第37卷，第11期
2017年11月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 37, No. 11, pp3616-3620
November, 2017

# 紫外高分辨率像散校正型罗兰全息光栅设计

赵旭龙[1,2]，巴音贺希格[1*]，李文昊[1]，姜岩秀[1]，吴　娜[1]，张　桐[1]

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春　130033
2. 中国科学院大学，北京　100049

**摘　要**　为了降低紫外高分辨率罗兰光栅的像散对光谱像高展宽的影响，提出了在罗兰圆上使用球面波非对称曝光设计思路。推导完全校正离焦和子午彗差的表达式，讨论了多种罗兰光栅记录结构的局限性，优选适合校正紫外高分辨率罗兰光栅的优化方法。通过全息光栅像面展宽表达式，指出像散和弧矢彗差是影响光谱像高的主要因素，并分配了两者的优化权重。利用这种优化思路，设计了工作波段110～200 nm紫外高分辨率罗兰光栅，同时对比分析了传统光栅的像差系数和像高变化规律、像面结构和光谱分辨率。结果表明，和传统罗兰光栅分辨率处于同一数量级的情况下，所设计光栅光谱像高由25 mm降低到1.5 mm，谱面能量集中度有显著的提高。

**关键词**　罗兰光栅；像散校正；光栅设计
**中图分类号**：O436　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2017)11-3616-05

## 引　言

凹面光栅由19世纪Rowland提出，兼具色散、成像和像差校正等综合能力[1-2]。起初，罗兰光栅由光栅刻划机制作，金刚石刻刀在凹面基底上刻划形成直条纹。全息技术出现后，利用全息光学元件对成像光束波长变化非常敏感的特点，全息光栅应运而生。它除了具有刻划光栅成像特点外，还有无鬼线、低杂散光和制作效率高等优势，同时离子束刻蚀技术的发展，大大提高了全息光栅的效率[3-4]。罗兰光栅是指成像结构在基底曲率半径一半的罗兰圆上的凹面光栅，通过像差特性的研究，其离焦和子午彗差被完全矫正，因此具有较高的分辨本领，满足了光谱分析、光通信等领域高分辨率光谱仪器的需要[5-10]。

罗兰光栅的刻槽分为等间距直刻槽和变间距弯曲刻槽两种，使用平面波干涉光刻，制作等间距直刻槽光栅，其残余的像散和弧矢彗差较大，致使像面在弧矢方向聚焦能力不足，降低了罗兰光栅的能量利用率，同时，该光栅制作过程中使用了更多光学元件，即提高了制作的难度，又增加了曝光系统杂散光。另一种变间距弯曲刻槽罗兰光栅，根据Namioka像差理论，在保证完全校正离焦和子午彗差的情况下，部分校正了像散和弧矢彗差[11]。Brown等研究了记录光束在罗兰圆上的情况，在满足条件$1\leqslant m\lambda/\lambda_0\leqslant 2$时，像散和弧矢彗差才能在某一波长$\lambda$处同时被消除，其中$\lambda_0$为记录光波长[12]；Grange研究了记录光束在罗兰圆外的情况，并给出了两记录臂长满足特定方程时，在保证消除离焦和子午彗差的情况下，完全校正像散和弧矢彗差，该方法用于优化刻线密度较大的罗兰光栅时，优化记录臂长值为负值，为光栅的制作增加了难度[13]；Churin等分析了传统罗兰光栅结构，在红外窄波段内，使某波长处像散为零的方法，但其像散校正能力有限[14]；孔鹏等研究了宽波段罗兰光栅，在$\lambda$和$2\lambda$处，像散和弧矢彗差被同时消除的方法，并给出了表达式，其特殊的使用结构，偏离了光栅的实际使用情况，并不适用紫外高分辨率光栅的设计[15]。薛庆生等通过分析罗兰光栅的像散结构，设计了Schwarzschild结构的光谱成像系统，在整个使用波段内，将点列图RMS值降低到13 μm[16]。

