

# 影响衍射光栅集光效率的几个因素

庄 夔

**提要：**本文介绍影响衍射光栅集光效率的几个因素。我们做了关于钻石刀安装角、刀尖角的选取和刻划的调整等方面的工作，并相应地注意了钻石刀、镀膜和刻槽的质量，刻制出了集光效率较好的衍射光栅。

光谱仪及分光计使用的平面镀铝衍射光栅，要求各种光谱性能，包括：分辨率、集光效率、罗兰鬼线、赖曼鬼线、散射光等……，这些技术要求的指标，随用途不同而各有差异。一块合格的光栅，必须满足一定的技术要求<sup>[1][2]</sup>。

在这里，仅就光栅的集光效率加以讨论，其他方面，可参看专文<sup>[3][4][5][6]</sup>。

衍射光栅要求使用在一定波段范围（定向光栅），因而要求光能量的大部分集中到某一光谱级次的某一波段，其中某一波长是集光的峰值，此波长称为闪耀波长，而相应的衍射角称为闪耀角。

根据我们这几年实际刻制可见及近紫外光栅的点滴经验，结合国内外的成果，在下面谈一下粗浅的体会：

## （一）定向光栅刻线沟槽的几何因素对光栅集光效率的影响

我们在考虑槽形几何因素的物理效应（衍射和偏振）后，确定安装角和刀尖角。

一束包含多种波长的光束经过衍射光栅，向各不同方向衍射出单色光，其对应关系为：

$$N\lambda = a(\sin\theta \pm \sin\phi) \dots \dots \dots (1)$$

称作光栅方程式（见图1）。

- 式中：N——光谱级次，
- $\lambda$ ——光波波长，
- a——光栅常数，
- $\theta$ ——入射角，
- $\phi$ ——衍射角。

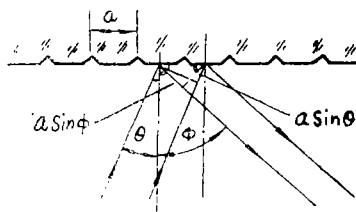


图1. 刻痕衍射光栅的衍射

当平行光束入射到衍射光栅时，我们可以看作是多缝衍射，即两种过程的重叠：①每一个单狭缝的衍射，②从所有狭缝的干涉<sup>[7]</sup>。

在1893年，罗兰首先推导出三角形槽形的衍射光能量的分布方程式<sup>[8][9]</sup>，在1955年W. Friedl 等修改了罗兰方程式的第三项<sup>[10]</sup>，后来又有其他形式的方程式<sup>[11][12][13]</sup>：

$$G \sim \lambda^2 \left\{ \sin^2 \frac{\pi u (\mu_0 - c/l_0)}{\lambda} \right\}^2 \cdot \left[ \frac{\sqrt{1 - c^2}}{\mu_0 + c/l_0} - \frac{\sqrt{1 + c'^2}}{\mu_0 + c'/l_0} \right]^2 \dots \dots \dots (2)$$

通常集光效率为某级衍射光束的能量与单色入射光束的能量的比值, 近似等于某级衍射光束能量与各级衍射光束能量和的比

$$E_{\lambda}(\phi_0, N_0) \approx \frac{G}{\Sigma G} = \sum_N \left\{ \left[ \frac{\sin \frac{\pi u (\mu_0 - cl_0)}{\lambda}}{\sin \frac{\pi u (\mu - cl)}{\lambda}} \right]^2 \cdot \left[ \frac{\sqrt{1+c^2} - \sqrt{1+c'^2}}{\mu_0 - l_0} - \frac{\sqrt{1+c^2} - \sqrt{1+c'^2}}{\mu_0 + c'l_0} \right]^2 \right\} N \dots\dots\dots (3)$$

式中:  $E_{\lambda}(\phi_0, N_0)$  为相对强度, 即  $N_0$  级衍射光能量与全部单色光入射能量之比, (即集光效率)。

$$\mu_0 = \frac{N_0 \lambda}{a} = \sin \theta_{(0)} + \sin \phi_0(N_0, \lambda)$$

