

# 二维全谱高分辨中阶梯光谱仪光学系统设计

张瑜峰<sup>1</sup> 武建芬<sup>2</sup> 朱青松<sup>1</sup> 杜辉<sup>1</sup> 王宇<sup>3</sup> 王泰升<sup>4</sup>

<sup>1</sup>北京电子科技职业学院, 北京 100176

<sup>2</sup>北京普源精电科技有限公司, 北京 102206

<sup>3</sup>中国科学院电子学研究所, 北京 100190

<sup>4</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 传统的罗兰圆光谱仪和 Czerny-Turner 型光谱仪常常采用刻线密的光栅和大的成像焦距, 来提高其光谱分辨率, 其结果导致成本高和仪器体积庞大。为了克服这一缺点, 提出了一种中阶梯光栅和低色散棱镜相结合的光谱仪光学系统设计方法。具体分析了中阶梯光栅的基本原理和使用方法, 给出设计基于中阶梯光栅的光谱仪基本步骤, 并且实际设计了基于中阶梯光栅的高分辨光谱仪光学系统, 焦距为 400 mm, 可在全谱工作波段 180~800 nm 成二维光谱。Zemax 光学设计软件对光学系统进行光线追迹结果表明, 该系统环围能量在单个 CCD 像素(24 μm×24 μm)内达到 50%~70% 以上, 200 nm 处分辨率可达 0.00675 nm, 完全满足设计指标要求。

**关键词** 光学设计; 光谱仪; 中阶梯光栅; 高分辨; 二维光谱

中图分类号 O433.1; TH744.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0422005

## Optical Design of High Resolution Two Dimension Echelle Spectrometer

Zhang Yufeng<sup>1</sup> Wu Jianfen<sup>2</sup> Zhu Qingsong<sup>1</sup> Du Hui<sup>1</sup> Wang Yu<sup>3</sup> Wang Taishen<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Beijing Polytechnic, Beijing 100176, China

<sup>2</sup>Beijing Rigol Technologies Inc, 102206, China

<sup>3</sup>Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

<sup>4</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** The dense grooves grating and long camera focus are usually used to obtain high optical resolution in traditional Rowland and Czerny-Turner spectrometers. To avoid expensive cost or large volume of spectrometers, a novel optical system based on echelle and low dispersion prism with high optical resolution is presented. Firstly, the principle and application method of echelle are deduced in details. Secondly, the design steps are provided to set up a optical system with echelle. Finally, an optical system example based on echelle grating is designed. Its camera focus is 400 mm with wavelength range of 180~800 nm, the spectrograph can be imaged on the two dimension area at the same time. The ray tracing and optimization to the optical system are carried out with Zemax software, and the results show the encircle energy in a single CCD pixel (24 μm×24 μm) area can reach 50%~70% above within wavelength range of 180~800 nm, the resolution is 0.00675 nm at 200 nm, and it is enough to meet applications of distinguishing most elements.

**Key words** optical design; spectrometer; echelle; high resolution; two dimensional spectra

**OCIS codes** 050.1950; 050.1970; 300.6190; 300.6320

## 1 引 言

发射光谱仪在现代钢铁、化工、冶金、材料、生物等领域的元素成分和含量分析测试中起着重要的作用,

收稿日期: 2014-11-10; 收到修改稿日期: 2014-12-28

基金项目: 国家 863 计划(2013AA122201)、北京电子科技职业学院科研基地建设-科技创新平台项目(PXM2013-014306-000035)

作者简介: 张瑜峰(1978—), 男, 本科, 工程师, 主要从事光通讯技术及光谱仪器等方面的研究。E-mail: wjf\_85@163.com

目前市场上广泛使用的光谱仪,其光学系统大部分都是基于罗兰圆或 Czerny-Turner 型结构<sup>[1-6]</sup>。在基于罗兰圆结构的光学系统设计中,为了获得高的光谱分辨率,常常通过使用焦距更长的凹面光栅,同时增加光栅刻线数来提高分辨率<sup>[1-2]</sup>,而在优化结构的消像差 Czerny-Turner 光学系统中,焦距一定的条件下,也只能是通过增加光栅刻线数来获得高的光谱分辨率<sup>[3-6]</sup>,这不仅增加了光栅的刻划难度,扩大了仪器的体积,而且刻线数目也不可能无限制提高,其结果直接导致光谱仪器的成本大幅增加<sup>[7-8]</sup>。1949 年美国麻省理工学院的 Harrison 教授摆脱传统的光栅的设计思路<sup>[7]</sup>,从增加衍射角获得高衍射级次来提高光谱分辨率的角度出发,通过降低光栅刻划数目和增加入射衍射角度两方面入手,利用短边槽提供高衍射级次的方法研制成中阶梯光栅,这种光栅刻线数目较少(30~316 条),使用的光谱级次高( $m=20\sim 300$ ),具有大色散率、高分辨率,光谱范围宽的突出优点<sup>[9-15]</sup>。为了消除光谱级次重叠,通过配合一个低色散光栅或棱镜实现交叉色散,可以有效解决光谱级次间重叠,从而将一维光谱变为二维光谱。区别于传统罗兰圆和 Czerny-Turner 光谱仪光学系统,基于中阶梯光栅的光谱仪可以在同样的成像焦距下轻松获得高的光谱分辨率,其突出优点是刻线密度在 30~300 line/mm,便于保证精度,光路固定,全谱成像,高色散,高分辨率(可小于 0.005 nm),宽光谱范围,干扰光谱重叠弱,光室体积小,成像面积小<sup>[8-13]</sup>。本文在分析中阶梯光栅原理的基础上,利用低色散棱镜元件与高色散中阶梯光栅相搭配的设计思想,设计了高分辨率的中阶梯光栅光谱仪,通过面阵电荷耦合器件(CCD)作为其接收器件,使中阶梯光栅的高分辨、宽光谱范围优点在光谱仪器中充分的展示出来,从而获得高分辨二维光谱仪。

