

# 铝膜厚度对刻划衍射光栅闪耀效率的影响

张庆英 刘桂琴

**摘要:** 文章阐述了控制衍射光栅铝膜厚度的重要性。提出了用厚度系数标定铝膜厚度的方法。实验研究了铝膜厚度对衍射光栅闪耀效率的影响,给出了铝膜厚度系数的最佳范围。研究结果已用于生产。

## 一、引 言

闪耀效率是衍射光栅的重要性能,对此已有很多理论上的计算与实验上的研究<sup>[1][2][3]</sup>。其中 E. G. Loewen<sup>[2]</sup>较全面地给出了槽形顶角为 $90^\circ$ 的三角形刻槽的衍射光栅于自准状态或对应不同的入射角及衍射角时的理论闪耀效率。

光栅铝膜的厚度和性能、金刚石刻刀的质量、刻划调整技术、刻划机的性能等,都是导致实际光栅的闪耀效率低于它的理论闪耀效率的重要原因。

由于光栅槽形是在铝膜上以无屑挤压的方式形成,因此铝膜的厚度和刻划性能便成为能否制成符合理想要求的刻划轮廓获得高闪耀效率的基本条件<sup>[4]</sup>。

从有利于刻划调整并获得光栅的高闪耀效率的观点出发,我们对铝膜厚度进行了实验研究,选择出了铝膜的最佳厚度范围,本文即介绍这方面的工作。

为了确切地反映铝膜厚度和铝膜刻划性能与光栅闪耀效率之间的关系,实验中我们控制铝膜的晶粒度、硬度、反射率及金相结构等,使之处在适宜范围内,这些研究将在另文介绍。

## 二、铝膜厚度的测量及标定

我们研究的光栅的闪耀波长范围在 $253.7\text{nm}$ 至 $10.6\mu\text{m}$ 之间,光栅刻线密度由 $100\text{线}/\text{mm}$ 至 $1800\text{线}/\text{mm}$ ,最高光谱级次为六级。由于这些光栅的计算刻槽深度约由 $0.1\mu\text{m}$ 至 $3.5\mu\text{m}$ ,光栅铝膜厚度仅在零点几至几微米范围内,因此采用了白光干涉仪和阶梯高度测量仪(Talystep)两种方法测量铝膜厚度。阶梯高度测量仪最高分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ ,能有效地测量薄铝膜的厚度。图1是用该仪器测量膜厚的记录。图中曲线上、下两段较水平的部分,分别是铝膜表面和光栅基板表面,中间是阶梯过渡区,两水平部分沿纵坐标的距离表示膜厚。该次测量的格值当量为 $0.02\mu\text{m}$ ,故膜厚约为 $0.14\mu\text{m}$ 。由于铝膜与光栅基板之间镀有一层铬膜,约为 $5\text{nm}$ ,因此将测得的膜厚减去铬膜

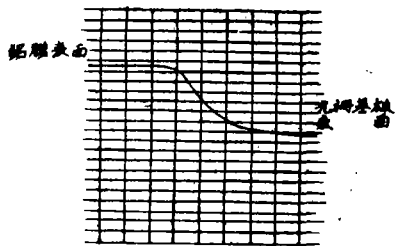


图1 膜厚测量记录,纵向 $0.02\mu\text{m}/\text{格}$

厚度即是铝膜厚度。

光栅刻槽深度与光栅周期  $d$ 、闪耀角  $\alpha$  及刻槽顶角  $\theta$  有关，根据推导可表示为

$$h = d \frac{\tan \alpha \cdot \tan(180^\circ - \theta - \alpha)}{\tan \alpha + \tan(180^\circ - \theta - \alpha)},$$

我们采用铝膜厚度系数  $k$  的概念，标定铝膜的相对厚度， $k = H/h$ ，其中  $H$  为铝膜厚度， $h$  为光栅刻槽深度。

### 三、铝膜厚度对光栅闪耀效率影响的试验

针对光栅刻划技术工艺性强的特点，为了尽量避免偶然性因素的影响，以便最大限度地保持试验数据的准确性，我们采用对各种厚度的铝膜进行多次刻划试验，并从中选取比较高的闪耀效率作为这种厚度的铝膜所能获得的闪耀效率的代表。下面各表列出实验结果，表中试验序号注有\*者是成品光栅。

全部光栅都是按自准状态应用而制造和检测的。闪耀效率检测应用常规方法，光源为低压汞灯或氩离子激光光源和二氧化碳激光光源。

表1、表2、表3及4表列出了1800线/mm、1200线/mm、600线/mm一级闪耀光栅和600线/mm二级闪耀光栅的相对闪耀效率与铝膜厚度系数关系的实验结果。