$$\mu = \frac{N \lambda}{a} = \sin \theta_{(N)} + \sin \phi(\lambda, N)$$

$$l_0 = \cos \theta_{(0)} + \cos \phi_0(\lambda, N_0)$$

$$l = \cos \theta_{(N)} + \cos \phi(\lambda, N)$$

$u, c, c'$  是表示光栅槽形的几何常数 (见图 2)。

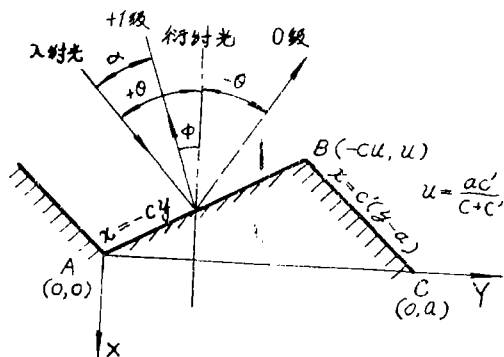


图 2 衍射光栅的衍射图

人们通过“闪耀”的方法, 即控制一定的光栅沟槽形状, 能将大部分能量集中到闪耀波长附近。据根使用部门所要求的光谱级次、闪耀波长、每毫米刻线数, 用光栅方程式, 可计算出三角形槽形的闪耀角  $\beta$ ,  $\beta = \angle A = \left( \frac{\theta \pm \phi_0}{2} \right)$ , 在垂直布置的 Ebert 式装置中 (自准式),  $\theta = \phi_0$ , 则  $\beta = \phi_0$  [2]。

多年来的刻划试验表明, 如果钻石刀的安装角  $\psi$  (见图 3) 等于闪耀角  $\beta$ , 刻出的光栅经过检验, 集光效率曲线的峰值, 稍向

值。今列出 [14] 中的理论集光效率方程式如下:

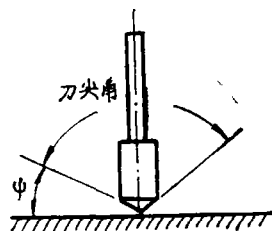


图 3 钻石刀的安装角

短波偏移。通过加大安装角, 能使集光的峰值移到所需的闪耀波长。此时安装角不等于从光栅方程式计算出来的闪耀角, 须加上理论偏转角  $\Delta\beta_1$  和经验数  $\Delta\beta_2$ , (见表 1)。

$$\psi = \beta + \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2$$

其中  $\Delta\beta_2 = 1^\circ \sim 4^\circ$  左右

我们估计,  $\Delta\beta_2$  是由刻划时槽形的弹性“回复”等所引起, 此时调刀工具的零位, 和刻划机刀桥的零位都要校验, 调整安装角是在自制的调角器上进行。

理论偏转角  $\Delta\beta_1$ , 可通过计算理论集光效率曲线求出。从理论集光效率方程式 (3) 看出, 只要  $\mu$  值相同 (即  $\lambda/a$  的比值相同), 则曲线也相同, 因而求出一种每毫米刻线数光栅的一组曲线, 就可简单地换算出 3600、2400、1200 线/mm 等其他光栅的曲线。

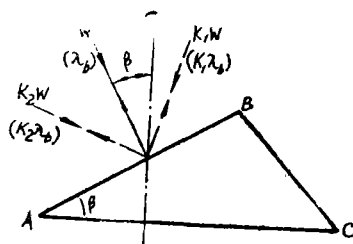


图 4 计算图

利用电子计算机可以从方程式 (3) 计算出理论集光效率曲线, 我们按自准式来计算, 并用  $KW$  代替  $\lambda$ ,  $N$  选用 +1, 此时  $W$  为闪耀波长  $\lambda$ , 而入射光线衍射光线垂直于  $AB$  边, 其他光线的波长则为  $KW$  (见图 4)。

今计算 60 线/mm 衍射光栅,  $a = \frac{1000}{60}$  (微米),  $\angle B = 90^\circ$ , 选用  $W = 2 \sim 16$  微米,  $\lambda/\lambda_0 = K = 0.5 \sim 2.2$ , 编好程序输入电子计算机, 其计算结果见图 5。从图 5 可以方便地画出所需要的理论集光效率曲线。例如: 求 2400 线/mm, 闪耀波长  $\lambda_0$  为 2537 Å 光栅的曲线。由  $\lambda_0$  算出相当波长  $\lambda_0$  (对 60 线/mm 而言),  $\lambda_0 = \lambda_0 a_0/a_1$ ,  $\lambda_0 = 0.2537 \times \frac{1000}{60} / \frac{1000}{2400} = 10.148$  (微米)。从图 5 的横座标查出相应于  $\lambda_0$  的各种  $K$  的  $E$  值。分别画在以  $k\lambda_0$  为横座标,  $E \times 100\%$  为纵座标的图上, 即成所要求的曲线 (见图 6)。