深空探测等光谱分析领域使用的真空极紫外光栅[17-18]，既要在窄波段提高分辨率，又要保证探测光通量的要求。鉴于此，根据罗兰全息光栅的像差理论，在满足完全校正离焦和子午彗差的情况下，得出不同的罗兰光栅记录和使用结构，并给出不同结构对光栅制作的局限性；分析光栅优化设计过程中，弧矢方向像差系数间的权重分配，给出紫外高分辨率光栅的设计方法。利用此方法设计一个工作波段110～200 nm全息罗兰光栅，对比讨论传统光栅和像散校正罗兰

收稿日期：2016-06-08，修订日期：2016-12-16
基金项目：国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120023)资助
作者简介：赵旭龙，1988年生，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生　e-mail：zhaoxulong126@126.com
*通讯联系人　e-mail：bayin888@sina.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

光栅间的差异，根据像差系数变化曲线和光线追迹方法，对成像质量进行了评价。

## 1　罗兰光栅的弧矢像差校正

图 1 所示的是罗兰光栅的使用结构和记录结构示意图，以光栅原点 $O$ 建立坐标系，原点处光栅法线方向为 $x$ 方向，垂直 $x$ 方向和原点刻槽方向为 $y$ 方向，刻槽方向为 $z$ 方向，$xoy$ 在平面 $\Pi$ 内；光栅基底的曲率半径为 $R$，基底曲率半径之半为罗兰圆 $V$ 的半径；由光源 $A$ 点发出的复色光，经过光栅上任意点 $P$ 衍射后聚焦到 $B$ 点，$C$ 和 $D$ 为两记录光束参考点，$A$，$B$，$C$ 和 $D$ 点皆在平面 $\Pi$ 内，由罗兰光栅的使用结构可知 $A$ 和 $B$ 点均在罗兰圆上；$AO$，$BO$，$CO$ 和 $DO$ 分别对应了光栅的入臂 $r_A$，出臂 $r_B$ 和两参考光束记录臂长 $r_C$，$r_D$，各个臂长与光栅基底中心 $O$ 法线间的夹角 $\alpha$，$\beta$，$\gamma$ 和 $\delta$ 分别对应入射角、衍射角和两个记录角度；定义原点 $O$ 处为第零条刻槽，$P$ 点处为第 $n$ 条刻槽，根据全息光栅光程函数有

$$F(y,z)=F_{00}+yF_{10}+\frac{1}{2}y^2F_{20}+\frac{1}{2}z^2F_{02}+\frac{1}{2}y^3F_{30}+\frac{1}{2}yz^2F_{12}+\cdots \tag{1}$$

其中，$F_{ij}$ 是各级像差系数，$F_{20}$ 代表离焦，$F_{02}$ 代表像散，$F_{30}$ 代表子午彗差，$F_{12}$ 代表弧矢彗差等，每级像差系数是记录结构和使用结构共同作用的结果，可表示为[8]

$$F_{ij}=M_{ij}+(m\lambda/\lambda_0)H_{ij} \tag{2}$$

式(2)中，$M_{ij}$ 是使用结构像差项，$H_{ij}$ 是记录结构像差项，$m$ 是衍射级次，$\lambda$ 是衍射波长，$\lambda_0$ 是记录波长。

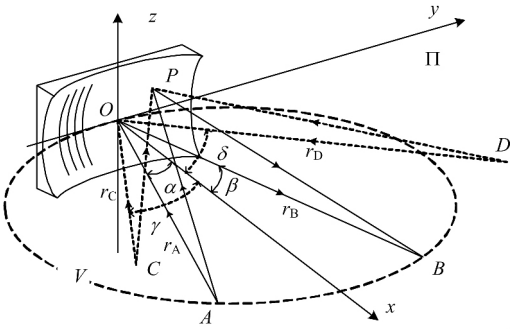


图 1　罗兰光栅的使用结构和记录结构示意图

Fig. 1　The diagram of utilization structure and record structure of Rowland grating