表1 1800线/mm光栅,一级

实验序号	48515	48453	48405	48416	*48001	48433
铝膜厚度系数 $k$	0.8	1.1	1.5	1.9	2.4	3.2
闪耀波长 $\mu\text{m}$	435.8	508.5	313.2	253.7	435.8	253.7
闪耀角	23°6'	27°16'	16°22'	13°12'	23°6'	13°12'
相对效率	53%	48%	57%	76%	78%	75%

表2 1200线/mm光栅,一级

实验序号	3.83—11.10	47914	*38514	*38329	*38320	*38507
铝膜厚度系数 $k$	0.9	1.5	1.7	1.9	2	3.6
闪耀波长 $\mu\text{m}$	313.2	546.1	313.2	313.2	546.1	253.7
闪耀角	10°50'	19°8'	10°50'	10°50'	19°8'	8°45'
相对效率	<50%	64%	84%	81%	76%	78%

表 3 600线/mm光栅, 一级

实验序号	T-1	3.83—11.28	48259	48268	48272	*48202
铝膜厚度系数 $k$	0.8	1.5	2.2	2.5	2.5	2.7
闪耀波长nm	313.2	313.2	546.1	546.1	643.8	365.0
闪耀角	5°23'	5°23'	9°26'	9°26'	11°8'	6°17'
相对效率	<50%	60%	72%	80%	73%	88%

表 4 600线/mm光栅, 二级

实验序号	48261	*48203	*48003	*48204	*48208	48269
铝膜厚度系数 $k$	1.0	1.1	1.3	1.6	3	3.5
闪耀波长nm	546.1	546.1	546.1	546.1	313.2	435.8
闪耀角	19°8'	19°8'	19°8'	19°8'	10°5'	15°9'
相对效率	52%	57%	67%	73%	70%	72%

表 5 为 600 线/mm 光栅对偏振光五或六级的相对闪耀效率与铝膜厚度系数  $k$  的关系的实验结果。

表 5 600线/mm光栅, 五或六级

实验序号	48440	48420	48442	48437	48445	*48407
铝膜厚度系数 $k$	1.1	1.7	2.8	4.1	4.5	5.3
闪耀波长nm	488.0	514.5	488.0	454.5	476.5	454.5
光谱级次	五	五	五	六	六	六
闪耀角	47°3'	50°31'	47°3'	54°53'	59°4'	54°53'
相对效率 $E_{  }$	51%	74%	70%	75%	82%	86%

表 6 是 300 线/mm 红外光栅的相对闪耀效率与铝膜厚度系数的关系的实验结果。

表 6 300线/mm光栅, 一级

实验序号	18512	18515	*18505	*18506	18517
铝膜厚度系数 $k$	1.6	2.3	2.3	3.2	3.3
闪耀波长 $\mu\text{m}$	1.93	1.63	1.63	1.93	1.52
闪耀角	16°50'	14°9'	14°9'	16°50'	13°11'
相对效率	50%	67%	73%	82%	88%

表 7 是 100 线/mm 红外光栅对 10.6 $\mu\text{m}$  偏振光一级绝对效率与铝膜厚度系数关系的实验结果。

表7 100线/mm光栅,一级,闪耀角32°

实验序号	*18510	*18511	*285010	*285012	*285013
铝膜厚度系数 $k$	0.63	0.63	1.37	1.37	1.37
绝对效率 $E_{\perp}$	86%	84%	91%	90%	90%

#### 四、铝膜厚度系数下限的确定

观察表1—7会清楚地发现, 各类光栅的闪耀效率都随着铝膜厚度系数 $k$ 的增加而提高, 当 $k$ 值增加到一定值时, 闪耀效率才能达到较高值。可见, 为了获得光栅的高闪耀效率, 合理地选择铝膜厚度系数下限是重要的。实验表明, 各类光栅铝膜厚度系数下限是不同的。

对表1的1800线/mm光栅,  $k$ 为1.9、2.4、3.2的三种实验均取得了大于75%的相对闪耀效率。如\*48001号光栅,  $k$ 值为2.4, 对波长435.8nm的相对闪耀效率为78%, 此值已达到了理论闪耀效率的79%<sup>[2]</sup>, 可以说这一闪耀效率是很高了。与此相反, 对 $k$ 值为1.5、1.1及0.8的三次实验, 光栅相对闪耀效率均小于57%。因此这种光栅的 $k$ 值下限可控制在2左右, 对1800线/mm光栅与这一 $k$ 值相对应的铝膜厚度约为0.24 $\mu\text{m}$ 。

对表2所列的1200线/mm光栅, 应用 $k$ 为1.7至3.6的四种铝膜厚度实验获得了74%至86%的高闪耀效率。如光栅\*38514及\*38329,  $k$ 值分别为1.7和1.9, 光栅对波长313.2nm的相对闪耀效率分别是84%和81%, 为理论闪耀效率的92%和90%<sup>[2]</sup>。而 $k$ 值为1.5及0.9的实验, 光栅效率均在64%以下, 因此 $k$ 值下限也应选在2附近。