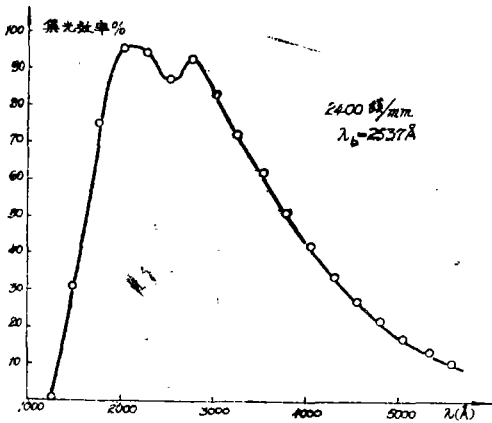


图 6 2400 线/mm ( $\lambda_0 = 2537 \text{Å}$ ) 光栅的理论集光效率曲线

我们从计算结果看出, 角度大时, 峰值移向短波, 偏移的角度即为理论偏转角  $\Delta\beta_1$ , 其数值可见图 7。

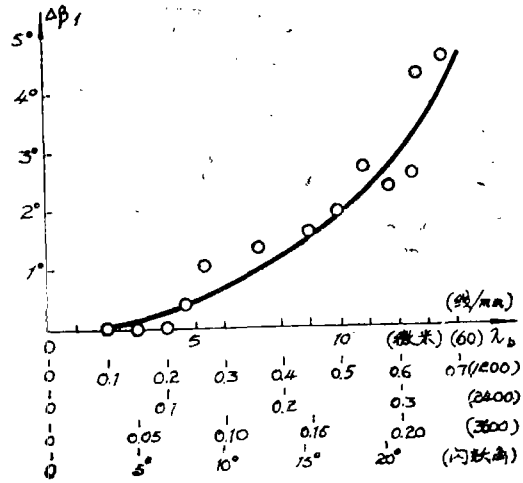


图 7 理论偏转角  $\Delta\beta_1$  的曲线

这些曲线不仅可以求出  $\Delta\beta_1$ , 并可供光谱仪设计光栅时作参考。研究实际光栅与理论值的差别的各种因素, 将有利于今后制造光栅和光栅理论工作的开展。

试验的结果见下表:

在刻 3650 Å 光栅时, 有时正好集光峰值在 3650 Å 处, 整个集光效率都稍低, 我们使峰值移到 3650 Å ~ 4358 Å 之间, 则集光效率普遍稍有提高, 采用这样的光栅, 也能使用在近紫外波段。图 9 表示钻石刀不同安装角所刻出的光栅的集光效率曲线 (一级光谱)。集光效率的检验, 仍是光栅与反射镜相比较而得<sup>[15]</sup>。

(表 1)

每毫米刻线数	光谱级次	闪耀波长	闪耀角 $\beta$		占石刀安装角 $\phi$
			自准式	$\alpha = 24^\circ 36'$ 时	
600	1	3650 Å	6° 17'	6° 30'	10° ~ 11°
600	1	5461 Å	9° 21'	9° 40'	13°
1200	1	3650 Å	12° 37'	13° 0'	17° ~ 18°
1200	1	5461 Å	19° 0'	19° 42'	25°