## 2 中阶梯光栅基本原理及参数设计

为了获得高的衍射效率,常规光栅常常用低级次衍射光谱(1 或 2 级),通过增加光栅的刻划数和焦距来提高光谱分辨率,在光栅刻划周期  $d$  不变的情况下实际上由光栅线色散率公式<sup>[1-2]</sup>:

$$\frac{dl}{d\lambda} = f \frac{d\beta}{d\lambda} = f \frac{m}{d \cos \beta}, \quad (1)$$

通过高衍射级次  $m$  和大衍射角  $\beta$ ,也可以用粗光栅获得高的光谱色散率,这正是中阶梯光栅设计思想<sup>[9]</sup>。

图 1 为中阶梯光栅在自准直情况下的沟槽结构示意图,自准直情况下入射角  $\alpha$  等于衍射角  $\beta$ ,其中  $W$  表示光栅的有效刻划长度,  $A$  表示光栅的有效受光孔径,  $B$  为光栅的光学深度。设  $N$  是光栅总的刻划数目,则由光栅周期常数  $a$ ,衍射边深度  $t$  和光程差边宽度  $s$  可得:

$$\begin{cases} W = Na \\ A = Ns \\ B = Nt \end{cases} \quad (2)$$

在自准直情况下,由图 1 可见相邻两沟槽间的光程差为  $2t$ ,光栅方程为

$$a[\sin(\alpha) + \sin(\beta)] = 2t = m\lambda, \quad (3)$$

角色散率为<sup>[9-12]</sup>:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2t}{s\lambda} = \frac{2 \tan \beta}{\lambda}. \quad (4)$$

角色散率与衍射角度及波长有关,这里可知中阶梯光栅的分辨率是不均匀的,长波处分辨率会降低,所

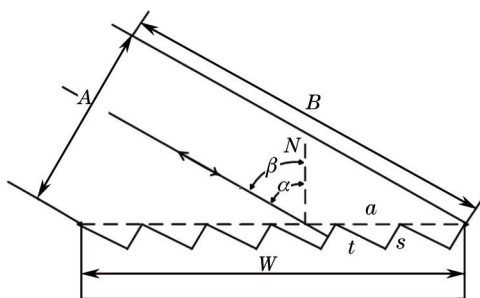


图 1 自准直中阶梯光栅结构示意图

Fig.1 Schematic of echelle in Littrow configuration

以设计光谱仪时需明确给出设计波长处的分辨率,光学分辨率是一种更直观的分辨率表示方式<sup>[9-12]</sup>:

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = mN = \frac{2t}{\lambda} \cdot \frac{W}{d} = \frac{2W \sin\beta}{\lambda} = \frac{2B}{\lambda},$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{R}.$$
(5)

由(5)式可见,分辨率与槽深及波长有关,因此正确选择了中阶梯参数后,就已经确定了最终设计的光谱仪的分辨率性能。

自由色散区是每个衍射级次互不干涉的波长范围,但是在没有低色散光学元件的情况下,这些衍射级次是相互重叠的,它们的带宽长度决定了最终的成像探测器的水平方向尺寸,这里自由色散区用波长和波数可表示为<sup>[1-2,9-12]</sup>:

$$F_\lambda = \frac{\lambda}{m} = \frac{\lambda^2}{2t},$$

$$F_\sigma = \frac{F_\lambda}{\lambda^2} = \frac{1}{2t}.$$
(6)

通过利用低色散棱镜或光栅实现级次分离,使各衍射级次在垂直方向分离,从而实现二维光谱图,考虑底色散光学元件色散能力,CCD成像面的长和宽可表示为<sup>[1-2,9-12]</sup>:

$$l = \frac{\lambda_m f}{s},$$

$$h = \int \beta \hat{\delta}(\lambda) d\lambda,$$
(7)

式中  $\hat{\delta}(\lambda)$  为低色散棱镜或光栅的角色散率,  $f$  为成像焦距。

这里(1)~(7)式构成了中阶梯光栅光谱仪的设计基础,目前国内中阶梯光栅的加工还处于起步阶段,想要加工按具体设计参数的中阶梯光栅,技术和成本方面都是比较困难的。因此选择合适的现有中阶梯光栅参数,通过结构设计实现所需光谱仪性能是正确的实现方法。这里图2给出了实现中阶梯光栅参数到光谱仪

