

# 二维消像差平面场型凹面光栅的 设计与成像分析\*

赵春华\* \* 朱祖华 陈抗生

杨 易

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027) (中国科学院上海冶金所, 上海 200050)

**摘 要** 给出了二维消像差平面场型凹面光栅的一般设计方法, 推导了三点消像差光栅的成像条件, 分析了平面场型光栅的成像质量与色散、分辨率及光栅宽度的关系。

**关键词** 凹面光栅, 无像差点, 像差。

## 1 引 言

近年来, 罗兰圆型二维集成凹面光栅因其色散和会聚功能而在波分复用器件的分波器中得到应用<sup>[1]</sup>, 但罗兰圆光栅的聚焦线在圆上, 且存在像差, 为克服这些缺点, 出现了聚集线为直线的平面场(flat field)型光栅。平面场型光栅可以利用无像差点(stigmatic point)来构造<sup>[2]</sup>, 本文给出了具有无像差点的平面场光栅的一般设计方法, 该方法适用于任意形状的二维凹面光栅。

## 2 具有无像差点的凹面光栅的设计

假设光栅是两维的且形状不受限制, 如图 1 所示, 波长为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  的光从  $q_0$  点入射, 经光栅衍射后分别在  $q_1$ 、 $q_2$  点无像差成像, 级次为  $m$ ,  $O$  为光栅的顶点(第零个槽面的中点),  $P(k)$  为光栅上第  $k$  个槽面的中点。根据光栅成像的费马原理, 应有光程

$$F = |q_0P(k)| + |q_iP(k)| - (|q_0O| + |q_iO|) - km\lambda_i = 0, \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

一般地, 对于成像线上无像差点以外的其它点  $q$ ,  $F$  不为 0, 其值即为光栅的像差  $\Delta$ :

$$\Delta = |q_0P(k)| + |qP(k)| - (|q_0O| + |qO|) - km\lambda \quad (2)$$

(1) 式的几何意义为  $P(K)$  在以  $q_0$ 、 $q_i$  为焦点, 以  $|q_0O| + |q_iO| + km\lambda_i$  为长轴的椭圆上, 该

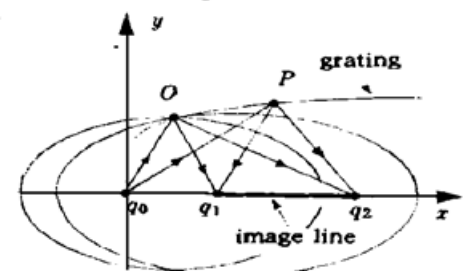


Fig. 1 Construction of gratings with stigmatic points

\* 本课题获信息技术领域“863”高科技基金资助。

\* \* 现在地址: 广东省邮电规划设计院有线通信室, 广州 510095

收稿日期: 1997-07-09; 收到修改稿日期: 1997-09-25

椭圆用极坐标表示为:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= e_i p_i / (1 - e_i \cos \theta), & (i = 1, 2) \\ e_i &= c_i / a_i, & p_i = a_i (1 - e_i^2), & a_i = o_i + km\lambda_i / 2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $c_i$  为椭圆的半焦距  $|q_0 q_i|/2$ ,  $a_i$  为半长轴,  $o_i = (|q_0 O| + |q_i O|)/2$ , 在  $q_0 q_i$  固定时,  $o_i$  由光栅顶点的位置  $O$  决定。

光栅曲线上的点  $P(k)$  必须在两个椭圆的交点上, 由  $i = 1, 2$ , 可从(3)式中解出  $\rho$  和  $\theta$ :

$$\rho = \frac{a_1^2 c_2^2 - c_1^2 c_2 - a_2^2 c_1 + c_1 c_2^2}{c_2 a_1 - a_2 c_1}, \quad \theta = \arccos \left[ \frac{e_2 p_2 - e_1 p_1}{e_1 e_2 (p_2 - p_1)} \right] \quad (4)$$

上式可视为光栅曲线在极坐标下以  $k$  为参数的方程。将  $q_1, q_2$  的连线作为光栅的成像线, 便构成了平面场型光栅, 这样, 从  $q_0$  点入射、波长介于  $\lambda_1, \lambda_2$  的光将在  $q_1, q_2$  的连线之间成像, 连线上除  $q_1, q_2$  以外的其它像点都是有像差的。

