

# 圆柱面和圆锥面弯晶谱仪的理论计算及设计

阳庆国 李泽仁 彭其先 陈光华 刘寿先

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 用光线追迹的方法对圆柱面和圆锥面弯晶谱仪进行了理论计算,得到了谱仪的空间与色散坐标、线性色散率、角色散率、光谱分辨力、空间和光谱放大率以及谱仪亮度等参数的解析计算公式,并对两类谱仪进行了具体的参数设计及性能比较。结果表明,圆锥面弯晶谱仪比同类型的传统圆柱面弯晶谱仪有着更为良好的聚焦性能,能够进一步改善谱仪的光子收集效率、谱仪亮度以及空间分辨力。这项工作为谱仪研制提供了理论基础和设计依据。

**关键词** 等离子体; 弯晶光谱仪; 圆柱面弯晶; 圆锥面弯晶

**中图分类号** O536 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0382

## Theoretical Calculation and Design for Cylindrical and Conical Bent Crystal Spectrograph

Yang Qingguo Li Zeren Peng Qixian Chen Guanghua Liu Shouxian

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 612900, China)

**Abstract** A basic theoretical calculation for the cylindrical and conical bent crystal spectrograph was done by using ray tracing method and the explicit formulations of the parameters for these spectrographs, such as spatial and spectral dispersion coordinates, linear and angular dispersion, spectral resolution, spatial and spectral magnification, luminosity, were obtained. The two kinds of spectrographs are designed and their performance is compared. The results show that the conical bent crystal spectrograph is better than the same type of the cylindrical one on the focusing properties, which improves the efficiency of light gathering, luminosity and spatial resolution. This work provides a theoretical and design basis for the future manufacturing of spectrographs.

**Key words** plasma; bent crystal spectrograph; cylindrical bent crystal; conical bent crystal

## 1 引言

通常等离子体在波长 0.1~2 nm 的光谱区产生线辐射和连续辐射。利用晶面间隔为亚纳米到数纳米的各种晶体材料作为分光元件的光谱仪是获取光谱图像的重要实验手段。平面晶体谱仪<sup>[1,2]</sup>是一种最简单的 X 射线光谱测量仪器。但是由于平晶谱仪没有聚焦功能,因而存在光子收集效率低、谱线偏暗的缺点。弯晶谱仪是把分光晶体的衍射面弯曲成各种曲面使谱仪具有部分聚焦功能从而大大地提高了光子收集效率。本文对传统的 Von Hamos 结构的圆柱面弯晶谱仪<sup>[3]</sup>和近年来新发展的圆锥面弯晶谱仪<sup>[4~8]</sup>进行了基础性理论研究,对谱仪的设计开展了初步的理论计算和分析,从而为谱仪研制中谱仪结构和参数的选择提供依据。

## 2 结构及原理

圆柱面或圆锥面弯晶谱仪是将晶体的衍射面弯曲成光滑的圆柱或圆锥面的一部分。基于 Von Hamos 型结构的圆柱和圆锥面弯晶谱仪,衍射光发生在圆柱或圆锥面弯晶的母线方向,圆柱或圆锥曲面只对光束起聚焦的作用。图 1 是圆柱面和圆锥面弯晶谱仪的几何结构示意图。按照光源、晶体和探测器位置的不同,圆柱面和圆锥面弯晶谱仪又可以分为两种基本结构。如图 1(a)所示,若光源位于圆柱面晶体的轴线上,探测器平面垂直于轴线放置,称为 Cy-I 型;如果把探测器平面改成位于轴线上,得到另外一种结构的圆柱面弯晶谱仪,称为 Cy-II 型。圆锥面弯晶,也有两种类似结构。如图 1(b)所示,若光源位于圆锥面弯晶的主截面内,而探测器平