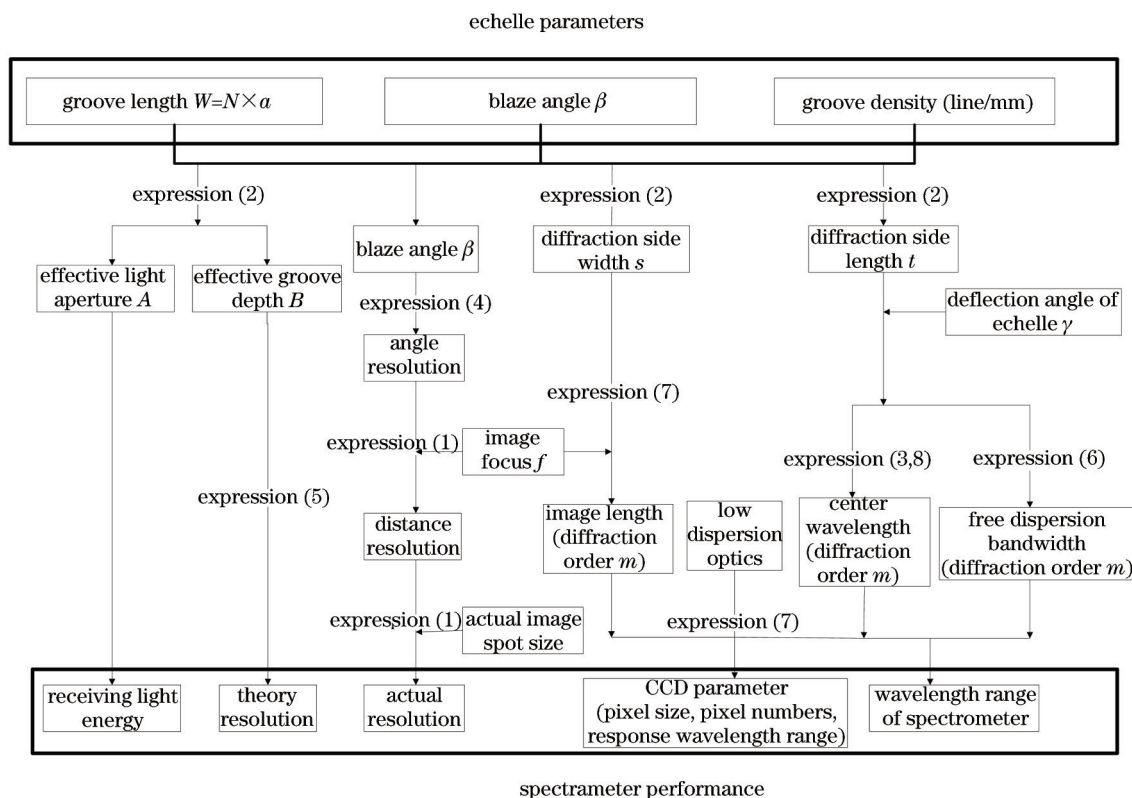


图2 光谱仪性能与中阶梯光栅光学参数关系

Fig.2 Relation between the echelle paramaters and spectrometer performances

性能参数的关系方框图,依据(1)~(7)式,及下一节的(8)式,

可以选择合适中阶梯光栅尺寸,闪耀角和刻线数,通过结构设计合理的光栅偏转角 $\gamma$ 和成像焦距 $f$ ,实现光谱仪所需的光谱范围,光学分辨率,CCD成像尺寸和成像焦距,光通量等基本性能参数<sup>[9-12]</sup>。

### 3 中阶梯光栅光谱仪光学系统设计

目前国内能生产中阶梯光栅的厂家很少,国外有Thorlabs, Newport等公司,其产品有一系列规格。为了使光学系统达到预定的性能参数,必须从其中选择合适参数的中阶梯光栅,同时配合合理的狭缝,准直镜,棱镜,成像镜和优化的光学结构设计来满足性能要求。

#### 3.1 中阶梯光栅参数设计

为避免光源和 CCD 成像器件在位置空间上矛盾,设计的光学系统采用非自准直光路,图 3 为非自准直中阶梯光栅的光路结构示意图<sup>[16-18]</sup>。

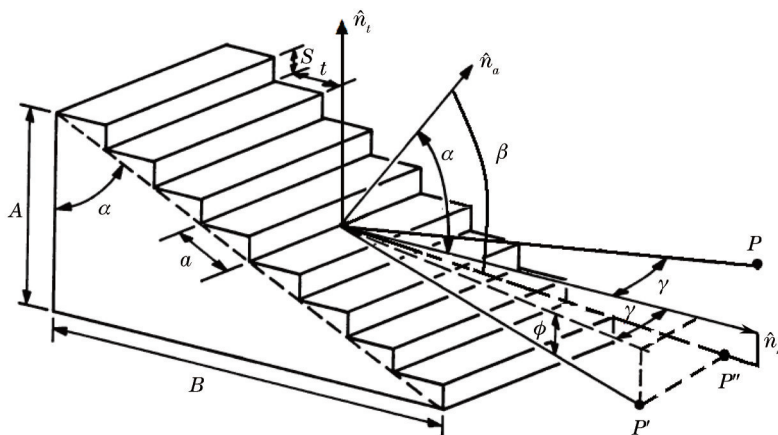


图 3 非自准直中阶梯光栅的光路结构示意图

Fig.3 Schematic of echelle optics in non-littrow configuration

在这种光路情况下使用中阶梯光栅,光栅方程(3)式变为

$$a \cos(\gamma)[\sin(\alpha) + \sin(\beta)] = 2t \cos(\gamma) = m\lambda, \quad (8)$$

通过(8)式可以确定在选定光栅偏转 $\gamma$ 角度下的各衍射的中心波长,从而通过图 2 流程确定最终光谱仪性能。入射角 $\alpha$ 和衍射角 $\beta$ 是在光栅子午面内度量的,实际使用中 $\gamma$ 和 $\phi$ 的角度很小,角色散率仍可表示为

$$\frac{d\phi}{d\lambda} \approx \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2t}{s\lambda} = \frac{2 \tan \beta}{\lambda}. \quad (9)$$