为了保证罗兰光栅高分辨率的特点，离焦像差 $F_{20}$ 要严格保证完全被消除。根据罗兰光栅使用结构的特点，入射光源和接收像面均在罗兰圆上，即 $r_A=R\cos\alpha$，$r_B=R\cos\beta$，$R$ 为光栅基底的曲率半径。恰好使使用结构的离焦 $M_{20}$ 和子午彗差 $M_{30}$ 为零，为了使记录结构的离焦 $H_{20}$ 和子午彗差 $H_{30}$ 同时为零，可得

$$\begin{cases}\left(\dfrac{\cos\gamma}{r_C}-\dfrac{1}{R}\right)\left(\dfrac{\sin\gamma\cos^2\delta-\sin\delta\cos^2\gamma}{r_C}+\dfrac{\sin\delta(\cos\gamma-\cos\delta)}{R}\right)=0\\ \left(\dfrac{\cos\delta}{r_D}-\dfrac{1}{R}\right)\left(\dfrac{\sin\gamma\cos^2\delta-\sin\delta\cos^2\gamma}{r_D}+\dfrac{\sin\gamma(\cos\gamma-\cos\delta)}{R}\right)=0\end{cases} \tag{3}$$

满足式(3)，有两种情况，一种是文献[13]中记录点在罗兰圆外的情况，另一种是记录点在罗兰圆上。第一种只适合记录光位于光栅法线同侧的情况，若法线异侧时，记录臂长间异号，制作过程中需要通过第二代曝光光路实现，不仅增加制作难度，而且会引入更多的杂散光。根据实际情况，该结构适合制作的光栅刻线密度较低，无法达到高分辨率的需求。因此，对于高分辨率光栅，可以选择记录点在罗兰圆上，在消除离焦 $F_{20}$ 和 $F_{30}$ 的情况下，尽量在使用波段范围内减小像散 $F_{02}$ 和弧矢彗差 $F_{12}$[15]，达到提高光通量的目的。

$$RF_{02}=\frac{\sin^2\alpha}{\cos\alpha}+\frac{\sin^2\beta}{\cos\beta}+\left(\frac{m\lambda}{\lambda_0}\right)\left(\frac{\sin^2\gamma}{\cos\gamma}-\frac{\sin^2\delta}{\cos\delta}\right) \tag{4}$$

$$R^2F_{12}=\frac{\sin\alpha}{\cos^2\alpha}+\frac{\sin\beta}{\cos^2\beta}+\left(\frac{m\lambda}{\lambda_0}\right)\left(\frac{\sin\gamma}{\cos^2\gamma}-\frac{\sin\delta}{\cos^2\delta}\right) \tag{5}$$

从文献可知[10-15]，在全波段完全校正像散和弧矢彗差是不现实的，因此建立优化目标函数 $I$，使全波段内像散和弧矢彗差项最小。

$$I=(RF_{02})^2+\mu(R^2F_{12})^2 \tag{6}$$

其中，$\mu$ 为不同像差间的权重。通过非线性局部寻优算法，优化得到消像散型罗兰光栅的记录参数。

## 2　像差权重

影响罗兰光栅弧矢方向展宽的像差，主要是像散和弧矢彗差。最大限度的增加光谱仪器光通量，减小光斑弧矢方向的展宽就显得尤为必要。在设计中发现，不同的阶数像差项对光谱成像的结果影响不同，但都遵循像差阶数越高对光栅成像影响越小的的规律，因此选择合适像差的权重，对优化结果的影响也很大。根据全息光栅像差和成像展宽的关系，得到权重的取值范围。弧矢方向的展宽和像差间的关系为[19-20]

$$\delta z=(r_B-y\sin\beta)\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}z} \tag{7}$$

通过式(7)和式(1)，得到像散 $F_{02}$ 和 $F_{12}$ 对光栅成像在弧矢方向的展宽影响

$$\delta z_{02}=(r_B-y\sin\beta)zF_{02} \tag{8}$$

$$\delta z_{12}=(r_B-y\sin\beta)yzF_{12} \tag{9}$$

将式(8)和式(9)相比较，得

$$\mu\sim\frac{\delta z_{02}}{\delta z_{12}}=\frac{R(RF_{02})}{y(R^2F_{12})}\approx\frac{R}{y} \tag{10}$$