收稿日期: 2008-04-22; 收到修改稿日期: 2008-09-09

作者简介: 阳庆国(1979—),男,博士,助理研究员,主要从事 X 射线光学和成像技术等方面的研究。

E-mail: yungore@163.com

面过圆锥顶点且垂直于母线时的结构,称之为 Co-I 型。而另一种 Co-II 型的圆锥面弯晶谱仪是把光

源和探测器平面都放置在圆锥的对称轴线上[如图 1(c)所示]。

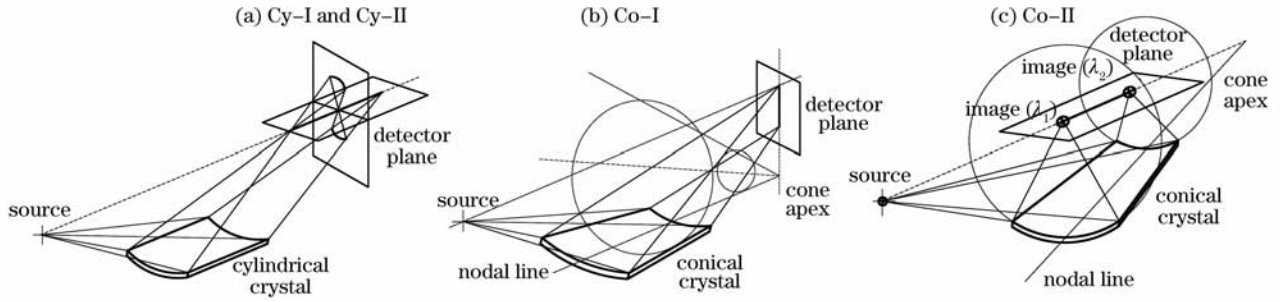


图 1 圆柱面和圆锥面弯晶谱仪的几何结构示意图

Fig. 1 Schematic of the geometric configuration for the cylindrical and conical bent crystal spectrographs

弯晶谱仪的分光原理和平晶谱仪的分光原理一样,都是利用 X 光的布拉格衍射。只有那些波长满足布拉格条件  $2d\sin\theta = n\lambda$  的 X 光才能从晶体反射,其中  $d$  为晶体常数, $\theta$  为布拉格掠入射角, $n$  为衍射级次。因而当一束复色 X 光经过晶体衍射后,在空间存在色散,在不同的位置放置探测器,就得到了光谱图像。由于圆柱面和圆锥面具有聚焦作用,因而这两种弯晶谱仪比平晶谱仪有高得多的亮度。

律,则像点的位置由如下的方程组确定:

$$\begin{cases} (\mathbf{P} \times \mathbf{Q}) \cdot \mathbf{N} = 0, \\ (\mathbf{P}/|\mathbf{P}| + \mathbf{Q}/|\mathbf{Q}|) \cdot \mathbf{N} = 0, \\ Ax_i + By_i + Cz_i + D = 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= [x_c - x_s, y_c - y_s, z_c - z_s], \\ \mathbf{Q} &= [x_i - x_c, y_i - y_c, z_i - z_c]. \end{aligned}$$

分别为入射光线和反射光线向量,

$$\mathbf{N} = [F_x(x_c, y_c, z_c), F_y(x_c, y_c, z_c), F_z(x_c, y_c, z_c)]$$

为曲面的法线向量。

### 3 理论计算

#### 3.1 光线追迹

在设计光谱仪时,了解和追踪从光源发出的光线经过晶体衍射后落在探测器上的确切位置是非常重要的。对于理想的晶体,把晶体对 X 射线的衍射看成是镜面反射。在笛卡尔坐标下,假设圆柱面或圆锥面的曲面方程为  $F(x, y, z) = 0$ ,光谱探测器的平面方程为  $Ax + By + Cz + D = 0$ ,从光源  $(x_s, y_s, z_s)$  发出的一条光线,经过晶体上的任一点  $(x_c, y_c, z_c)$  的反射,落在探测平面的像点  $(x_i, y_i, z_i)$  处,根据反射定

建立了如图 2 所示的坐标系,其中圆柱面方程为  $y^2 + (z - R)^2 - R^2 = 0$ ,Cy-I 型的探测器平面方程为  $x = 0$ ,Cy-II 型的探测器平面方程为  $z = R$ , $R$  是圆柱面的半径;Co-I 型的圆锥面方程为  $y^2 + z[z - \tan\alpha(2x + z\tan\alpha)] = 0$ ,探测器平面方程为  $x = 0$ ;Cy-II 型的圆锥面方程为  $x^2 + y^2 - z^2\tan^2\alpha = 0$ ,探测器平面方程为  $x = 0$ , $\alpha$  是圆锥面的半锥角。通过求解(1)式,计算得到点光源经过四种谱仪成像后的像点坐标,具体的计算结果列于表 1 和表 2 中。