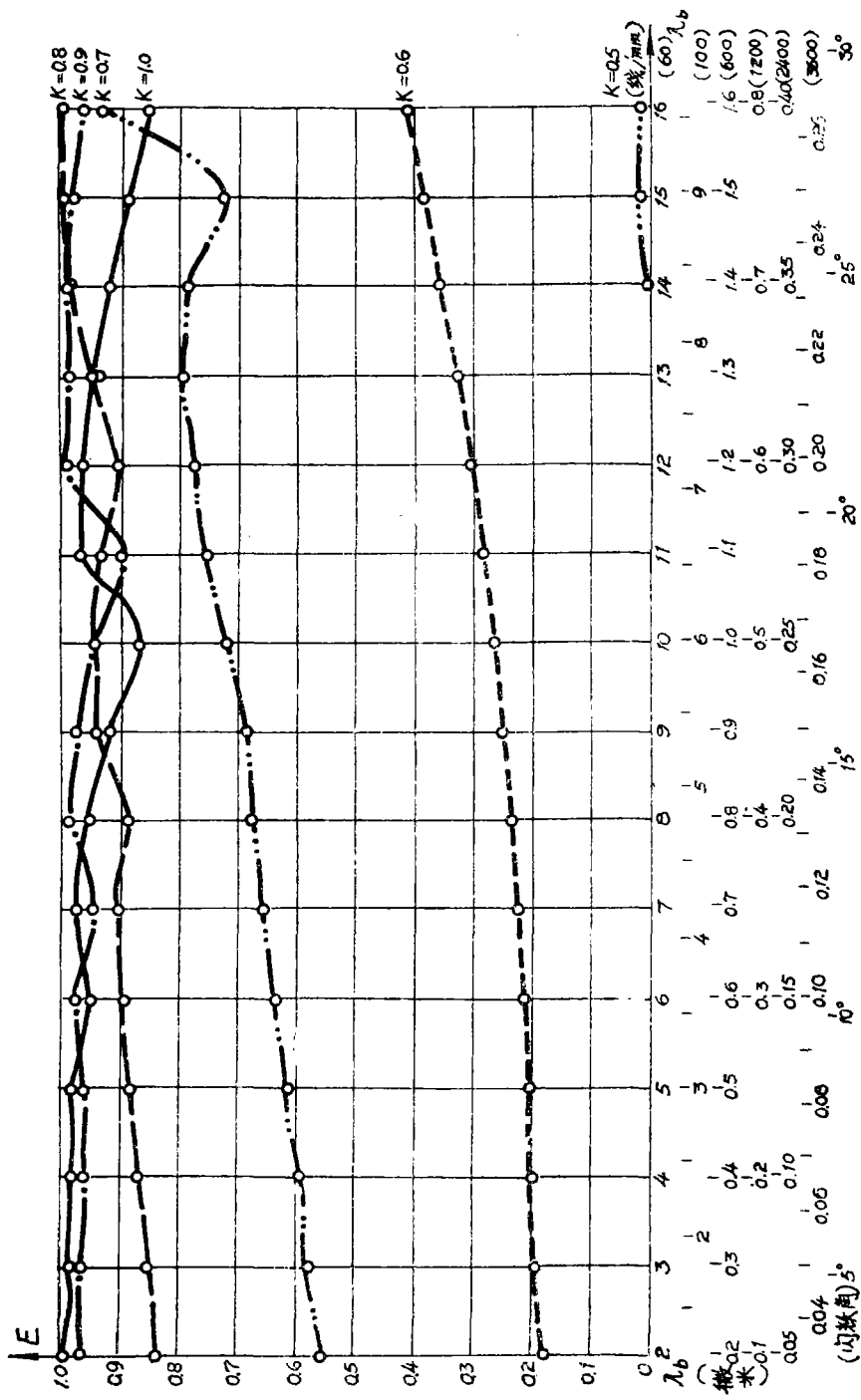


图 5 之一、电子计算机计算的理论集光效率数值

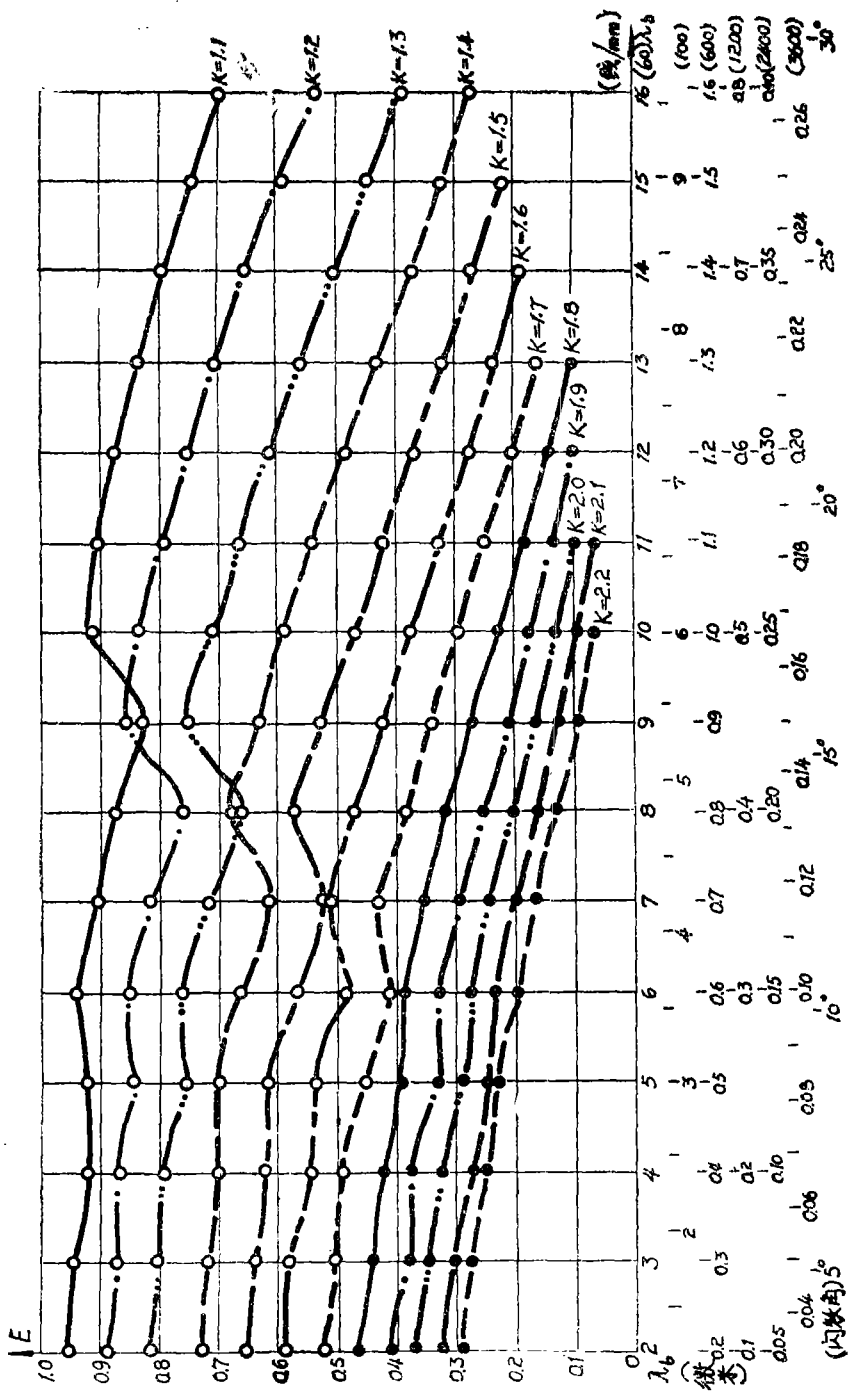


图 5 之二、电子计算机计算的理论集光效率数值

我们用电子计算机计算了刀尖角为 $90^\circ$ 、 $110^\circ$ 、 $130^\circ$ 的集光效率,此时,光栅选用1200线/mm,闪耀波长 $\lambda_b$ 为0.3132微米和0.5461微米, $\alpha = 0$ , (其他光栅的计算见<sup>[16]</sup>)。我们从这些理论上的集光效率方程式(3)算出的结果(见表2及图8)看出, $90^\circ$ 、 $110^\circ$ 的刀尖

角都可选用,今选择刀尖角为 $110^\circ \sim 120^\circ$ ,不采用 $90^\circ$ ,以避免衍射光的偏振<sup>(1)(17)</sup>。我们也采用 $95^\circ$ 、 $100^\circ$ 及 $130^\circ$ ,从刻出的衍射光栅的集光效率来看,(其中大部分是劈形钻石刀,少数是用圆弧刀刻出的), $110^\circ$ 及 $95^\circ$ 的刀尖角都是可取的(见图9)。

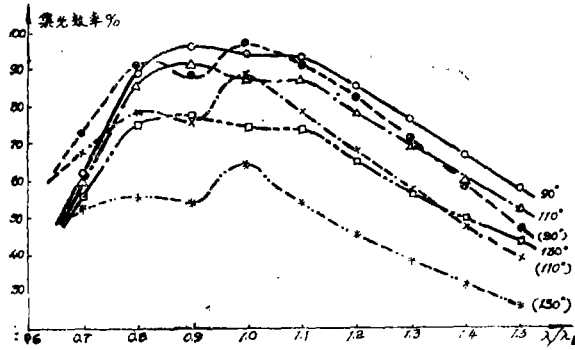


图8 1200线/mm光栅,  $\lambda_b$  为3132Å及5461Å(带括号的)的三种刀尖角的理论集光效率曲线 (电子计算机计算结果)

