引入的1级和零级衍射效率与设计中心值的偏离量分别仅为0.6%和3%。对衍射光栅的制作来讲,能够达到上述刻划精度说明了依靠刻划过程中衍射效率的双向逐步逼近法实现红外光栅1级和零级能量任意分配的技术是较为成熟和可靠的。

参 考 文 献

- G. Capelle, D. Phillips. Tuned nitrogen laser pumped dye laser [J]. *Appl. Opt.*, 1970, 9(12):2742~2745
- He Guangsheng, Wang Runwen, Wang Mingchang. Laser Physics [M]. Shanghai: Shanghai Peoples Publishing Press, 1975. 89~91
- Tian Zhaoshuo, Wang Qi, Wang Yusan *et al.*. Study of RF excited waveguide CO₂ laser with two channels tuned by grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11):961~964
- 田兆硕,王 骐,王雨三等. 光栅选支共电极双通道射频激励波导 CO₂ 激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11):961~964
- Tian Zhaoshuo, Wang Qi, Wang Yusan. Study on electrooptically Q-switched RF excited CO₂ waveguide laser with tunable output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6):505~508
- 田兆硕,王 骐,王雨三. 输出可调的电光调 Q 射频激励波导 CO₂ 激光器的研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6):505~508
- Jiang Dong, Zhou Dingfu, Hou Tianjin *et al.*. Study on CO₂ laser for active imaging lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):397~401
- 江 东,周鼎富,侯天晋等. 激光主动成像雷达 CO₂ 激光器研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):397~401
- Chao Zhixia, Wu Jian, Yin Chunyong *et al.*. 633 nm tunable external-cavity diode laser used for beatwave Fabry-Perot interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3):201~204
- 晁志霞,吴 健,殷纯永等. 可用于差拍法-珀干涉仪的 633 nm 可调谐外腔半导体激光器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3):201~204
- Zhu Shaoji, Zou Haixing, Bao Xuecheng *et al.*. Diffraction Grating [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Company, 1986. 312~325
- 祝绍箕,邹海兴,包学诚等. 衍射光栅[M]. 北京:机械工业出版社, 1986. 312~325
- Liang Haoming, Zhuang Kui, Zhang Qingying *et al.*. The diffraction grating ruling engines [J]. *Acta Optica Sinica*, 1981, **1**(1):51~58
- 梁浩明,庄 夔,张庆英等. 衍射光栅刻划机[J]. *光学学报*, 1981, **1**(1):51~58
- Zhao Bo, Yan Lei, Li Yuanqing *et al.*. Analysis of blaze gratings with Fourier optics [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(2):103~108
- 赵 博,晏 磊,李颜青等. 闪耀光栅的傅里叶分析[J]. *光学技术*, 2001, **27**(2):103~108
- Zhang Yaoju, Zheng Chongwei. Diffraction analysis of step gratings with Fourier optics [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(6):510~512
- 张耀举,郑宗伟. 台阶光栅衍射的傅里叶分析[J]. *光学技术*, 2002, **28**(6):510~512
- D. A. Pomet, M. G. Moharma, E. B. Grann. Limits of scalar diffraction theory for diffractive phase elements [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(6):1827~1834