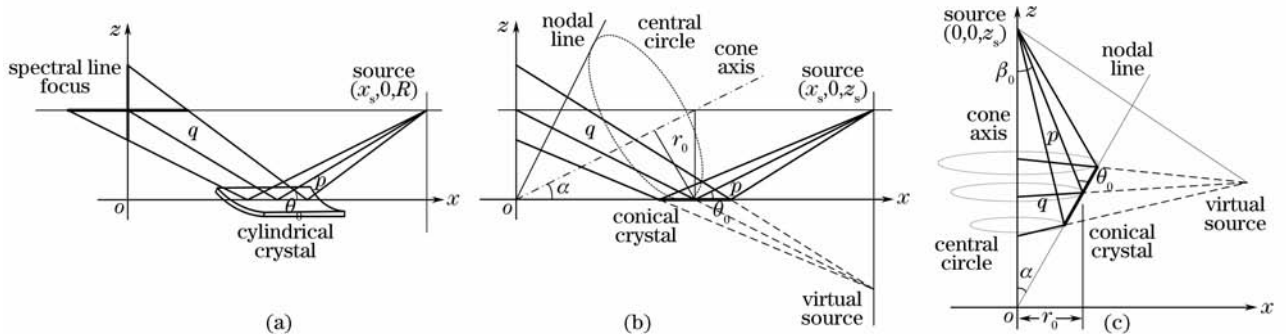


图 2 Cy-I 和 Cy-II 型(a),Co-I 型(b),Co-II 型(c)圆锥面弯晶谱仪的坐标系

Fig. 2 Coordinate systems for the spectrographs of type Cy-I and Cy-II (a), Co-I (b), Co-II (c)

表 1 圆柱面弯晶谱仪的参数计算公式

Table 1 Formulations of the parameters for cylindrical bent crystal spectrograph

Spectrograph	Cy- I	Cy- II
Spatial coordinate	$x_i = 0, y_i = \frac{(2x_c - x_s)y_c}{x_c - x_s}$	$y_i = 0, z_i = R$
Spectral coordinate	$z_i = \frac{x_s z_c + x_c(R - 2z_c)}{x_c - x_s}$	$x_i = 2x_c - x_s$
Dispersion relationships	$\lambda = \frac{2d(R + z_i)}{n \sqrt{x_s^2 + (R + z_i)^2}}$ *	$\lambda = \frac{4dR}{n \sqrt{4R^2 + (x_i - x_s)^2}}$
Linear dispersion	$\frac{d\lambda}{dz_i} = \frac{2dx_s^2}{n[x_s^2 + (R + z_i)^2]^{3/2}}$ *	$\frac{d\lambda}{dx_i} = \frac{dR(x_s - x_i)}{2n[R^2 + (x_i - x_s)^2/4]^{3/2}}$
Angular dispersion	$\frac{d\lambda}{d\theta} = \frac{2d(x_s - x_c)}{n \sqrt{(x_s - x_c)^2 + z_s^2}}$ *	$\frac{d\lambda}{d\theta} = \frac{2d(x_s - x_c)}{n \sqrt{(x_s - x_c)^2 + R^2}}$
Spatial magnification	$M_{\text{spat}} = q/p$	$M_{\text{spat}} = q/p$
Spectral magnification	$M_{\text{spectr}} = q/x_c$	$M_{\text{spectr}} = q/R$

\* Results is calculated in the plane:  $y_c = 0, p = \sqrt{(x_c - x_s)^2 + (y_c - y_s)^2 + (z_c - z_s)^2}, q = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2},$

