

机刻变栅距平面光栅

刘春光 王晓琳

摘要: 本文详细地论述了机刻变栅距平面光栅的理论, 介绍了变栅距平面光栅在光谱仪器中的应用。

一、引言

随着科学技术的发展, 对于各种光谱仪器的性能要求越来越高, 光谱仪器应用的范围越来越广泛。目前, 我国多采用凹面光栅或用等栅距的平面光栅与透镜(或凹面镜)的组合来构成分光计。然而, 凹面光栅存在多种像差, 等栅距的平面光栅与透镜的组合用的元件多, 体积大, 因而这种分光计并不理想, 尤其在短波段, 金属表面的反射率极低, 这种分光计就显得更不适用了。最近几年, 国外一些科技人员在探讨, 用变栅距平面光栅作分光元件, 则可克服其它分光计的缺陷。变栅距平面光栅作为光谱仪器的分光元件无需准直镜和聚光镜, 这对于在短波段工作的光谱仪器具有很大的优越性。

二、变栅距平面光栅的理论

如图1所示, 设 $A(x_1, y_1)$ 为光源, $B(x_2, y_2)$ 为焦点, 以光栅的几何中心为坐标原点, 与光栅刻线垂直的方向为 x 轴, 光栅的法线方向为 y 轴, 建立直角坐标系, 光源 (A 点) 发出的光在坐标原点处的人射角和衍射角分别为 α 、 β , 则光程差 Δ 应满足下式:

$$\begin{aligned}\Delta &= OD - CE \\ &= d_0 \sin \alpha - d_0 \sin \beta \\ &= m\lambda\end{aligned}$$

$$\text{即 } d_0 (\sin \alpha - \sin \beta) = m\lambda$$

若 A 点发出的任意一条光线照射到光栅平面的任意一点 $P(x, 0)$ 上, 设入射角为 $\alpha(x)$, 衍射角为 $\beta(x)$, 则变栅距平面光栅的聚焦条件为:

$$d(x) [\sin \alpha(x) - \sin \beta(x)] = m\lambda$$

$$\text{即 } d(x) = m\lambda / [\sin \alpha(x) - \sin \beta(x)] \quad (1)$$

其中, $d(x)$ 为栅距, m 为衍射光谱级次, λ 为入射光的波长,

在图1中, $\sin \alpha(x)$ 和 $\sin \beta(x)$ 应满足下式:

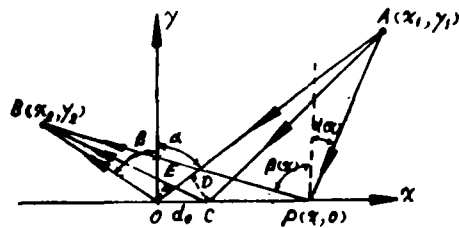


图1

$$\sin\alpha(x) = \frac{x_1 - x}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + y_1^2}} \quad (2)$$

$$\sin\beta(x) = \frac{x - x_2}{\sqrt{(x - x_2)^2 + y_2^2}} \quad (3)$$

把(2)式的右侧展开成太勒级数的形式为:

$$\begin{aligned} \sin\alpha(x) &= \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} + \frac{-y_1^2}{x_1^2 + y_1^2} \cdot \frac{x}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \\ &\quad + \frac{-3y_1^2 x_1}{(x_1^2 + y_1^2)^{3/2}} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}\right)^2 + \dots \end{aligned}$$

设 $l_1 = OA = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$, 由于 $\sin\alpha = \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}$, $\cos^2\alpha = \frac{y_1^2}{x_1^2 + y_1^2}$, 则

$$\begin{aligned} \sin\alpha(x) &= \sin\alpha + (-\cos^2\alpha) \cdot \frac{x}{l_1} \\ &\quad + (-3\cos^2\alpha \sin\alpha) \cdot \left(\frac{x}{l_1}\right)^2 + \dots \end{aligned}$$

因为 $\frac{x}{l_1} \ll 1$, 故可略去 $\frac{x}{l_1}$ 的高次项,

$$\text{则 } \sin\alpha(x) \doteq \sin\alpha - \cos^2\alpha \cdot \frac{x}{l_1} \quad (4)$$

同理, 由(3)式可得:

$$\sin\beta(x) = \sin\beta + \cos^2\beta \cdot \frac{x}{l_2} \quad (5)$$

其中 $l_2 = OB = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$, 把(4)、(5)两式代入(1)式:

$$d(x) = \frac{m\lambda}{\sin\alpha - \sin\beta - \left(\frac{\cos^2\alpha}{l_1} + \frac{\cos^2\beta}{l_2}\right)x} \quad (6)$$