表2 1200线/毫米光栅集光效率的理论计算数值 ( $\alpha = 0$ )

E % $\lambda/\lambda_b$	$\lambda_b = 3132\text{Å}, A = 10^\circ 50'$				$\lambda_b = 5461\text{Å}, A = 19^\circ 7'$				
	闪耀波长及闪耀角 波长及刀尖角	波长Å	B = $90^\circ$	B = $110^\circ$	B = $130^\circ$	波长Å	B = $90^\circ$	B = $110^\circ$	B = $130^\circ$
	0.7		2192	62.1	59.8	56.0	3823	72.8	67.7
0.8		2506	89.3	85.8	74.9	4369	90.8	78.1	55.0
0.9		2819	96.7	91.0	77.1	4915	88.4	75.4	53.3
1.0		3132	93.9	86.9	73.6	5461	97.0	87.8	63.6
1.1		3445	93.3	86.5	73.2	6007	91.2	78.0	53.7
1.2		3758	85.1	77.5	64.6	6553	81.9	67.4	44.9
1.3		4072	76.2	68.2	56.4	7099	70.7	56.9	37.5
1.4		4385	66.8	59.5	49.2	7645	58.8	47.2	31.1
1.5		4698	57.7	51.6	42.8	8192	47.0	38.3	25.6