表 2 圆锥面弯晶谱仪的参数计算公式

Table 2 Formulations of the parameters for conical bent crystal spectrograph

Spectrograph	Co- I	Co  II
Spatial coordinate	$x_i = 0, y_i = y_c + \Delta y$	$x_i = 0, y_i = 0$
Spectral coordinate	$z_i = z_c + \Delta z$	$z_i = \frac{z_s z_c}{2z_s \cos^2 \alpha - z_c}$
Dispersion relationships	$\lambda = \frac{2d(z_s + z_i)}{n \sqrt{x_s^2 + (z_s + z_i)^2}}$ *	$\lambda = \frac{2d(z_s + z_i) \sin \alpha}{n \sqrt{z_s^2 - 2z_s z_i \cos 2\alpha + z_i^2}}$
Linear dispersion	$\frac{d\lambda}{dz_i} = \frac{2dx_s^2}{n[x_s^2 + (z_i + z_s)^2]^{3/2}}$ *	$\frac{d\lambda}{dz_i} = \frac{4dz_s(z_s - z_i) \cos^2 \alpha \sin \alpha}{n(z_i^2 - 2z_s z_i \cos 2\alpha + z_s^2)^{3/2}}$
Angular dispersion	$\frac{d\lambda}{d\theta} = \frac{2d(x_s - x_c)}{n \sqrt{(x_s - x_c)^2 + z_s^2}}$ *	$\frac{d\lambda}{d\theta} = \frac{2d(z_s \cos^2 \alpha - z_c)}{n \cos \alpha \sqrt{(z_s - z_c)^2 + z_c^2 \tan^2 \alpha}}$
Spatial magnification	$M_{\text{spat}} = q/p$	$M_{\text{spat}} = q/p$
Spectral magnification	$M_{\text{spectr}} = q/x_c$	$M_{\text{spectr}} = q/x_c$

\* Results is calculated in the plane  $y_c = 0, p = \sqrt{(x_c - x_s)^2 + (y_c - y_s)^2 + (z_c - z_s)^2}, q = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}$

$$\Delta y = -\chi^{-1} x_c y_c (k^2 x_c^2 + 2[(k^3 + k)z_c - k z_s] x_c - y_c^2 + z_c [-2k x_s + (k^4 + k^2 - 1)z_c - 2(k^2 - 1)z_s]),$$

$$\Delta z = \chi^{-1} x_c (k^2 (3z_c - z_s) x_c^2 + 2k \{z_c [(k^2 - 1)(2z_c - z_s) - k x_s] - y_c^2\} x_c + z_c^2 [(k^4 - 3k^2 + 1)(z_c - z_s) - 2k(k^2 - 1)x_s] + y_c^2 [(1 - 2k^2)z_c + z_s]),$$

$$\chi = k^2 x_c^2 + k(2(k^2 - 1)z_c - k x_s) x_c^2 + (y_c^2 + z_c(z_c + k(-2(k^2 - 1)x_s + k(k^2 - 5)z_c + 2k z_s))) x_c + x_s(-y_c^2 - (k^4 - 3k^2 + 1)z_c^2) + 2k z_c (y_c^2 + (k^2 - 1)z_c(z_s - z_c)),$$

$$k = \tan \alpha.$$

成像系统的物像对应关系可以用成像方程来描述,由几何光学知,圆柱镜面成像系统的成像方程可以表示为

$$1/p + 1/q = 2 \sin \theta / R, \quad (2)$$

类似地圆锥镜面成像系统的成像方程为

$$1/p + 1/q = 2 \sin \theta \cos \alpha / R, \quad (3)$$

这里  $p$  和  $q$  分别表示物距和像距,  $\theta$  为布拉格掠入

射角。由于 Cy- II 和 Co- II 型谱仪的光源和探测器的位置都在晶体的对称轴上,从光源发出的每一条光线的物距和像距都满足成像方程,因此这两种谱仪是理想聚焦的,不同波长的 X 光经过弯晶的布拉格衍射之后,在对称轴上沿轴线方向色散成一条聚焦线。Cy- I 和 Co- I 型谱仪只有分别在中心截面 ( $x_c = x_s/2$ ) 和在主截面内 ( $y_c = 0$ ) 时,才满足成像方

程,当入射光线偏离这些截面时,则系统存在离焦像差,导致同一波长的光线在像面上不再聚焦成一个像点,而是同时在空间方向和色散方向散焦的一条线,因此影响到谱仪的空间分辨和光谱分辨能力以及谱线的亮度。图 3 为  $\theta=30^\circ$  时晶体的宽度对像的