其他参数光学分辨率,自由色散区,CCD 成像面积仍可用(5)~(7)式表示,只不过由于入射角与光栅子午面夹角 $\gamma$ 的存在,使狭缝的像相对于光栅刻划方向有一个角度 $\chi$ 的旋转,其大小可表示为<sup>[18]</sup>

$$\chi = \arctan \left[ -\frac{2t \sin(\gamma)}{s} \right]. \quad (10)$$

这里由于 $\gamma$ 角的存在,对于垂直入射的长条形狭缝,其成像后的狭缝像会有一定的角度偏转,因此对于使用长条形狭缝的应用场合,事先在入射狭缝处有一定的反向角度偏转,将可保证长条形狭缝垂直成像。

#### 3.2 低色散棱镜设计

尽管中阶梯光栅有高角色散率,宽光谱范围的突出优点,但其各个高衍射级次的自由光谱区相互重叠,必须用一个低色散光学元件来将它们分开。选用低密度平面光栅可以获得均匀的色散率,但低色散光栅的光谱重叠对光谱范围有一定的限制,需根据不同波段更换光栅或用双光路设计<sup>[13]</sup>,低色散棱镜的一个缺点是其光谱色散率不均匀,但其突出优点是全谱范围内无光谱重叠,便于光路固化设计,因此选用在紫外和可见光波段都有很高透射率的融石英棱镜作为低色散光学元件。为保证低色散棱镜在整个光谱范围内成像于 CCD 探测器有效面积上,必须选择合理的棱镜顶角。当棱镜对某一波长而言,处于最小偏向角时,其线色散

率可表示为<sup>[1]</sup>

$$\frac{dL_{\text{prism}}}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \frac{dn}{d\lambda}, \quad (11)$$

在整个光谱范围内,利用上式可以近似的计算出低色散方向上的高度:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} n(\lambda) d\lambda, \quad (12)$$

式中  $\alpha$  为棱镜顶角,  $n(\lambda)$  为折射率导数在波长  $\lambda$  对应的值,  $\lambda_2 - \lambda_1$  为探测光谱范围,实际光路设计中可由上式近似算出结果,再由光学设计软件 Zemax 优化给出满足有效 CCD 成像面积的棱镜顶角值  $\alpha$ 。

### 3.3 准直、聚光镜设计

在传统光谱仪中,常常采用大口径球面反射镜作为准直镜和聚光镜,由于离轴准直、聚光,所以球差、彗差和像散都比较大,狭缝像被扩展到几毫米。这在光电倍增管探测器作为接受器的光谱仪中是可以接受的,因为其光敏面直径(通常大于等于 20 mm)远大于狭缝像的展宽。在所设计的光谱仪中,CCD 探测器有效成像面积约为  $24.576 \text{ mm} \times 24.576 \text{ mm}$ ,探测器的像元尺寸为  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ ,全谱成像于 CCD 有效探测面积,此时必须考虑狭缝和像差的影响,除了选择较小的狭缝,通过控制球面反射镜口径和在小角度离轴的情况下使用,其球差和彗差相对较小,像散是其主要需校正的像差,其特点是子午方向和弧矢方向的焦长不同,因此可选用子午和弧矢方向有不同焦长的超环面镜来校正最终成像像差。这样根据光谱仪的性能参数选用合适曲率半径的球面反射镜作为准直镜,而对聚光镜通过 Zemax 软件优化其子午和弧矢曲率半径得到超环面镜,将其作为最终消像差聚光镜。

## 4 设计实例及结果分析

根据前面讨论,本节结合具体的设计要求,实际设计了光学系统,并通过 Zemax 软件仿真,给出最终的设计结果。

### 4.1 光谱仪主要性能参数

所设计的光谱仪主要应用于钢铁,冶金,材料,化工领域的元素成分含量的测定,主要有火花、电感耦合、激光原位等光谱激发方法,其光谱范围覆盖紫外及可见光光谱。在全谱范围内成狭缝像,要求 CCD 探测器有一定的有效成像面积,CCD 探测器像元尺寸满足理论光学分辨率要求,同时为避免体积庞大的光室,成像焦距不易过大,另考虑大部分元素的光谱分布在紫外即可见波段,为此初步选定光谱仪的主要性能指标如下:

表 1 光谱仪性能参数

Table 1 Spectrometer performance parameters

Parameter	Value
Spectral range	180~800 nm
Imaging focus	400 mm
Theory resolution	0.00675 nm@200 nm( $R=29630$ )
Actual resolution	Distinguishable: P(213.618 nm), Cu (213.598 nm); Hg(313.155 nm, 313.183 nm)
CCD parameters	Effective pixel numbers: $1024 \times 1024$ Pixel size: $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$
Slit	$20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$

### 4.2 Zemax 软件实例设计

根据前面已叙述光谱仪性能参数与中阶梯光栅、棱镜、准直镜、聚光镜的关系,设计了一个中阶梯光栅和棱镜相结合的非成像光谱仪光学系统。光谱仪系统整体采用类似 Czerny-Turner 光学结构,并在光路中增



加棱镜色散单元,准直镜采用曲率半径 800 mm 的球面反射镜,为校正系统像散,聚焦镜采用超环面反射镜,中阶梯光栅具体参数为:每毫米刻线数为 52.67,闪耀角为 63.5°,玻璃材料采用热膨胀系数小的微晶玻璃 Zerodur,并在表面镀铝以增加其在紫外波段的反射率,棱镜采用融石英材料,顶角为 12°,这里棱镜采用双向光线透射,且与光栅尽可能的靠近,可以降低光栅的偏转角,减少由(10)式带来的成像偏转,同时实际光学系统加工过程中,可以将棱镜和光栅固定安装在一个模具内形成一个整体,避免分离较远距离带来的装调困难。利用光学软件 Zemax 仿真了多个特征谱线: Hg(313.155 nm, 313.183 nm, 253.652 nm), P(213.618 nm), Cu (213.598 nm), As(188.979 nm), Na(589.59 nm, 589 nm), K(766.491 nm), 入射狭缝为 20 μm×20 μm。图 4(a)是具体结构设计参数示意图,图 4(b)是实际 Zemax 软件仿真的光路图,表 2 给出了具体光路及光学元件及结构设计参数:

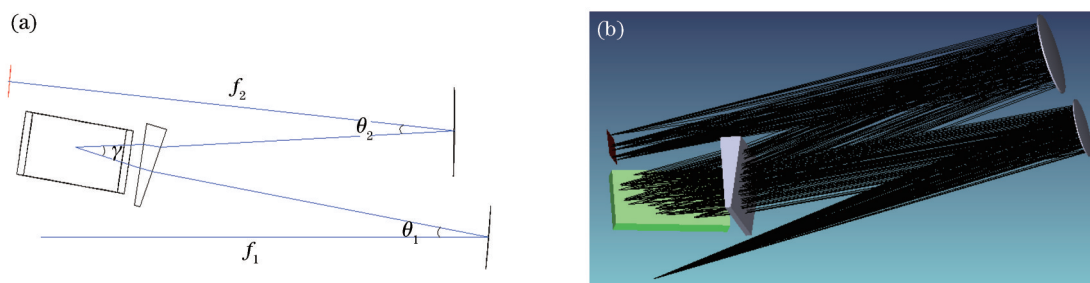


图 4 (a) 光路结构参数示意图; (b) 中阶梯光栅和棱镜光谱仪光路图

Fig.4 (a) Schematic of optical configuration parameters; (b) optical configuration with echelle and prism

表 2 光学元件及结构设计参数

Table 2 Optical elements and configuration design parameters

Optical elements	Element parameters	Configuration parameters
Collimating mirror	Aperture: 50 mm	Focus: $f_1 = 400$ mm Angle: $\theta_1 = 10^\circ$
Imaging mirror	Toroidal mirror Radius: 783.7 mm Rotate radius: 771.6 mm Aperture: 70 mm	Focus: $f_2 = 400$ mm Angle: $\theta_2 = 10^\circ$
Echelle	Size: 100 mm×50 mm Blaze angle: 63.5° Grooves: 52.67 line/mm	Deflection angle: $\gamma = 7^\circ$
Prism	Vertex: 12° Size: 70 mm×70 mm	

### 4.3 设计结果分析

对上述设计结果,通过光学设计软件 Zemax 对成像光谱仪总的光学系统进行光线追迹和优化,从点列图、环围能量曲线及成像模拟几个方面对该光学系统设计结果进行了分析评价。优化后的光谱仪系统对各仿真谱线的点列图如图 5 所示,包括 Hg(313.155 nm, 313.183 nm, 253.652 nm), P(213.618 nm), Cu (213.598 nm), As(188.979 nm), Na(589.59 nm, 589 nm), K(766.491 nm) 元素的特征波长谱线, 200 nm, 200.00675 nm 分辨率验证波长, 254.927 nm 的 CCD 设计中心波长。由图可见该光学系统在各个谱线上的点列图无大起大落,基本保持稳定。图 6 是紫外短波 188.979 nm 和 213.618 nm 两个波长的环围能量曲线图,由图可见 CCD 单个 24 μm×24 μm 像素内集合的能量在 70%~80% 以上,可以充分满足分辨率对光强的要求。图 7 为紫外 313.155 nm 和可见光波长 589 nm 处的谱线环围能量曲线图,其中 313.155 nm 波长处, 24 μm×24 μm 像素内集合的能量在 70%~80% 以上,可以充分满足分辨率对光强的要求,而在波长 589 nm 处环围能量 70% 以上则包含在 40 μm×40 μm 像素内,在满足分辨率对光强的要求条件下,分辨率略有降低,这符合中阶梯光栅的分辨率不均匀的特性,其短波处分辨率高,长波处分辨率低,这一结果也可从第 2 节(4)式中看出其规律。图 8 为仿真的光谱仪光学系统在探测器平面上的二维光谱点列图,由图可见几个典型汞灯谱线可以轻松地被分开,而且在设计的分辨率指标鉴别波长(200 nm, 200.00675 nm)上

也能得到可分辨的光谱图(图8中的局部放大部分),所设计的光谱仪系统能在180~800 nm范围内全谱成像于有效探测面积为24.576 mm×24.576 mm的二维面阵CCD上,且不存在光谱级次重叠,完全满足最初制定的光谱仪的理论分辨率性能指标。实际光谱仪总是选用一定面积大小的面阵CCD,其像素的大小直接决定了最终可实现的分辨率性能,图9是将探测器面设置成1024 pixel×1024 pixel,单像素24 μm×24 μm大小后的仿真二维光谱图。由图可见,光学系统可以轻松地分辨P(213.618 nm), Cu(213.598 nm)和Hg(313.155 nm, 313.183 nm)的特征谱线,满足最初制定的实际光谱分辨率要求。