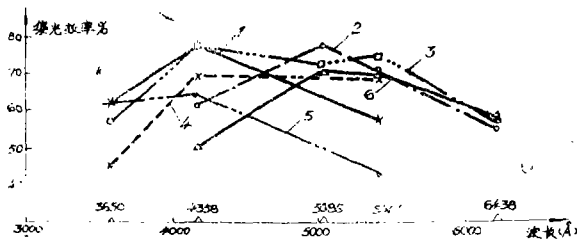


图9 钻石刀不同安装角和刀尖角的集光效率曲线

(1) 曲线 1、2 表示同一把刀不同安装角的集光效率曲线；

(2) 曲线 1、2 及 3、4、5、6 分

别表示  $97^\circ$  及  $110^\circ$  刀尖角的集光效率曲线；

(3) 曲线 5、6 也表示同一把刀不同安装角的集光效率曲线。

编 号	刻划日期	刻线数/mm	钻 石 刀	钻石刀的 安 装 角	刀 尖 角	曲 线 号
17051	$70\frac{6}{12}$	1200	010 劈形刀	$18^\circ$	$97^\circ$	1
17052	$70\frac{14}{12}$	1200		$25^\circ$		2
27103	$71\frac{4}{11}$	600	029 劈形刀	$10^\circ.5$	$110^\circ$	3
37203	$72\frac{6}{3}$	1200	040 劈形刀	$18^\circ.5$	$110^\circ$	4
17304	$73\frac{19}{6}$	1200	042 劈形刀	$17^\circ.5$	$110^\circ$	5
17209	$72\frac{29}{6}$	1200		$25^\circ$		6

## (二) 定向光栅刻线沟槽的物理因素对光栅集光效率的影响

衍射光栅的刻槽是用钻石刀在铝层（真空涂镀膜层）上刻划而成，实际槽形将与理论槽形有差别。定向面要刻成光滑平直的镜面，一般采用压削的办法来刻划，此时，钻石刀的前角后角的大小，刀刃平行于刻线的精度，及铝层的质量（包括硬度及反射率），都将影响到光栅刻槽的光洁度和畸变程度。所以，定向光栅刻划沟槽的物理因素也影响集光效率。

为了提高刻槽的平度和表面光洁度，钻石刀应有较好的平度和光洁度，并且应有适宜的压削参数（前角、后角等，见图10）。

经过试验，光栅钻石刀的后角（后隙角、后刃角、斜角）对集光效率约有影响，在安装角为  $17^\circ \sim 25^\circ$  时，磨制钻石刀，提起  $7^\circ$ ，转过  $6^\circ.5$ ，所得到的后角，较为适宜（此时的后隙角约为  $2^\circ \sim 4^\circ$ ，后刃角约为

$3^\circ \sim 5^\circ$ ，斜角约为  $35^\circ \sim 50^\circ$ ），刻小闪耀角光栅时，后角可稍大。后角过大则集光效率低，后角过小则刻线不好。

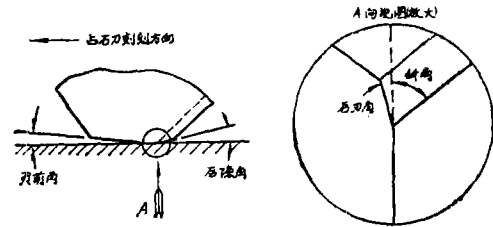


图10 劈形刀的前角和后角

试验表明，光栅钻石刀的压痕长度，在 2 克刻重下调整到  $5 \sim 8 \text{ mm}$ （600 倍显微镜中观测）较为适宜。压痕过长则集光效率低，压痕过短，则刻划时容易发生振动，光栅表面不易刻好，有时光栅表面在半级角度观察时有各色的乱衍射光出现。在铝层厚度约相同时，压痕的长短是决定于劈形刀的前角。按粗略的换算，这适宜的压痕长度相当于负前角  $0^\circ.3 \sim 3^\circ$  左右。

我们采用了更薄的铝层，缩短压痕到  $1 \sim 2 \text{ mm}$ （600 倍显微镜中观测），安装角是  $14^\circ \sim 17^\circ$ ，可刻出近紫外光栅，集光效率峰

值约50%~65%，（闪耀波长为3132Å）。

刀刃平行于刻线（见图11中（a）），是借助于大型工具显微镜作为调整工具，并且用压痕法<sup>[18]</sup>来观察，然后绕刀杆轴线转动钻石刀加以调整，有时平行度在±20'范围内都能刻出线条来，此时，更进一步的调整平行，是观察刻出单线两边的挤压情况，来判断刀刃往那边偏，直至调到两边挤压程度略同，且轻微。刀刃与刻线的不平行，将使刻槽产生畸变，影响集光效率；当刀刃前端偏向已刻面时，如图11中的（b），还会使挤屑逐渐堆集，导致刻不成线。