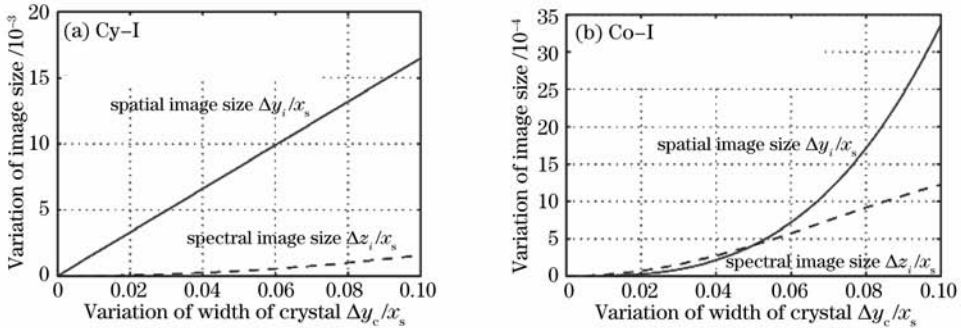


图 3 晶体宽度与图像尺寸的变化曲线

Fig. 3 Relationship between the variation of image size and crystal width

### 3.2 色散及色散率

从点光源发出的多波长 X 光入射到晶体面上时,由于入射角不同,从晶体的不同位置反射的 X 光波长也不一样。由布拉格方程可以把波长  $\lambda$  用晶体上的点的坐标  $(x_c, y_c, z_c)$  来表示:

$$\lambda = \frac{2d}{n} \sin \theta = \frac{2d}{n} \frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{N}}{|\mathbf{P}| |\mathbf{N}|}, \quad (4)$$

结合前面用光线追迹方法求得的色散坐标,得到了 X 光的波长与在探测器平面上的色散坐标之间的线色散关系,进一步求得线色散率。同样,由布拉格方程可以导出谱仪的角色散率为

$$\frac{d\lambda}{d\theta} = \frac{2d}{n} \cos \theta = \frac{2d}{n} \frac{|\mathbf{P} \times \mathbf{N}|}{|\mathbf{P}| |\mathbf{N}|}. \quad (5)$$

在本文建立的坐标系下,四种谱仪的线色散关系、线色散率和角色散率的具体计算公式列于表 1 和表 2 中。其中对于 Cy-I 和 Co-I 型谱仪,用光线追迹方法求得的线色散关系在形式上相当庞杂,而其在主截面内的线色散关系则相对简单得多。计算表明,用主截面内的色散关系代替真正的色散关系,其最大的误差不超过 0.15%,因此这种近似计算方法是可行的。

### 3.3 光谱分辨力

谱仪的光谱分辨力主要由晶体的不完整性、光源的大小(或离轴成像)以及探测器的空间分辨力三个主要因素来决定。精确地确定光谱分辨率与光源尺寸大小或者光源离轴量之间的关系仍然可以利用前面提出的光线追迹方法。但是由于其解析形式相当复杂,在此不详细讨论,而是给出一种简约的近似计算方法。即

空间线尺寸和谱线尺寸的变化曲线。可以看到当晶体的宽度和光源到探测器距离之比小于 0.02 时,对 Co-I 型谱仪的像尺寸几乎没有影响,而对 Cy-I 型谱仪的像空间尺寸则有非常大的影响。

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} [D_l \Delta l + D_\theta \Delta \theta], \quad (6)$$

式中  $D_l$  和  $D_\theta$  分别为谱仪的线色散率和角色散率;  $\Delta l$  是由光源有限大小(或光源离轴位移量)  $\Delta l_s$  引起的在光谱色散方向的像扩散尺寸(或像位移量)  $\Delta l_i = M_{\text{spectr}} \Delta l_s$ , 成像系统衍射极限分辨力  $\Delta l_{\text{diff}}$  和探测器的空间分辨力  $\Delta l_{\text{det}}$  共同决定的总的空间分辨力;  $\Delta \theta$  是晶体摇摆曲线的角半峰半宽。

### 3.4 谱仪亮度

谱仪的亮度主要由谱仪在空间方向集光能力(集光角)以及在光谱色散方向的亮度系数估计<sup>[9]</sup>。晶体的集光能力可以用参数  $L_{\text{spat}} = \omega/f$  来描述,这里  $\omega$  是晶体的在空间方向的口径宽度,  $f$  是成像晶体的焦距。圆柱面弯晶谱仪成像晶体的焦距  $f = R/(2 \sin \theta)$ , 圆锥面弯晶谱仪,成像晶体的焦距则为  $f = R/(2 \sin \theta \cos \alpha)$ 。光谱色散方向的亮度系数定义为  $L_{\text{spectr}} = D_l/D_\theta$ , 反映了光谱能量在色散方向的聚集程度,因此谱仪的谱仪亮度可以表示为

$$L = L_{\text{spat}} L_{\text{spectr}} = \frac{\omega}{f} \frac{D_l}{D_\theta}. \quad (7)$$