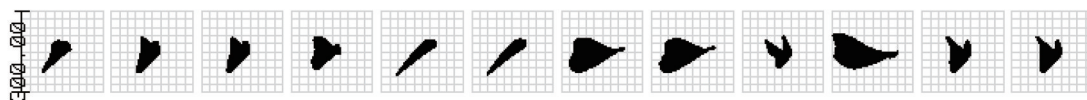


图5 不同特征波长处的仿真谱线点列图

Fig.5 Simulation spot diagram of different characteristic wavelengths

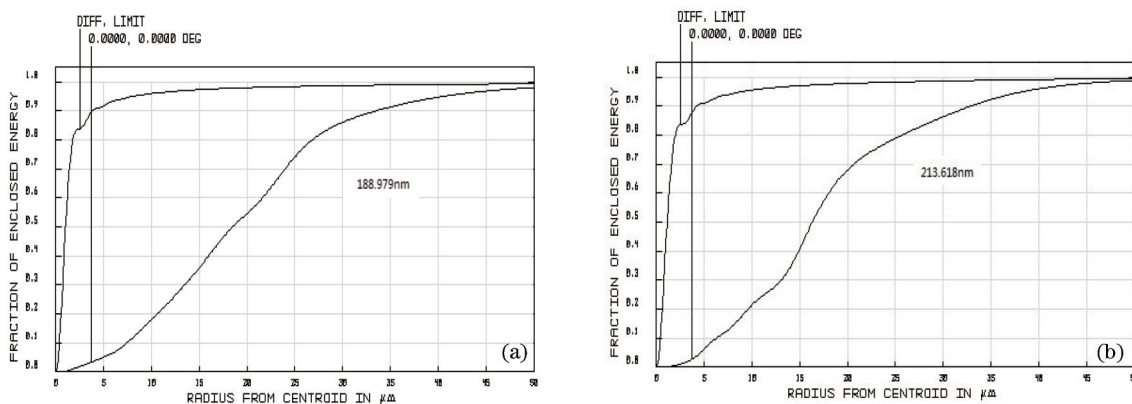


图6 波长(a) 188.979 nm和(b) 213.618 nm处的环围能量曲线图

Fig.6 Encircled energy diagram at wavelength of (a) 188.979 nm and (b) 213.618 nm

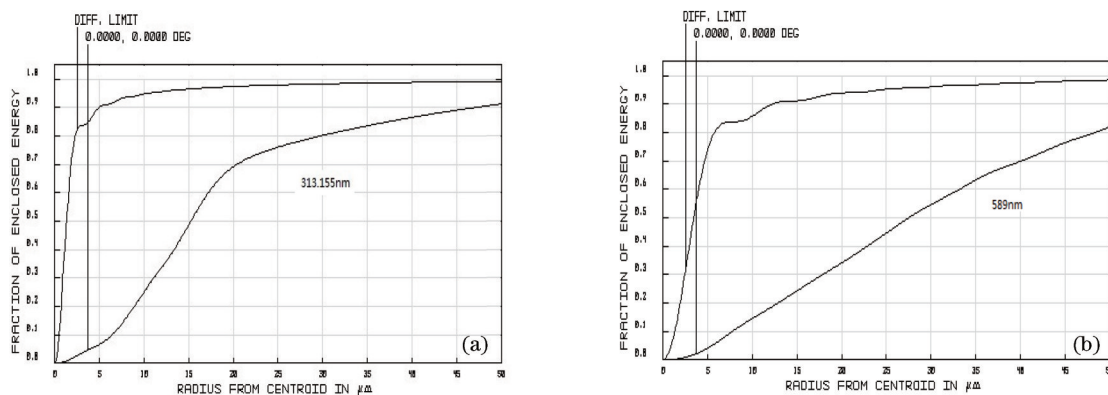


图7 波长(a) 313.155 nm和(b) 589 nm处的环围能量曲线图

Fig.7 Encircled energy diagram at wavelength of (a) 313.155 nm and (b) 589 nm

完成了基于中阶梯光栅的光谱仪光学系统的设计及Zemax软件仿真实现,实际使用中必须对所设计的光学系统进行波长标定,才能解析所采集的光谱图,基于Matlab软件编写了相应的程序,成功实现了全谱波长标定(另文讨论),对整个光谱范围的波长建立了光谱位置数据库。图10(a),(b),(c)是对上述仿真光学系统实际计算的全谱图,并标出各仿真波长在全谱图中的位置,计算结果与Zemax软件仿真位置信息小于1个像素单位(24 μm)。

## 5 结 论

提出了基于中阶梯光栅和棱镜的非成像光谱仪光学系统设计方法,通过选择合理的狭缝,准直镜,棱

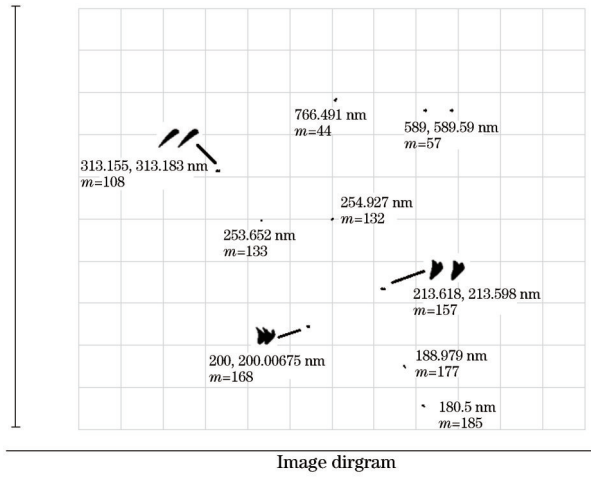


图 8 二维成像面上的仿真谱线点列图  
Fig.8 Simulation spot diagram of characteristic wavelengths in two dimension image plane