作为特殊情况, 用平行光照射光栅表面, 则入射角 $\alpha(x)$ 为常数 α , (6)式变为:

$$d(x) = \frac{m\lambda}{\sin\alpha - \sin\beta - (\cos^2\beta) \frac{x}{l_2}} \quad (7)$$

在公式(6)中若取 $d_0 = \frac{1}{2400}$ mm, $\lambda = 0.5$ nm, $OA = 20$ m, $OB = 1$ m, $m = 1$, $\alpha =$ 分别取 $89^\circ, 88^\circ, 87^\circ, 86^\circ, 85^\circ$, 则 $d(x)$ 的变化规律如图 2 所示, 若取 $d_0 = \frac{1}{1200}$ mm, $\lambda = 10$ nm, $\alpha = 88^\circ$, $OA = 20$ m, OB 分别取为 1.0 m, 0.8 m, 0.6 m, 0.4 m, 0.2 m, 则 $d(x)$ 的变化规律如图 3 所示,

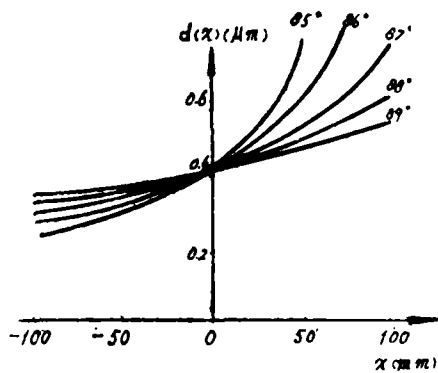


图 2

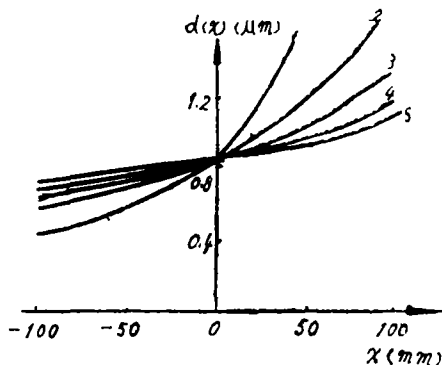


图 3 1—OB=0.2m, 2—OB=0.4m,
3—OB=0.6m, 4—OB=0.8m,
5—OB=1.0m

若取 $d_0 = \frac{1}{1200}$ mm, $\alpha = 88^\circ$, $OA = 20$ m, $OB = 1$ m, λ 分别为: 1nm, 10nm, 50nm, 100nm 则 $d(x)$ 的变化规律如图 4 所示。

如果用会聚光束照明, 如图 5 所示。

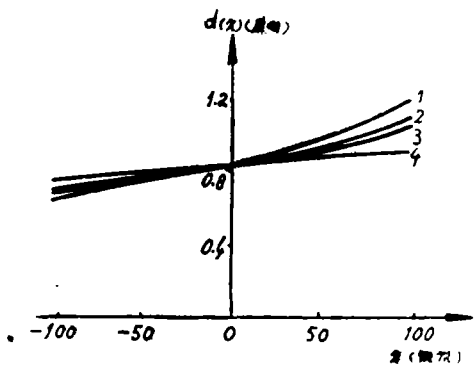


图 4 1—100nm, 2—50nm
3—10nm, 4—1nm

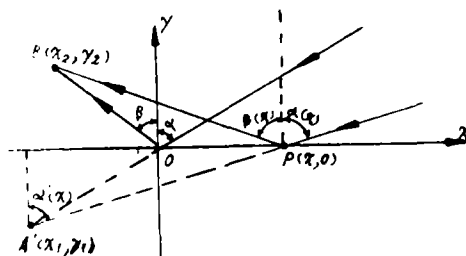


图 5

$$\sin\alpha(x) = \sin\alpha'(x) = \frac{x - x_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}} \quad (8)$$

设 $l_1 = OA' = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$, 把 $\sin\alpha(x)$ 展开成泰勒级数的形式, 并略去 $\frac{x}{l_1}$ 的高次项, 得:

$$\sin\alpha(x) = \sin\alpha + \cos^2\alpha \cdot \frac{x}{l_1}$$

同理: $\sin\beta(x) = \sin\beta + \cos^2\beta \cdot \frac{x}{l_2} \quad (9)$

其中: $l_2 = OB = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$

把 (8)、(9) 两式代入 (1) 式有:

$$d(x) = \frac{m\lambda}{\sin\alpha - \sin\beta + \left(\frac{\cos^2\alpha}{l_1} - \frac{\cos^2\beta}{l_2}\right)x} \quad (10)$$

在上式中若取 $m = 1$, $\lambda = 0.5\text{nm}$, $\alpha = 89^\circ$, $d_0 = \frac{1}{2400}\text{mm}$, $l_1 = 20\text{m}$, $l_2 = 1\text{m}$, 则 $d(x)$ 的变化规律如图 6。