## 4 设计及性能比较

为了比较四种谱仪的性能,具体设计了四种型号谱仪的结构参数。设计的谱仪用于测量 Mg He $\alpha$  线( $\lambda = 0.917 \text{ nm}$ )及其伴线光谱。光谱测量范围为 0.85~1.13 nm, 中心波长  $\lambda_0 = 0.972 \text{ nm}$ 。选择大小为 100 mm  $\times$  40 mm 的云母晶体( $2d = 1.984 \text{ nm}$ )作为谱仪的分光元件。晶体中心到光源的距离设计为 340 mm, 布拉格角变动范围为  $24^\circ \sim 33^\circ$ 。按照这

些设计要求,可以计算出四种型号谱仪的相应结构参数。其中 Cy-I 和 Cy-II 型谱仪的光源坐标为 (600,0,160)、晶体半径为 160 mm;Co-I 型谱仪的光源坐标为 (600,0,160)、晶体中心半径为 141.18 mm、圆锥半顶角为 28°;Co-II 型谱仪的光源坐标为 (0,0,518)、晶体中心半径为 59.46 mm、圆锥半顶角为 18°。

图 4 为四种谱仪的相对亮度随布拉格角的变化曲线。Co-II 型谱仪比其他三种谱仪有高得多的亮度。Cy-I 和 Co-I 型谱仪虽然有相同的平均亮度,但是这两种谱仪在空间聚焦上是不同的。从图 5 中可以看到,Cy-I 型谱仪只有一个中心波长是理想聚焦的,而偏离这个中心波长的其他波长的图像尺寸迅速增大,从而导致图像的空间分辨率和谱线亮度迅速降低。这对于分辨那些本来强度就比主线要小的伴线光谱是非常不利的。Co-I 型谱仪很好克服了这些缺点,大部分能量都均匀地聚焦在约 200 μm 宽的中心聚焦线附近,只有部分能量分布在聚焦线的两侧。Cy-II 和 Co-II 型谱仪是理想聚焦的,因而这两种型号谱仪的光谱能量在空间方向上比较集中。进一步比较发现,对于同样大小的晶体,Co-II 的聚焦线长度是 Co-I 的一半左右。并且前者的集光能力比后者也要高得多,因而 Co-II 型谱仪的平均亮度要比 Co-I 型谱仪的亮度提高至少 5 到 6 倍。另外前者的色散聚焦线的长度更匹配于目前的

电子探测器感光尺寸(约几十毫米)。

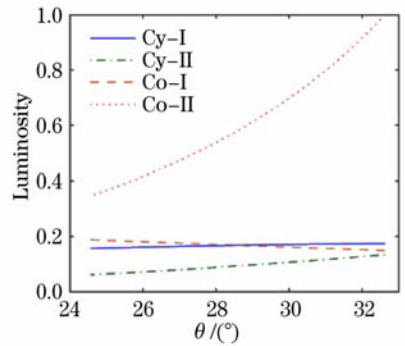


图 4 四种谱仪的相对亮度曲线

Fig. 4 Luminosity of four spectrographs versus Bragg angle

图 6 和图 7 分别是四种型号谱仪的线色散率和角色散率曲线。其中 Cy-I 和 Co-I 型谱仪的平均色散率为  $2.3 \times 10^{-3}$  nm/mm, Cy-II 型谱仪的平均色散率为  $0.61 \times 10^{-3}$  nm/mm, Co-II 型谱仪的平均色散率为  $3.0 \times 10^{-3}$  nm/mm。四种型号谱仪的平均角色散率为  $1.74 \times 10^{-3}$  nm/mrad。若假设晶体的摇摆曲线的半高半宽  $\Delta\theta = 0.45$  mrad, 谱仪总的空间分辨力  $\Delta l = 100 \mu\text{m}$ , 则 Cy-I 和 Co-I 型谱仪的平均光谱分辨力 ( $\lambda_0/\Delta\lambda$ ) 大约为 959, Cy-II 型谱仪的平均光谱分辨力为 1151, 而 Co-II 型谱仪的平均光谱分辨力为 897。四种型号的谱仪在空间上都足够分辨开 Mg He $\alpha$  线 (Mg XI  $1s^2^1S_0 - 1s2p^1P_1$ ,