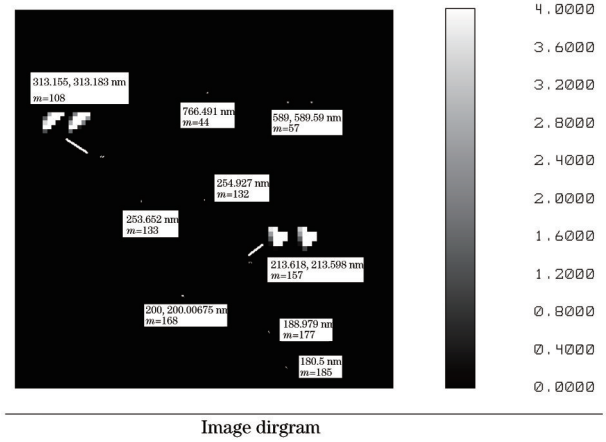


Image dirgram  
图 9 二维探测器成像面上的仿真谱线图(像素阵列 1024 pixel×1024 pixel, 像素尺寸 24 μm×24 μm)  
Fig.9 Simulation spot diagram of characteristic wavelengths in two dimension detector plane (pixels array 1024 pixel×1024 pixel, pixel size 24 μm×24 μm)

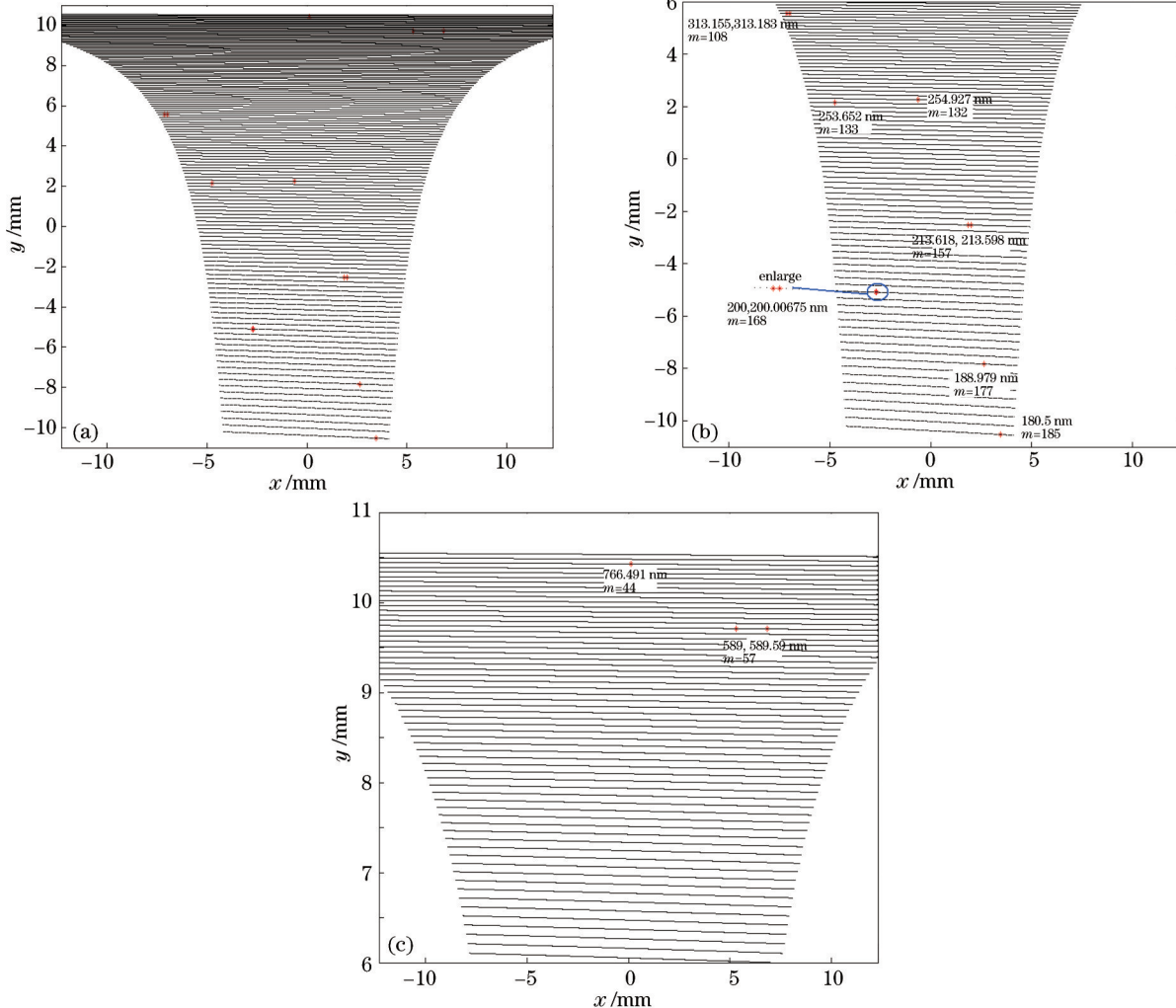


图 10 (a)全谱标定图;(b)全谱标定图(紫外谱图部分放大);(c)全谱标定图(可见谱图部分放大)  
Fig.10 (a) Full spectra calibration; (b) full wavelength calibration spectrogram (UV spectrum is enlarged); (c) full wavelength calibration spectrogram (visible spectrum is enlarged)