所有像差系数 $F_{ij}$ 乘以近似量基底曲率半径 $R$ 得到的结果，都处于同数量级。从式(10)中可以发现，$F_{02}$ 和 $F_{12}$ 对成像弧矢方向展宽的影响比例为，基底曲率半径比光栅口径。一般情况下，光栅口径都小于基底曲率半径，因此，应该加大对光栅像散像差的优化权重。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

## 3 设计结果与讨论

下面通过数值分析获得的优化结果。以一块真空紫外罗兰光栅的设计为例，表 1 是罗兰光栅的使用参数，$\lambda$ 表示光栅的使用波段，$d$ 表示光栅刻线密度，$H$ 和 $L$ 分别表示光栅的高度和长度。

表 1 罗兰光栅使用参数

Table 1 The utilization parameters of Rowland grating

| $\lambda$/nm | $d$/(gr·mm$^{-1}$) | $R$/mm | $\lambda_0$/nm | $\alpha$/(°) | $H\times L$/mm$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 110～200 | 3 000 | 1 659.287 6 | 441.6 | 19.831 3 | 200×200 |

通过全波段弧矢像差校正得到的记录参数如表 2，权重 $\mu=0.12$。

表 2 弧矢方向像差校正罗兰光栅记录参数

Table 2 Sagittal reduce-aberration parameters Rowland grating

| $R_C$/mm | $\gamma$/(°) | $R_D$/mm | $\delta$/(°) | $\lambda$/nm |
|---|---|---|---|---|
| 1407.980 6 | −31.946 2 | 1 407.980 6 | 45.249 3 | 413.1 |

传统罗兰光栅是在基底表面形成平行等间距直刻槽的凹面光栅，由于其较大的像散及弧矢彗差，已经被全息光栅所取代，通过该方法制作的罗兰光栅，对像散和弧矢彗差具有一定校正作用[6]。和传统的罗兰光栅进行比较，可以说明全波段像散优化的优势。传统全息罗兰光栅为了达到提高光通量的目的，一般选择+1 级衍射光束沿光栅法线方向出射，此时光栅在整个波段内像散最小，对应光栅的入射角 $\alpha=28.685\,4°$，记录角度为 $\gamma=-\delta=38.290\,6°$，记录臂长为 $r_C=r_D=1\,377.412\,6$ mm，记录波长 $\lambda_0=413.1$ nm。

图 2(a)是相同刻线密度、曲率半径的传统光栅(MG)和像散校正全息光栅(HG)的像差曲线；图 2(b)是像面展宽曲线。由图 2(a)可以发现：①传统光栅像散 $RF_{02}$ 明显大于像散校正光栅，像散校正全息光栅的像散在全波段内几乎被消除，且在波长 135.8 和 191.2 nm 处被完全消除；②传统光栅弧矢彗差 $R^2F_{12}$ 较像散校正光栅绝对值略小，主要是因为在优化过程中，像差权重的引入，导致弧矢彗差有所放大。由图 2(b)可知 ①中像散校正全息光栅将弧矢方向的展宽 $\delta z$ 在全波段内压缩到了 6 mm 内，而传统光栅的展宽都在 50 mm 以上，从局部放大的图中发现，像散校正全息光栅像面子午方向的展宽 $\delta y$ 略有增加(<1 mm)，但相对于光栅能量利用率的大幅度提高，光栅分辨力的略微下降，是可接受的水平；②像散校正全息光栅在弧矢方向的展宽在波长 135.5 和 191.6 nm 处有极小值，和(a)中像散项 $RF_{02}$ 完全校正对应的波长位置基本保持一致，说明完全校正像散对光栅弧矢方向的展宽有很重要的影响。③像散校正全息光栅相比传统罗兰光栅在像面子午方向的展宽更大，根据文献[5]，主要是由于弧矢彗差 $R^2F_{12}$ 增大对子午方向展宽的影响。