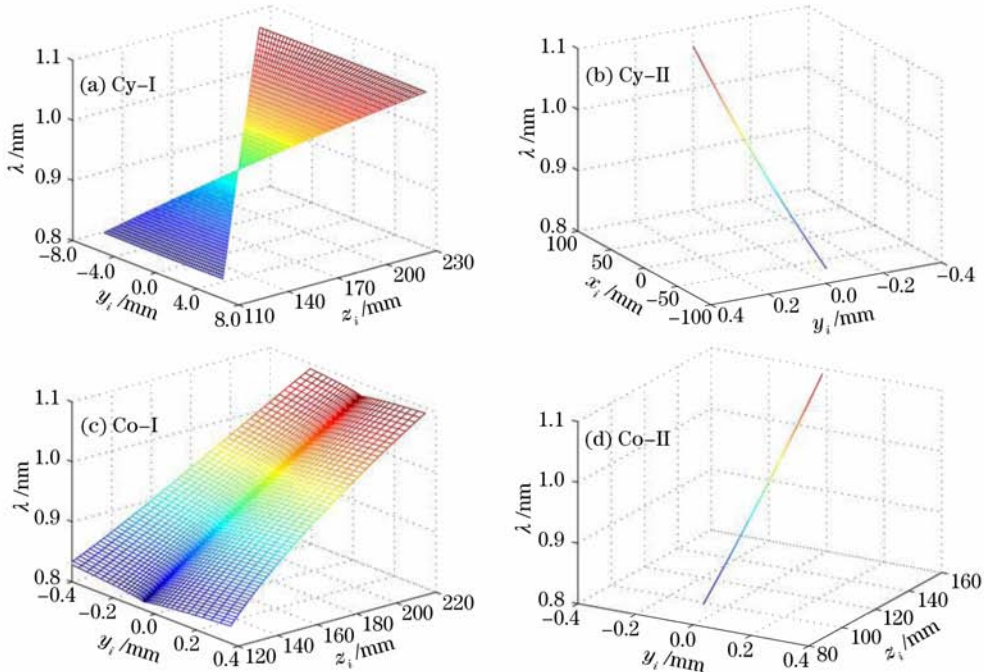


图 5 四种型号谱仪的光谱色散与空间聚焦三维图

Fig. 5 Three-dimensional plots of wavelength as a function of focalization grid for four types of spectrographs

$\lambda=0.917\text{ nm}$ )和它的伴线( $\text{Mg XI } 1s^2 1S_0-1s2p^3 P_1$ ,  $\lambda=0.923\text{ nm}$ ),但是由于伴线的强度极其微弱,因

