

# 600线/mm大闪耀角激光光栅研制

张庆英 张秀兰

**摘要:** 文章介绍了用于染料激光器的600线/mm大闪耀角激光光栅的制造技术, 分析了偏振效应, 计算了伍德 (Wood) 反常对光栅衍射光强度分布及闪耀效率的影响, 提供了有关刻划参数, 给出了所刻光栅对两种偏振光的绝对衍射效率,  $\eta_{E_{\parallel}}$  最高为86%,  $\eta_{E_{\perp}}$  最高为59%。

## 一、前言

激光光栅作为波长选择元件已广泛应用于激光器中。由于激光技术的发展, 激光光栅已形成了系列。

激光光栅一般用于偏振光, 要求大闪耀角, 高色散, 高闪耀效率。用于大功率激光器的光栅要求具有很高的耐热性, 因此, 有的激光光栅采用金属基板, 并镀金膜。

根据需要, 我们制造了用于染料激光器的光栅。光栅刻划面积  $63 \times 36 \text{mm}^2$ , 对S偏振光有  $47^\circ$ 、 $54.5^\circ$ 、 $63^\circ$  三种闪耀角。自准状态使用。

光栅刻槽刻制在玻璃基板的真空蒸涂铝膜上。已制成了原刻光栅及其复制光栅, 两种光栅均已投入了使用。

## 二、光栅性能

光栅的衍射光强度是用氩离子激光器输出的有关波长的P偏振光以及借助于旋光片获得的S偏振光在光栅自准状态下测量的。衍射光强度的测量误差小于 $\pm 2\%$ 。光栅分辨本领是

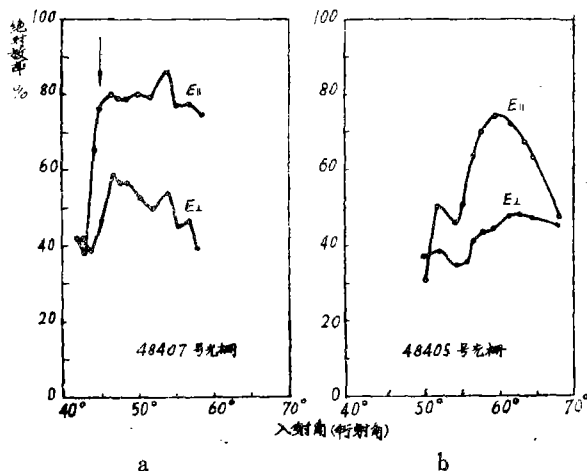


图1 光栅衍射光强度分布曲线

在4m焦距的光栅摄谱仪上通过汞灯的 546.1nm 谱线半宽度测量的。

表 1 给出了48405, 48406, 48407号三块原刻光栅及 F48405-7-2 一块复制光栅衍射光强度分布的数据。图 1 绘出了48405, 48407 号两块光栅的衍射光强度分布曲线和绝对闪耀效率。

表1

波长nm	光谱级	入射角	绝对效率 %	光 栅 编 号			
				48405	48406	48407	F48405 -7-2
454.5	5	43°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$			42 42	
457.9	5	43.5°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$			38 39	
476.5	5	45.5°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$			76 47	
488.0	5	47°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$			80 59	
496.5	5	48°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$		60 32	77 56	
501.7	5	49°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$		60 34	78 56	
514.5	5	50.5°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	30 36	69 34	80 52	36 33
528.7	5	52°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	50 38	78 31	78 50	
454.5	6	54.5°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	44 34	74 48	86 54	
457.9	6	55.5°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	50 34	68 44	76 44	57 32
465.8	6	57°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	63 42	71 42	77 47	
472.7	6	58°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	70 43	69 39	74 39	
476.5	6	59°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	75 43	67 35		68 36
488.0	6	61.5°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	71 47	60 30		68 42
496.5	6	63°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	68 48			67 37
501.7	6	64.5°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	63 46			58 33
514.5	6	68°	$E_{\parallel}$ $E_{\perp}$	47 45			42 27

### 三、制造技术

#### 1. 偏振特性的分析与钻石刀安装角的选择

理论和实验研究指出,光栅对偏振光的衍射特性与对非偏振光的衍射特性不同。并且对  $P$  及  $S$  两种偏振光的衍射特性也不一样,两者都不符合建立在标量模型基础上计算所得的属性<sup>[1][2]</sup>。主要表现为闪耀角不同,闪耀效率不同;衍射效率随着波长的变化会发生突变。研究发现,波长、入射角、光栅槽形、膜层结构等都是导致这种差异的原因。文献<sup>[1]</sup>就报导了伍德用软鹿皮沿光栅刻线方向轻擦表面后消除了偏振效应而大大提高了光强度的实验结果。可见,光栅偏振效应与光栅槽形是紧密相关的,对槽形变化的反应是很敏感的。因此,即使认为是在同样条件下刻划的光栅,其偏振特性也不一定完全一致。