从表3、表4和表5列出的600线/mm光栅的实验结果可看出, 对一级闪耀的光栅限制 $k \geq 2$ 是有利的。因为 $k$ 为1.5的3.83—11.28号实验光栅仅取得了60%的相对闪耀效率, 而当 $k$ 值增加到2.2时才取得了好的实验结果, 如48259号实验光栅, 相对效率达到了72%, 是理论闪耀效率的80%<sup>[2]</sup>左右。对二级闪耀的光栅来说,  $k$ 值为1.6的\*48204号光栅, 对波长546.1nm的相对闪耀效率达到73%, 是理论闪耀效率的80%<sup>[2]</sup>。那些五或六级闪耀的大闪耀角光栅(见表5),  $k$ 由1.7至5.3的五种 $k$ 值的实验对 $E_{\parallel}$ 偏振光均取得了大于70%的相对闪耀效率, 因此这两种光栅 $k$ 值的下限取2也是妥当的。

按上述分析, 三种刻线密度光栅的铝膜厚度系数下限虽有差别, 但都可选择为2, 与此 $k$ 值相对应的铝膜最小厚度范围为0.3 $\mu\text{m}$ 至1 $\mu\text{m}$ 。

一般说来, 粗线条红外光栅能够获得几乎接近理论闪耀效率的高闪耀效率。在表6中, 300线/mm一级闪耀的红外光栅的实验表明, 要取得好的结果, 应增大铝膜厚度系数。因此, 这类光栅 $k$ 值下限取3左右有利。与此 $k$ 值下限相对应的铝膜厚度约为2.5 $\mu\text{m}$ 至2.8 $\mu\text{m}$ 。

对100线/mm的红外光栅, 我们取 $k$ 为2, 厚度约7 $\mu\text{m}$ 的铝膜实验, 最高获得过93%的绝对闪耀效率, 此值已达到了理论闪耀效率的98%。取 $k$ 为1.37, 厚度为5 $\mu\text{m}$ 左右的铝膜实验, 一般闪耀效率为90%, 是理论闪耀效率的95%, 如表7 \*285010、\*285012、\*285013光栅。因此, 对于特别追求峰值效率的这种光栅, 控制 $k$ 值达到1.5至2是需要的。对经常使用的, 绝对闪耀效率为80%至85%左右的这种光栅, 我们取 $k$ 为0.63的铝膜实验, 即达到了要求。\*18510及\*18511号光栅即属于这种情况, 铝膜厚度约为2.2 $\mu\text{m}$ 。

## 五、关于铝膜厚度系数的上限

观察表 1 至表 7 中的  $k$  值与闪耀效率的关系似乎可以看出铝膜的最大厚度可不予限制，但是实际上，随着铝膜厚度的增加，将导致铝膜的粗糙和反射率的下降，尤其近紫外区，反射率下降得很明显。实践证明，铝膜这种性能的变化，对刻划密线条高闪耀效率的光栅不利，特别是对刻划近紫外区闪耀光栅更为不利，因此，需控制铝膜的最大厚度。根据这一情况，我们控制了铝膜厚度系数上限，并把铝膜对闪耀波长的反射率作为选择铝膜厚度系数上限的限制条件，同时把闪耀波长 253.7nm 及 313.2nm 的近紫外光栅做为考虑的重点。当然，可见及红外光栅也存在对铝膜反射率的要求，不过由于闪耀波长较长，在铝膜厚度系数不是太大的情况下，这一要求一般都能得到满足。

表 8 列出的是通过生产光栅及实验取得的铝膜反射率与闪耀波长为 253.7nm 及 313.2nm 的 1200 线/mm 光栅闪耀效率的关系。

表 8

闪耀波长 nm	253.7				313.2			
	铝膜反射率	75%	65%	47%	41%	90%	83%	78%
相对闪耀效率	78%	65%	45%	43%	84%	75%	77%	64%
实验序号	*38508	*38607	3.86- 7.31	3.86-9	*38514	*38507	*38608	3.86-10

为了获得准确的数据，表中的闪耀效率是从一种反射率的铝膜取得的若干相近的闪耀效率中选择出的较高的闪耀效率。分析表中的数据可得出，为了利于获得高闪耀效率，控制铝膜反射率不低于 75% 是必要的。

表 9 列出的是我们通常用于刻划光栅的铝膜在不同厚度情况下，对波长 253.7nm 的反射率。

表 9

铝膜厚度 $\mu\text{m}$	0.21	0.28	0.32	0.4	0.65
铝膜反射率	85%	85%	85%	82%	75%

从表中的数据可看出，当铝膜厚度小于 0.32  $\mu\text{m}$  时，铝膜反射率为 85%，当铝膜厚度增加到 0.65  $\mu\text{m}$  时，铝膜反射率下降为 75%。