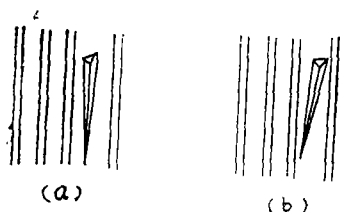


图11 光栅刻线及钻石刀压痕图

为了提高刻槽的表面光洁度，还需要有柔软塑性好的铝层，一般都采用真空镀膜，详细的论述请参看专文<sup>[19]</sup>。镀膜是光栅刻划技术的重要一环，镀层的质量和厚度，也是影响集光效率的重要因素。铝丝要较纯，工艺过程要控制好（如：清洗、蒸发源的情况、预熔、真空度、蒸发速度等）。我们采用了铬铝双层镀膜来刻光栅，效果较好。刻划时以硬底的铬层为基准，因而槽深一致，能减小光栅的干扰线，还能更好地控制刻全槽，有利于集光效率的提高。铬基底的双层膜，膜层的粘附牢固度和刻线的质量较单层为好。铝层厚度可按计算确定，由于挤压变形，实际铝膜厚度采用1.0~2.6的半槽深，即 $H = (1.0 \sim 2.6) \cdot [\frac{1}{2} h] = (0.5 \sim 1.3) h$ ,

今刻槽深度  $h = \frac{a \tan A \cdot \tan C}{\tan A + \tan C} = a \xi$ （见图12），故铝层厚度

$$H = (0.5 \sim 1.3) \cdot \frac{a \tan A \cdot \tan C}{\tan A + \tan C}$$

即  $H = (0.5 \sim 1.3) a \xi$

式中  $a$  是光栅常数； $A$ 、 $C$  是光栅刻槽的两个夹角， $\xi$  值和  $a \xi$  值见图13。最简单的办法是在方格纸上画放大槽形图，求得槽深后，乘上系数0.5~1.3，即得铝层厚度。我们是通过控制蒸涂时间来大约控制膜层厚度，镀好后可用干涉仪观测样品的膜厚。在涂镀时用测量来直接控制膜层厚度，有助于光栅工作的开展。

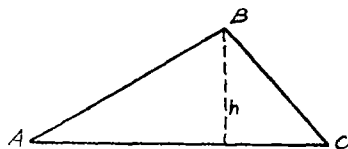


图12 浪槽深度图

### （三）几年来的工作表明，钻石刀的锐度，对光栅的刻划和集光效率的影响是比较主要的。

钻石刀刀刃如有小缺口，不尖锐，将刻不出整齐的槽形，影响集光效率。

我们运用压痕法，用600倍或1350倍显微镜观察刀刃压痕的形状和整个刀的好坏。如象图14中的（a）前刃锐利，整个刀刃无缺口，压痕整齐，表明钻石刀磨制较好。将能刻出较好的刻线和槽形。而图14中的（b），前刃较秃，刀刃有缺口，压痕不整齐，表明钻石刀磨制得不好，就需将钻石刀返修。如果刀刃无缺口，压痕情况在（a）（b）之间，则可以经过试刻来确定。