而具有高谱线亮度的  $\text{Co- II}$  型谱仪此时具有了明显的优势。

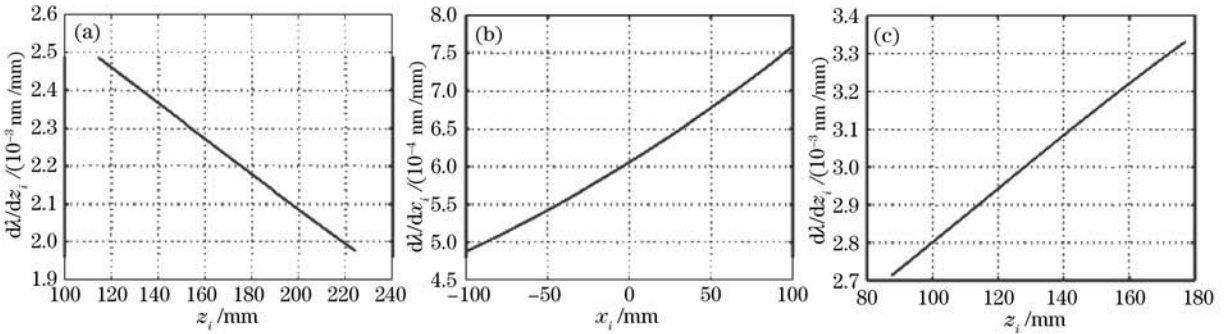


图 6 四种型号谱仪的线性色散率曲线

Fig. 6 Linear dispersion ratio curve for four types of spectrographs

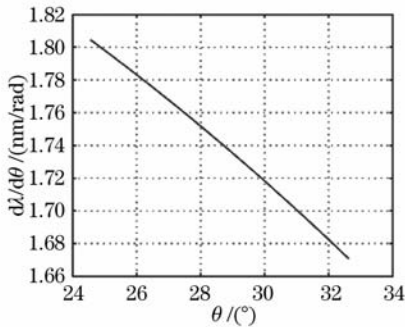


图 7 角色散率曲线

Fig. 7 Angular dispersion ratio curve

### 5 结 论

针对 Von Hamos 结构的圆柱面和圆锥面弯晶谱仪进行了基础的理论计算和比较分析。计算结果表明,圆锥面弯晶谱仪比传统圆柱面弯晶谱仪有着更为良好的聚焦性能,能够进一步改善谱仪的光子收集效率、谱线亮度以及空间分辨力,因而在等离子体的光谱诊断上具有非常好的应用潜力。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Ruirong, Chen Weimin, Dong Jiaqin *et al.*. High-resolution X-ray crystal spectrometer and its application in laser plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1220~1224  
王瑞荣,陈伟民,董佳钦等. 高分辨 X 射线晶体谱仪及其在激光等离子体中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1220~1224
- 2 Dong Jiaqin, Fu Sizu, Xiong Jun *et al.*. Experimental research on pinhole-assisted point projection diagnostic scheme [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 604~608  
董佳钦,傅思祖,熊俊等. 针也辅助点投影诊断方法实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 604~608
- 3 Gao Jie, Zhong Xianxin, Xiong Xiancai *et al.*. Elliptical crystal spectrometer designed for laser-produced plasma X-ray [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 180~183

- 高洁,钟先信,熊先才等. 激光等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪的设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 180~183
- 4 Zhao Yang, Yang Jiamin, Zhang Jiyan *et al.*. Novel method of the wavelength determination of spectral lines with planar crystal spectrometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 587~591  
赵阳,杨家敏,张继彦等. 利用平晶谱仪测量谱线波长的新方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 587~591
- 5 V. Arora, S. R. Kumbhare, P. A. Naik *et al.*. A simple high-resolution on-line X-ray imaging crystal spectrograph for laser-plasma interaction studies[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(7): 2644~2648
- 6 Fan Pingzhong, E. Fill, Guan Tietang. Soft X-ray crystal spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7): 923~926  
范品忠, E. Fill, 关铁堂. 软 X 射线晶体谱仪[J]. *光学学报*, 1995, **15**(7): 923~926
- 7 Sun Lan, Han Shensheng, Xu Zhizhang *et al.*. Crystal spectrometers in line-shaped plasma measurement and their applications in experimental X-ray laser investigation [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(1): 62~67  
孙岚,韩申生,徐至展等. 线状等离子体测量中的晶体谱仪及其在 X 射线激光实验中的应用[J]. *光学学报*, 1994, **14**(1): 62~67
- 8 T. A. Hall. A focusing X-ray crystal spectrograph[J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1984, **17**: 110~112
- 9 E. Martinolli, M. Koenig, J. M. Boudence *et al.*. Conical crystal spectrograph for high brightness X-ray  $K\alpha$  spectroscopy in subpicosecond laser-solid interaction [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(6): 2024~2028
- 10 U. Andiel, K. Eidmann, F. Pisani *et al.*. Conical X-ray crystal spectrometer for time integrated and time resolved measurements [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(4): 2369~2374
- 11 S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, M. D. Mitchell *et al.*. Extreme luminosity imaging conical spectrograph [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10F309): 10F309-1~10F309-4
- 12 C. Bonté, M. Harmand, F. Dorchies. High dynamic range streak camera for sub-picosecond time-resolved X-ray spectroscopy [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(043503): 043503-1~043503-8
- 13 S. A. Pikuz, J. D. Douglass *et al.*. Wide band focusing X-ray spectrograph with spatial resolution [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, **79**(013106): 013106-1~013106-7