许多学者曾沿刻槽对入射光与衍射光解边界值或从波导的角度考虑光栅的衍射,用以研究光栅偏振特性,计算衍射光强度,但结果都不是十分满意的。Э.А.雅可夫列夫(Э.А.Яковлев)对偏振光光栅衍射光强度进行了详细计算,并给出了计算公式<sup>[3]</sup>,但他的理论也仅适用较小闪耀角的情况。对大衍射角,我们是通过实验取得需用的闪耀位置的。实验表明,无论是  $P$  偏振光还是  $S$  偏振光,闪耀角的转移量都是很大的。对于刻划 600 线/mm 大闪耀角激光光栅来说,钻石刀安装角应在光栅方程式给出的角度的基础上增加一较大的修正量。图 2 示出了钻石刀安装角与光栅闪耀角关系的部分实验结果。从图 2 中能明显看出,在  $P$  偏振情况下,当钻石刀安装角为  $76^\circ$  时,光栅才能在 488.0nm 六级,即衍射角  $61.5^\circ$  实现闪耀。当然相位转移量还受钻石刀几何参数,膜层厚度和结构以及调整方法等诸因素影响,因此在选择钻石刀安装角时还需同时考虑这些因素的影响。

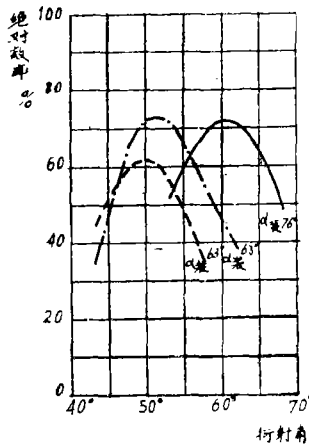


图 2 钻石刀安装角与光栅闪耀角关系 ( $E_1$  时)

#### 2. 伍德反常对光栅衍射光强度影响的计算

光栅对偏振光的衍射会出现较强的衍射效率反常,即在光栅衍射光谱中出现窄而强的亮带或暗带,或者自某一波长衍射光强度发生突然增加或减小。这种反常对每毫米 600 及 1200 条线的密线条光栅是严重的<sup>[2][4]</sup>。一般来说,反常随着光谱级次的增高而加强。当光栅刻槽深度小于波长时,光栅对  $P$  偏振光的衍射效率反常会明显减弱。伍德反常就是上述衍射效率反常的一种。

伍德反常出现在光谱中的位置对P及S两种偏振光是一致的。由于我们制造的光栅是每毫米600条线的,又用于大衍射角,特别是闪耀角63°的光栅用于反常强烈的光的S偏振分量,因此计算了反常波长及衍射角,估计了对衍射光强度分布的影响。计算是按照瑞利(Rayleigh)公式进行的。公式为

$$\lambda_R N_R = d(\sin i \pm 1),$$

式中 $\lambda_R$ 为瑞利波长, $N_R$ 为瑞利级, $d$ 为光栅常数, $i$ 为入射角。光强度的激烈变化出现在瑞利波长。表2列出了光栅在应用的衍射角范围内应用和检测波长与瑞利波长的波长差。计算结果表明,在应用和检测波长476.5nm的六级,即衍射角45.5°处,应用及检测波长极接近瑞利波长,故在此处发生伍德反常。在其它衍射角上伍德反常的影响将随波长差的加大而减弱和消失。其关系示于表2和图3。表2列出的454.5nm六级至514.5nm六级是检测波长及

表2

检测与应用 波长 $\lambda$ (nm)	光谱级次	入射角 (衍射角)	瑞利波长 ( $\lambda_R$ nm)	$ \lambda - \lambda_R $ (nm)
454.5	5	43°	467.2	12.7
476.5	5	45.5°	476.3	0.2
488.0	5	47°	481.1	6.9
496.5	5	48°	484.7	11.8
501.7	5	49°	486.8	14.9
514.5	5	50.5°	492.2	22.3
528.7	5	52°	498.0	30.7
454.5	6	54.5°	432.9	21.6
457.9	6	55.5°	434.3	23.6
465.8	6	57°	437.7	28.1
472.7	6	58°	440.7	32.0
476.5	6	59°	442.3	34.2
488.0	6	61.5°	521.8	33.8
496.5	6	63°	526.0	29.5
501.7	6	64.5°	528.6	26.9
514.5	6	68°	535.0	20.5

光谱级,实际应用的波长及光谱级是545.4nm五级至617.4nm五级,此应用波长范围也不出现反常。

根据计算可以估计闪耀角63°的光栅应能获得较为规则的衍射光强度分布和较高的闪耀效率。实际刻划出的48405号光栅的衍射光强度分布完全符合了这一规律(见图1, b)。计算结果也预示了闪耀角47°的光栅,在闪耀中心