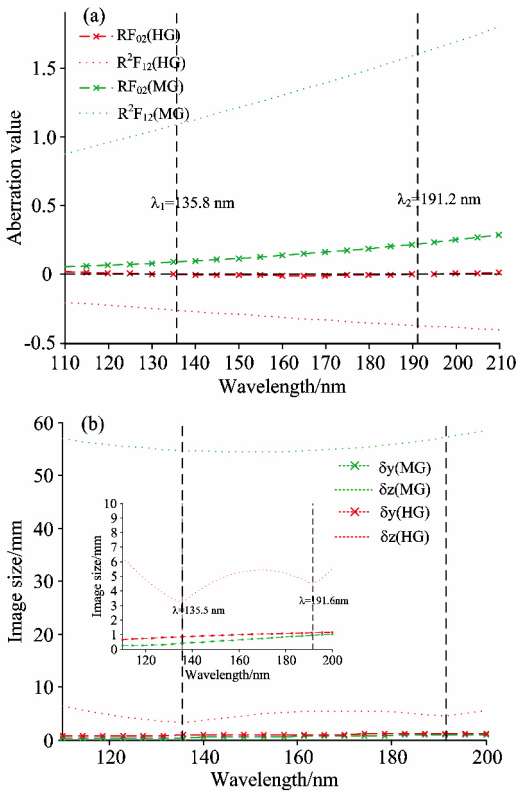


图 2 (a)相同刻线密度、曲率半径的传统光栅(MG)和像散校正全息光栅(HG)像差曲线及(b)像面展宽曲线

Fig 2 The aberration curves (a) and image broaden curves (b) of the traditional grating (MG) and astigmatism correction holographic grating (HG) with the same density and radius of curvature

比较相同刻线密度、曲率半径的传统光栅(MG)和像散校正全息光栅(HG)在波长 120，150 和 190 nm 处点列图及归一化能量分布曲线。图 3 为双纵轴坐标系，左侧纵坐标表示点列图的尺寸，右侧纵坐标表示归一化能量轴。从点列图中可知，传统光栅存在较大的像散，像高在 25 mm 以上，经过像散校正的罗兰光栅能够较好的压缩像高，像高均小于 2 mm，提高能量的利用率，但像散校正罗兰光栅存在较大彗差，光谱像会存在彗尾，影响光谱仪器的信噪比，若在保证分辨本领的情况下，更好的校正彗差，就需要引入更多的反射镜，改变使用结构，例如 Wadsworth 罗兰光栅光谱仪[17]等。从能量曲线上，两者有同数量级的半高宽，即有同数量级分辨率。

根据光线追迹的结果，可得任意波长处的光谱半高宽度，根据理论计算，画出光谱半高宽计算分辨率曲线，如图 4 所示。从图中发现，相同刻线密度、曲率半径的罗兰光栅，传统罗兰光栅的分辨率小于 0.007 6 nm，像散校正后的罗兰光栅分辨率小于 0.006 6 nm；通过像散校正优化设计，在整个使用波段内，像散校正罗兰光栅的分辨率略高于传统的光栅，可能是由于校正像散后，光斑能量更加集中，一定程度上缩小了谱像半高宽，提高了分辨率，总体上，像散校正全息光栅和传统光栅有同一数量级的分辨率。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