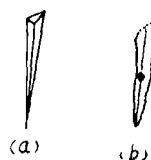


图14 劈形刀的压痕形状

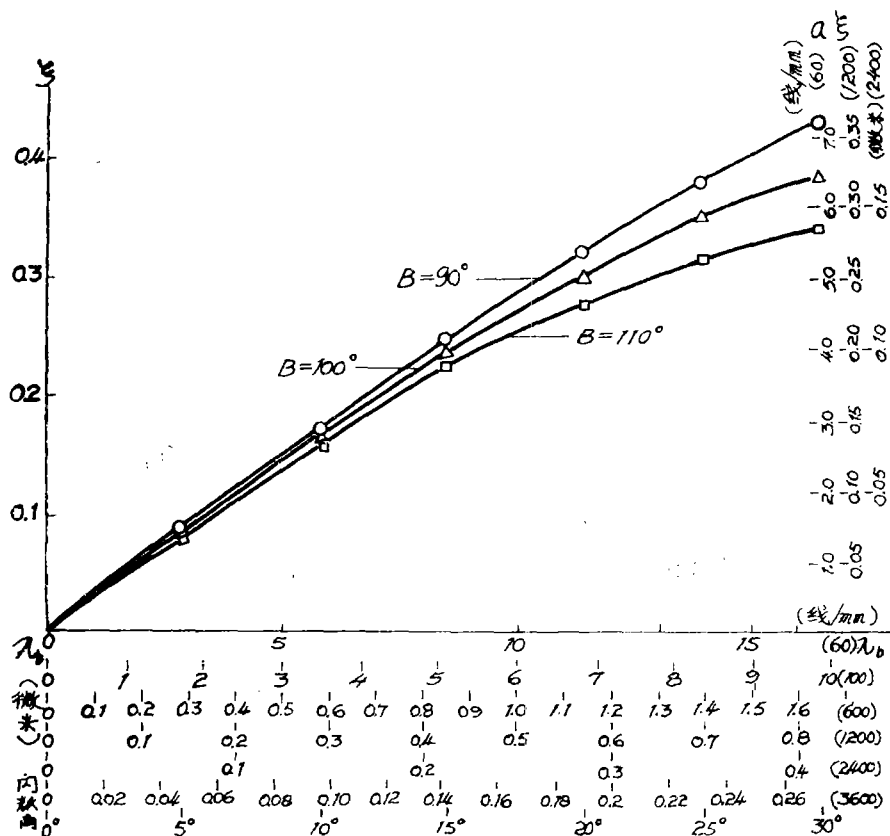


图13  $\xi$ 和 $a\xi$ 值图

要刻出集光效率较好的光栅，必须挑选刃口较锐的钻石刀，并试刻，或是修磨钻石刀直到集光效率达到要求为止，最好用与试刻小段同一次蒸涂的光栅毛坯，进行正式刻制。

刻划调整、镀膜、磨刀是光栅刻划技术中密切联系的三个方面，保留一些刻出过好光栅的镀铝毛坯和钻石刀小刀架，以备一旦遇到困难时，可较快地加以区分，找出主要因素，以便改进工作，达到要求。

达到一定的效率后，随着刀刃的磨损，刀刃锐度降低，集光效率也逐渐下降，且峰值往长波偏移。效率低到一定指标后，钻石刀就将取下修磨，此时可以观察到，刀刃确实已经磨钝（用低倍目镜看光点），因而，使用时也要选择耐磨性较好的钻石刀。

钻石刀的锐度和耐磨性问题，大致与钻

石材料好坏，钻石定向，磨刀机的振动，磨制工艺等有关，详细的论述请参看专文<sup>[21]</sup>。

所有光栅，都需选择刻重（2~10克），使达到全槽。这可用高倍显微镜观察，并看零级日光灯管的颜色。闪耀在3132 Å、4358 Å、5461 Å的分别呈浅黄色；黄褐色和紫红色。如能用电子显微镜来观察研究刻线和槽形的截面，将有助于集光效率方面的工作。

总之，着重解决钻石刀的锐度和刻线的槽形，相应地注意刻划的调整和镀膜等环节，将能刻制出集光效率较好的衍射光栅。

这几年，我们虽然在光栅刻划机和光栅刻划技术等方面做了一些工作，但我们还有许多不足之处，有待今后努力提高。感谢王太珩所长的指导和梁浩明、张庆英、张治国、赵明辰、李春启和电子计算机的韩士杰

等同志的帮助,感谢兄弟单位对我们的支援和帮助,并向兄弟单位学习。

### 参 考 文 献

- [1] 仪器仪表译丛 1966年1月[美]R.F. Jarrell
- [2] 光谱仪器 第一、二辑  
上海市仪表电讯工业局技术情报所,  
上海光学仪器研究室 编译
- [3] 光栅刻划机(光栅经验交流会报告)  
梁浩明(1961)
- [4] 简易干涉控制光栅刻划机,(北京光栅会报告)执笔:杨厚民(1973)
- [5] 影响衍射光栅集光效率的几个刻制技术问题(北京光栅会报告),执笔:庄夔(1973)
- [6] 长春光机所的光栅刻划机(成都光学会报告)梁浩明、庄夔、张庆英、杨厚民(1978)
- [7] 《普通物理学》第三卷第一分册  
C. D. 福里斯著 东北人民大学物理系译(高等学校出版社)
- [8] H. A. Rowland: Phil. Mag. [5] 35, 397(1893)
- [9] R. F. Stamm, J. J. Whalen: J. O. S. A. 36, 2 (1946)
- [10] W. Friedl, B. Hartenstein: J. O. S. A. 45, 398(1955)
- [11] R. D. Hatcher, J. H. Rohrbaugh: J. O. S. A. 46, 104(1956)
- [12] R. D. Hatcher, J. H. Rohrbaugh: J. O. S. A. 48, 704 (1958)
- [13] 瀨谷正男, 后藤克也: 分光研究[5] 1, 16 (1956)
- [14] 真壁英树: 岛津评论, 21, No. 2, 31 (1964) [译文: 光学机械情报, 11, 36, (1965)]
- [15] 平面镀铝衍射光栅的检验(研究报告)孙景椿、杨厚民(1966)
- [16] 平面衍射光栅的能量分布, 《仪器制造》1975.6. 天津光学仪器厂, 刁永言,
- [17] G. W. Stroke: Phys. Letters, 5, 45, (1963)
- [18] 平面衍射光栅的刻制(研究报告)庄夔(1966)
- [19] 中红外及可见光栅铝膜蒸涂技术(北京光栅会报告)执笔:刘雅琴(1973)
- [20] 光栅刻划刀的金刚石定向与耐用度的问题(北京光栅会报告),执笔:孙锡彝、刘文荣(1973)