下面即可根据前述实验及表 8、表 9 的限制条件确定铝膜厚度系数上限。

回顾表 1 的 48443 号实验，闪耀波长为 253.7nm， $k$  为 3.2，铝膜厚度为 0.4  $\mu\text{m}$ 。实验已表明，这种厚度的铝膜，不仅能有效地挤压出需要的槽形，而且所能达到的反射率也能有效地满足刻划高闪耀效率光栅的需要，因此  $k$  值上限可选取 3。这样一来，近紫外至可见光谱区闪耀的 1800 线/mm 光栅的  $k$  值上限，均可控制为 3。

对表 2 所示 1200 线/mm 光栅，选取  $k$  值上限为 3 也是恰当的。因为此时对闪耀波长 313.2nm 的光栅，铝膜的最大厚度为 0.5  $\mu\text{m}$  左右。对照表 9、表 8 可看出，这种铝膜厚度，仍然处于能获得高反射率以及利于刻划高闪耀效率光栅的区域。

分析表3、表4和表5的实验结果,同样参照反射率的限制条件可得出,对600线/mm光栅的 $k$ 值上限也都可限定为3。因为 $k$ 为3时,对波长313.2nm一级闪耀的光栅的铝膜厚度为0.6 $\mu\text{m}$ 左右,这样的厚度显然是适宜的。对波长313.2nm二级闪耀光栅的铝膜厚度为0.99 $\mu\text{m}$ 。这种厚度铝膜的反射率虽然低些,但由于光栅常数增大了,相应的对铝膜反射率的要求也降低了,因此也能刻出高闪耀效率的光栅。表4的48208号光栅即是一例。另外,对闪耀波长为313.2 $\mu\text{m}$ 等短波来说,大多采用1200线/mm的刻线密度,较少采用600线/mm的刻线密度。关于那些大闪耀角的光栅,一般说来刻槽不深,取 $k$ 为3时铝膜也不厚,另外也很少用于短波,因此不会遇到反射率的限制问题。

由于红外光栅用于可见光的长波段,一般铝膜对其闪耀波长均能获得高反射率,还有红外光栅光栅常数大,光栅刻槽面宽,易于刻划出满足衍射红外波要求的刻槽面,因此铝膜厚度系数上限可不予限定,只要控制铝膜最小厚度值就可以了。

## 六、结 论

从获得衍射光栅高闪耀效率及提高制造光栅的成品率的角度出发,衍射光栅铝膜厚度应予限定。采用铝膜厚度系数标定铝膜相对厚度是合理的。

对本文直接论述的闪耀波长自253.7nm至643.8nm、1800线/mm、1200线/mm一级和600线/mm一、二、五、六级闪耀的光栅,铝膜厚度系数应取 $2 \leq k \leq 3$ ;闪耀波长自1.52 $\mu\text{m}$ 至1.93 $\mu\text{m}$ ,300线/mm一级闪耀的红外光栅 $k$ 为3有利;闪耀波长10.6 $\mu\text{m}$ ,100线/mm一级闪耀的红外光栅,如果要求90%的闪耀效率,可取 $k$ 为1.5,如果要求大于90%的闪耀效率,应取 $k$ 值为2。

## 七、结 语

由于实验有较强的综合性,因此文中给出的数据是属于限定范围性质的。研究结果已用于生产实际,获得了好的结果。

本专题研究是在中国科学院长春光学精密机械研究所多年光栅刻划经验的基础上以及在梁浩明主任的指导下进行的。参加专题研究和协助工作的还有李春启、张秀兰同志和营建新、刘珉、张仿城、王丽娟、颜秉新和光栅检验的同志,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Pavageau, J. and Bousquet, J., *Optica Acta*, 1970, 17, 6, 469.
- [2] E.G.Loewen, M.Neviev, and D.Maystre, *Appl. Opt.*, 1977, 16, 10, 2711.
- [3] L.S.Cheo, *J.O.S.A.*, 1977, 67, 12, 1686.
- [4] W.R.Hunter, G.Hass, *Physics of Thin Films*, 1980. 11, 1—33.

## The Influences of Aluminum Film Thickness on the Blazed Efficiencies of Ruling Diffraction Gratings

Zhang Qingying Liu Guiqin

### Abstract

This paper describes the importance of controlling aluminum film thickness for ruling diffraction gratings and gives a method to mark the aluminum film thickness with thickness factor. It also represents the influences of aluminum film thickness on blazed efficiencies of the ruling diffraction gratings and provides proper ranges of the thickness factors.

These results have been used in production.