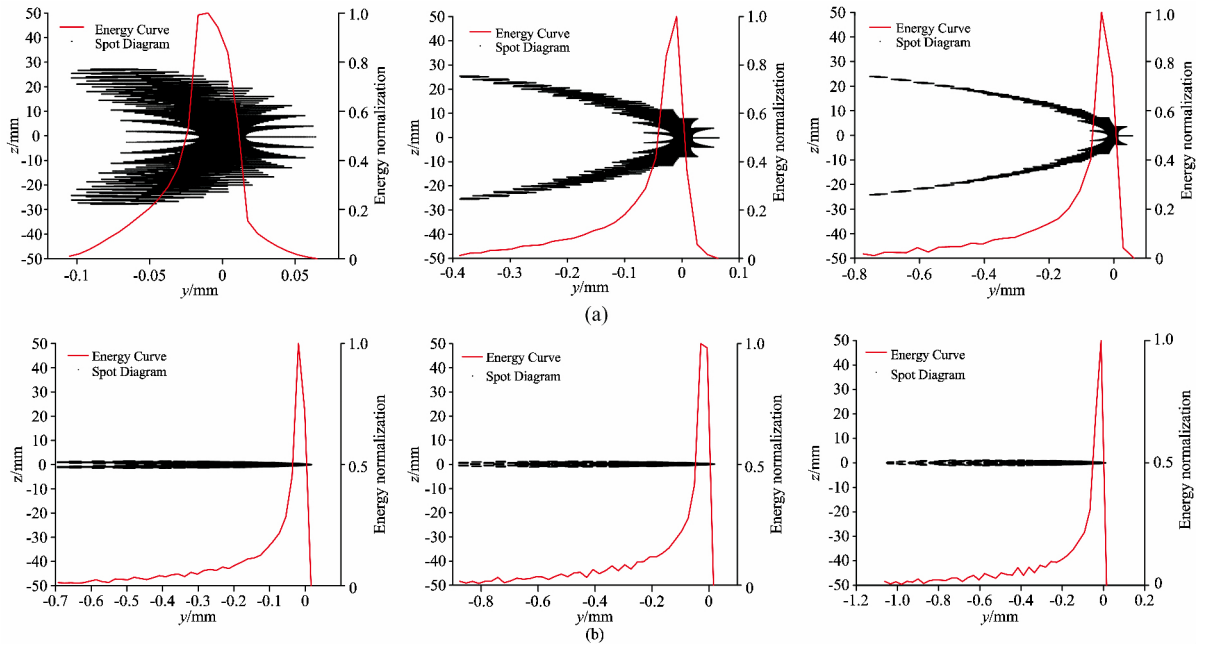


**图 3　传统光栅(MG)(a)和像散校正全息光栅(HG)(b)在波长 120，150 和 190 nm 处点列图及对应归一化能量分布曲线**

**Fig. 3　The spot-diagram and corresponding normalized energy distribution curve of the traditional grating (MG) (a) and astigmatism correction holographic grating (HG) (b) at the wavelength of 120, 150 and 190 nm**

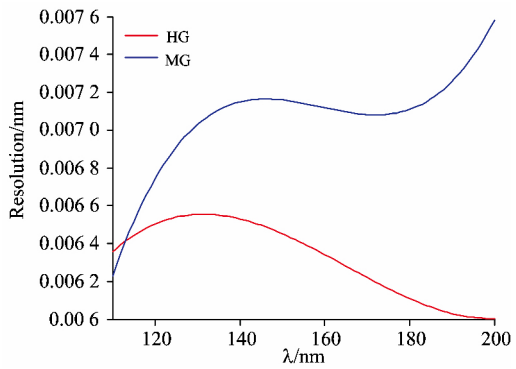


**图 4　传统光栅(MG)和像散校正全息光栅(HG)在整个波段内的分辨率变化曲线**

**Fig. 4　The resolution curve of the traditional grating (MG) and astigmatism correction holographic grating (HG) over the whole waveband**

## 4　结　论

为了校正紫外高分辨率罗兰光栅的像散对光谱像高展宽的影响，给出了在罗兰圆上使用球面波非对称曝光设计思路。通过分析得到如下结论：(1)对紫外高分辨率罗兰光栅多种结构参数局限性的讨论，确定运用在罗兰圆上球面波非对称的曝光方式，能够得到在两个波长处像散被完全消除的优化结果，降低了制作光栅的复杂程度；(2)从像面展宽公式可知，像散对像高的影响较弧矢彗差大近一个数量级，确定了优化目标函数的像差权重系数；(3)从像差系数的分析可知，像散系数是影响像高的主要因素，像散系数的零点对应光谱像高的极小值；(4)对比分析了传统光栅和像散校正型罗兰光栅的成像特性，说明像散校正型罗兰光栅能在保证分辨率的情况下，显著地降低光谱像高，提高光谱仪的光通量，较传统罗兰光栅有较好的改善。

## References

[1] WU Guo-an(吴国安). Spectral Instrument Design(光谱仪器设计). Beijing: Science Press(北京：科学出版社), 1978. 157.