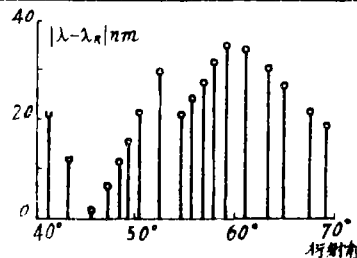


图3 检测(应用)波长与瑞利波长差

偏短波一侧存在衍射效率突然降低的可能。实际刻划的 48407 号光栅确是明显的表现了这种特征。该光栅对  $P$  偏振光的衍射效率从 476.5nm 五级（衍射角  $45.5^\circ$ ）开始至 457.9nm 五级（衍射角  $43.5^\circ$ ）止，虽衍射角仅变化了  $2^\circ$ ，但衍射效率却下降了 38%。对  $S$  偏振光时影响小些，但也在  $3.5^\circ$  的范围内下降了 20%。这一反常位置用箭头示于图 1. a 中。可见伍德反常对衍射效率的影响是十分严重的。因此，刻划处于反常区域的光栅时需根据具体情况适当选取刻划条件，尽量减小伍德反常的影响。48407 号光栅在衍射效率反常点对  $P$  及  $S$  两种偏振光的衍射效率虽然受到了伍德反常的影响而有所下降，但仍然达到了 38% 和 39%，达到了一般的使用要求，所以，这块光栅的制造是成功的。

### 3. 刻划参数及刻划机

前已谈到钻石刀的安装角需增加一较大的修正量，因此钻石刀允许采用的刀尖角将变小，这样便降低了钻石刀的耐用度。为了提高钻石刀在小刀尖角下的使用寿命，我们对钻石刀进行了精选，并采用了精确定向的钻石刀<sup>[6]</sup>，同时选择了适宜硬度的铝膜。实验表明铝膜硬度不大于 HV140 kg/mm<sup>2</sup>，对于刻划出较好的光栅是必要的。

铝膜的相对厚度，即  $t/h$  值（ $t$  为铝膜厚度， $h$  为光栅刻槽深度）对光栅衍射光强度分布形态及最大光强度值有直接影响。我们的实验结果是  $t/h$  值为 3 至 4 较为适宜。

为了保证光栅在大衍射角下应用时具有优质的谱线、尽可能弱的卫线、鬼线和散射光，光栅是在干涉控制连续刻划高精度光栅刻划机<sup>[6]</sup>上刻制的。机器控制精度为  $\pm 0.01\mu\text{m}$ 。图 4 是 48407 号光栅在 632.8nm 四级，衍射角  $49.4^\circ$  时的衍射波前的干涉图形照片。光栅面积为  $63 \times 36\text{mm}^2$ 。光栅实际分辨本领在 546.1nm 五级为 11.6 万，是理论分辨本领的 63%。光栅的卫线，特别是鬼线是很弱的，用现用设备已无法定量测量。

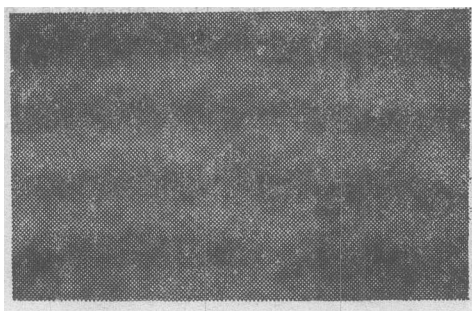


图 4

## 四、结 语

前已谈到 600 条/mm 的光栅在大衍射角下的偏振效应是严重的，在选用时应予考虑。我们的实验结果是  $\eta_{E1} > \eta_{E2}$ ，因此推荐应用光的  $P$  偏振分量。

复制光栅是刘凤义、张成山同志制造的。感谢梁浩明主任的指导，李永贵同志对光栅检测的协助，以及全室同志的支持和协作。

参 考 文 献

- [ 1 ] G.W.Stroke, Attainment of High Efficiencies in Blazed Optical Grating by Avoiding Polarization in the Diffracted Light, Phys. Lett., 1963, 5, 45.
- [ 2 ] H.R.Sanchez, M.C.Simon, et al., Polarization Properties of Diffraction Gratings, J.O.S.A., 1976, 66, 10, 1055.
- [ 3 ] Э.А.Яковлев Расчет Распределения Интенсивности Дифракционной Решеткой в Поляризованном Свете, Оптика и Спектроскопия, 1965, 19, 3, 417.
- [ 4 ] Ф.М.Герасимов И.Т.Д., Дифракционные Решетки Государственного Оптического Института, Оптика и Спектроскопия, 1958, 4, 6, 779.
- [ 5 ] 孙锡彝, 金刚石刀具—光栅刻划刀的X光定向, 工具技术, 1984, 2, 12.
- [ 6 ] 梁浩明等, 衍射光栅刻划机, 光学学报, 1981, 1卷1期, 51.

**Research and Fabrication of Laser Gratings  
with Large Blazed Angles for 600 grooves/mm**

Zhang Qingying Zhang Xiulan

**Abstract**

This paper introduces the fabrication technics of laser gratings with large blazed angles for 600 grooves/mm used for the tunable dye lasers. It analyses the polarization effect, calculates the Wood's anomalies which often influences the blaze efficiencies. At the same time, it also provides the ruling parameters and the absolute efficiencies of polarize lights, the  $\eta_{E\parallel}$  max is 86% and the  $\eta_{E\perp}$  max is 59%.