镜,成像镜和优化的光学结构设计来满足性能要求。对于系统像差的校正,通过合理选择准直镜口径和轴角度尽量减少球差和彗差的影响,并提出通过超环面镜作为聚光镜,来校正最终像散。利用这种方法设计了焦距为400 mm,工作波段为180~800 nm的高分辨二维中阶梯光栅光谱仪,通过光学设计软件Zemax优化和分析,结果表明设计的光谱仪光学系统在全谱范围内,其单个CCD像素内集合的能量在50%~70%以上,可以满足分辨率对光强的要求。分辨率在指标鉴别波长(200 nm)上能达到0.00675 nm,所设计的光谱仪系统能在180~800 nm范围内全谱成像于有效探测面积为24.576 mm×24.576 mm的二维面阵CCD上,且不存在光谱级次重叠,完全满足最初制定的光谱仪的性能指标。近年来出现的关于中阶梯光栅的设计应用和加工制作的研究,必将推动中阶梯光栅光谱仪的广泛应用<sup>[19-20]</sup>,提出的光学系统设计和像差校正方法试图为新一代高分辨全谱光谱仪的研制和产业化提供了理论依据和实践指导。

## 参 考 文 献

- 1 Li Quancheng, Jiang Yuejuan. The Principle of Spectral Instrument [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology University Press, 1999. 1-100.  
李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999. 1-100.
- 2 Lin Zhong, Fan Shifu. Spectroscopic Instrumentology [M]. Beijing: China Machine Press, 1989. 105-205.  
林 中, 范世福. 光谱仪器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 105-125.
- 3 Jia Hui, Yao Yong. Characteristics of typical optical systems with diffractive gratings of micro-spectrometers and improvement of spectrometer's resolution [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(8): 1653-1656.  
贾 辉, 姚 勇. 微小型光谱仪光学系统的特点和光谱分辨率的不断提高[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(8): 1653-1656.
- 4 Yang Huaidong, Chen Kexin, Huang Xingyue, *et al.*. Comparison of dispersion parts of conventional spectrometers [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1707-1712.  
杨怀栋, 陈科新, 黄星月, 等. 常规光谱仪分光系统的比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1707-1712.
- 5 Chen Tanxuan, Yang Huaidong, Chen Xinke, *et al.*. Coma and resolution in wide spectral region Czerny-Turner [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1692-1696.  
陈谭轩, 杨怀栋, 陈科新, 等. 宽光谱 Czerny-Turner 光谱仪中的彗差与分辨率[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1692-1696.
- 6 A B Shafer, L R Megill, L Droppleman. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer [J]. J Opt Soc Am, 1964, 54(7): 879-887.
- 7 Jiao Qingbin, Bayanheshig, Tan Xin, *et al.*. Effects of ultrasonic vibration and wettability enhancement on surface roughness on blaze plane of silicon echelon grating [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0305001.  
焦庆斌, 巴音贺希格, 谭 鑫, 等. 超声波震荡法及润湿性增强法对单晶硅阶梯光栅闪耀面粗糙度的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0305001.
- 8 Li Xiaotian, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.*. Influence and revising method of machine-ruling grating line's curve error, location error on plane grating's performance [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308009.  
李晓天, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 机械刻划光栅的刻线弯曲与位置误差对平面光栅性能影响及其修正方法[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308009.
- 9 G R Harrison. The production of diffraction gratings I. development of the ruling art [J]. J Opt Soc Am, 1949, 39(6): 413-426.
- 10 G R Harrison, J E Archer, J Camus. A Fixed-focus broad-range echelle spectrograph of high speed and resolving power [J]. J Opt Soc Am, 1952, 42(10): 706-712.
- 11 G R Harrison, S P Davis, H J Robertson. Precision measurement of wavelengths with echelle spectrographs [J]. J Opt Soc Am, 1953, 43(10): 853-861.
- 12 G R Harrison, E G Loewen, R S Wiley. Echelle gratings: their testing and improvement [J]. Appl Opt, 1976, 15(4): 971-976.
- 13 Wu Xuhua, Zhu Yongtian, Wang Lei. Optical design of high resolution echelle spectrograph [J]. Opt Precision Eng, 2003, 11(5): 442-447.  
武旭华, 朱永田, 王 磊. 高分辨率阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 442-447.
- 14 Xie Pin, Ni Zhenji, Huang Yuanshen, *et al.*. Application research progress in the echelle grating [J]. Laser Journal, 2009, 30(2): 4-6.  
谢 品, 倪争技, 黄元申, 等. 中阶梯光栅的应用研究进展[J]. 激光杂志, 2009, 30(2): 4-6.
- 15 Li Nana, An Zhiyong, Cui Jicheng. Aligning and testing of optical system of echelle spectrography [J]. Opt Precision Eng, 2009, 17(3): 531-536.

- 李娜娜, 安志勇, 崔继承. 中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装及检测[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 531-536.
- 16 R Tousey, J D Purcell, D L Garrett. An echelle spectrograph for middle ultraviolet solar spectroscopy from rockets[J]. Appl Opt, 1967, 6(3): 365-372.
- 17 Anderw A Dantzaer. Echelle spectrograph software design aid [J]. Appl Opt, 1985, 24(12): 4504-4508.
- 18 W A Rense. Techniques for rocket solar UV and for UV spectroscopy [J]. Space Science Reviews, 1966, 5(2): 234-238.
- 19 Chen Shaojie, Bayanheshig, Pan Mingzhong, *et al.*. Efficient algorithms for echelle spectrograph design and cross-dispersed spectra analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1030001.
- 陈少杰, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 中阶梯光栅光谱仪快速设计与谱图分析的数学模型[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1030001.
- 20 Wang Qi, Zheng Yanchang, Qiu Keqiang, *et al.*. Fabrication of echelle gratings with 90° apex angle [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0905001.
- 王 琦, 郑衍畅, 邱克强, 等. 90°顶角中阶梯光栅的研制[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0905001.

栏目编辑: 韩 峰