[2] SHEN Wei-min(沈为民). Laser Journal(激光杂志), 1998, 19(5): 25.

[3] Loewen E G, Popov E. Diffraction Gratings and Applications. New York: Marcel Dekker, 1997. 9.

[4] WU Na, TAN Xin, YU Hai-li, et al(吴　娜，谭　鑫，于海利，等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2015, 23(7): 1978.

[5] JIANG Yan-xiu, Bayinhexige, YANG Shuo, et al(姜岩秀，巴音贺希格，杨　硕，等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(3): 857.

[6] KONG Peng, Bayinhexige, LI Wen-hao, et al(孔　鹏，巴音贺希格，李文昊，等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2011, 40(6):

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

843.
[7] Stavdas A, Midwinter J E, Bayvel P, et al. J. Mod. Opt., 1995, 42(9): 1863.
[8] Namioka T. J. Opt. Soc. Am., 1959, 49(5): 446.
[9] Namioka T. J. Opt. Soc. Am., 1959, 49(5): 460.
[10] Chrisp Michael P. Applied Optics, 1983, 22(10): 1508.
[11] Noda H, NamiokaT, Seya M. J. Opt. Soc. Am., 1974, 64(8): 1031.
[12] Brown B J, Wilson I J. Optica Acta, 1981, 28(12): 1601.
[13] Grange R. Appl. Opt., 1993, 32(25): 4875.
[14] Churin E G, Bayvel P, Stavdas A, et al. Opt. Lett., 1996, 21(14): 1084.
[15] KONG Peng, Bayinhexige, LI Wen-hao, et al(孔 鹏, 巴音贺希格, 李文昊, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2011, 38(4): 0409003.
[16] XUE Qing-sheng, CAO Dian-sheng, YU Xiang-yang(薛庆生, 曹佃生, 于向阳). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2014, 41(1): 232.
[17] Vallerga J V, McPhate J B, Martin A P, et al. Proc SPIE, 2001, 4498: 141.
[18] YU Lei, LIN Guan-yu, YU Xiang-yang(于 磊, 林冠宇, 于向阳). Acta Optica Sinica(光学学报), 2013, 33(1): 0122001.
[19] Chrisp Michael P. Applied Optics, 1983, 22(10): 1508.
[20] McKinney Wayne R, Palmer Christoper. Applied Optics, 1987, 26(15): 3108.

# Design of Ultraviolet High-Resolution Astigmatic Correction Rowland Holographic Grating

ZHAO Xu-long[1,2], Bayanheshig[1*], LI Wen-hao[1], JIANG Yan-xiu[1], WU Na[1], ZHANG Tong[1]
1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** To correct astigmatism of UV high-resolution Rowland grating for influencing the image height broaden, a train of thought is proposed, which is based on an asymmetric exposure ofthe spherical wave at the Rowland circle. First of all, applying Rowland grating's aberration expressions derive the defocus and meridian coma full corrected equations. From these equations, a variety of limitations of Rowland grating record structure is discussed, which proves to be a suitable method for the optimization of UV high-resolution Rowland grating. Then, by the vertical ray deviation's expression in the image plane, the paper refer to the astigmatism and sagittal coma as the principal factor to spectrum image-height, which is allocated the weight of aberration coefficients distribution. Taking advantage of this optimization thought, the waveband 110～200 nm, UV high-resolution Rowland grating is design. Meanwhile a series of contrastive analysis for the traditional grating and astigmatism correction Rowland grating, such as the variation tendency of aberration coefficients and spectrum image-height, image structure and spectral resolution. The results indicate, that in the same order of the spectral resolution, astigmatism correction Rowland grating spectral' simage-height isreduced by 25 to 1.5 mm, spectrum energy is more concentrated.

**Keywords** Rowlandgratings; Astigmatism correction; Design method of gratings

(Received Jun. 8, 2016; accepted Dec. 16, 2016)

* Corresponding author

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net