以上我们讨论了变栅距平面光栅的栅距随着刻划宽度的变化规律, 对于特定的波长 λ , 只要适当地选取 m 、 α 、 β 、 l_1 、 l_2 , 在理论上就可以得到一块聚焦质量很好的变栅距平面光栅。

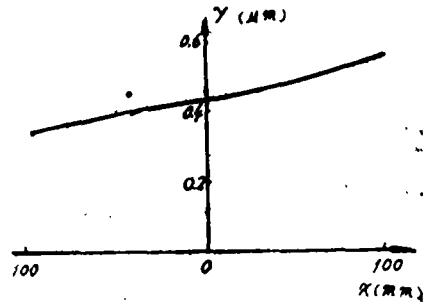


图 6

三、变栅距平面光栅的应用

在以往的分光计中, 多采用凹面光栅, 很少使用平面光栅, 但是, 凹面光栅不仅存在多种像差, 而且在有些光谱仪器中, 受仪器空间的限制, 安装和调节也不是很方便的。如果使用变栅距平面光栅, 就可以克服凹面光栅的缺点。由于变栅距平面光栅在短波段也能高质量成像, 现在它已经逐渐引起光谱学界的重视, 并且已经应用于光谱仪器之中。

Harada · T 教授等人设计的用于同步加速器辐射的单色仪就是其中一例^[1]。该单色仪结构如图 7 所示。

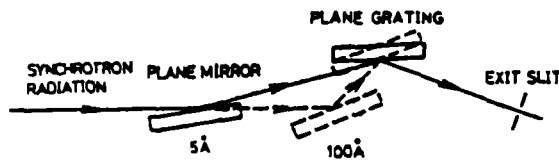


Fig. 7 Optical layout of the plane grating monochromator

它用变栅距平面光栅作为分光元件, 适用于软 X 射线波段 ($5 \text{ \AA} \sim 100 \text{ \AA}$), 它仅用两个反射面, 因此, 可以获得较高的光通量。该单色仪的关键是设计出一块满足聚焦条件的变栅距平面光栅。根据 Harada · T 教授的设计, 该光栅要设计为最短的波长 (5 \AA) 能满足聚焦条件。若取入射角为 89° , 光源到光栅几何中心的距离为 20m , 焦距为 1m , 光栅中心的栅距 $d_0 = \frac{1}{2400}\text{mm}$, 对于 5 \AA 的一级光谱, 栅距 $d(x)$ 的变化规律如图 8 所示。

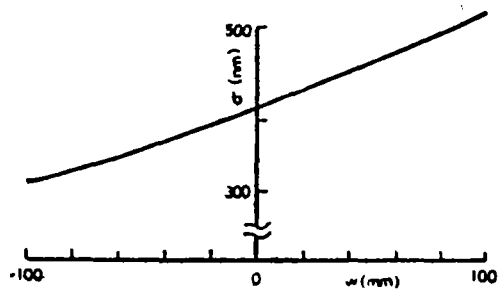


Fig. 8 Space variation of the plane grating

以上设计的变栅距平面光栅仅对于 5 \AA 的光波以 89° 的入射角入射时,才满足聚焦条件,如果入射光的波长发生变化,光谱就不会聚焦于同一焦点上。然而,不同的波长的光谱对于同一焦点的近似的聚焦条件可以通过适当地选择入射角而得到。例如:如果入射光的波长为 10 \AA ,取入射角为 88.582° ,对于这块光栅同样可以满足聚焦条件。用这种单色仪,只要光栅有足够的集光效率就可以成一个质量很高的像。

四、结 束 语

变栅距平面光栅在光谱仪器上的应用有着广阔的前景,目前,我国光栅刻划机的精度最高达到 $0.01 \mu\text{m}$,但是,由图 3、4、5 可知,变栅距平面光栅相邻两个栅距的变化量 Δd 最大也不超过 $0.001 \mu\text{m}$ 量级,由此可见,用我国的光栅刻划机是很难刻划出满足要求的变栅距平面光栅。所以,要想发展短波段的光谱技术,把变栅距平面光栅广泛地应用于光谱仪器中,首先应在提高光栅刻划机的精度上做出努力。据文献介绍^[2],国外,利用数字控制光栅刻划机已经能够刻划出任何波段的变栅距平面光栅。

在本文成稿过程中,得到杨厚民老师的悉心指导,在此表示衷心感谢。

● 考 文 献

- [1] Tatsuó Harada et al., SPIE, 503, 114—118, (1984)
- [2] Harada. T. and Kita T., Appl. Opt., 19, 3987—3993, (1980)

The Ruled Plane Grating with Veried-space

Liu Chunguang Wang Xiaolin

Abstract

In this paper, the theory of ruled plane grating with veried-space is described, and important use of the grating in the spetral instrument^{is} introduced.