考虑增加第三个无像差点, 令光栅在第三个无像差点处自对准(否则无解), 即波长为  $\lambda_0$  的光从  $q_0$  入射, 仍在  $q_0$  点成像, 于是  $P(k)$  点还必须在以  $q_0$  为圆心、 $o_0 + km\lambda/2$  为半径的圆上(椭圆退化为圆), 该圆可表示为:

$$\rho = o_0 + km\lambda_0/2, \quad o_0 = |q_0 O| \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式, 得:

$$a_1^2 c_2 - c_1^2 c_2 - a_2^2 c_1 + c_1 c_2^2 = (o_0 + km\lambda_0/2)(c_2 a_1 - a_2 c_1) \quad (6)$$

将(3)式中  $a_i$  的值代入上式, 得到关于  $k$  的等式, 欲使其恒成立, 须使两边  $k$  的二次、一次项系数及常数项相等, 由  $k$  的二次项系数相等, 得

$$c_1/c_2 = \lambda_1(\lambda_0 - \lambda_1)/\lambda_2(\lambda_0 - \lambda_2) \quad (7)$$

这与文献[3]的结果是一致的, 而文献[3]是利用光栅方程式构造微分方程而推得的。分别令(6)式两端  $k$  的一次项系数和常数项相等, 从两式中消去  $o_0$  后得

$$A o_1^2 + B o_1 + C = 0 \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= c_2(c_2\lambda_1 + c_1\lambda_2 - c_2\lambda_0), & B &= -2c_1c_2(\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_0)o_2, \\ C &= c_1(c_1\lambda_2 + c_2\lambda_1 - c_1\lambda_0)o_2^2 + c_1c_2(c_1 - c_2)(c_2\lambda_1 - c_1\lambda_2) \end{aligned} \quad (9)$$

上式为三点消像差光栅中的  $o_1, o_2$  必须满足的关系式, 两点消像差光栅则不受此限制。文献[4]中的消像差光栅的形状被限制为球形(即二维中的圆形), 而(7)式则适用于任意形状的光栅, 容易验证文献[4]中所有的成像关系均满足(7)式。对于密集波分复用器件, 因  $\lambda_1$  非常靠近  $\lambda_2$ , (7)式的成像关系使光栅的色散接近线性。

### 3 光栅成像的数值模拟

忽略衍射损耗且只考虑每个槽面中点(即光栅曲线上的点)的衍射对像强的贡献, 光栅的点扩散函数可由下式计算,

$$u(q) = \sum_{k=-N}^N \frac{1}{|q_0 p(k)| + |q p(k)|} \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} [ |q_0 p(k)| + |q p(k)| ] \right\} \quad (10)$$

式中的  $q$  点在成像线上,  $N$  为光栅正负方向上的槽面数。光栅的衍射光强应为:

$$I = uu^* \quad (11)$$

假设光栅参数为( $\mu\text{m}$ ):  $q_0 = 0, q_1 = 1000, q_2 = 2000$ 。光栅顶点的坐标为: (1000,

15000),  $q_1$ 、 $q_2$  点对应的波长为  $\lambda_1 = 1.50$ ,  $\lambda_2 = 1.58$ , 光栅的成像线为  $q_1q_2$ 。对于非消像差点的成像, 用介于  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  之间的  $1.54 \mu\text{m}$  的波长来计算。

图 2 给出了  $q_1 = 0$ ,  $q_2$  分别为 2000(色散为  $25 \mu\text{m}/\text{nm}$ ) 和 4000( $75 \mu\text{m}/\text{nm}$ ) 时的光栅色散曲线, 由图可见, 色散接近线性, 让入射点  $q_0$  在  $x$  轴上移动, 色散曲线变化不大。

图 3 计算了波长为  $1.54 \mu\text{m}$  的光在不同槽面数(光栅宽度)下的成像, 在槽面数为 200 时, 像的半宽较大, 当光栅分别为 350、400、500 个槽面时, 像的半宽接近最小值, 且变化不大, 但像的半宽以下的一边随光栅宽度的增大振荡得越来越严重。在槽面数为 600 时, 像的半宽重新增大, 且一边出现剧烈的振荡。这是由于光栅像差随光栅宽度的增大而增加。在宽度为 400 个槽面时, 光栅边缘的像差接近  $\lambda/4$ , 接近瑞利判据下的最佳光栅宽度。

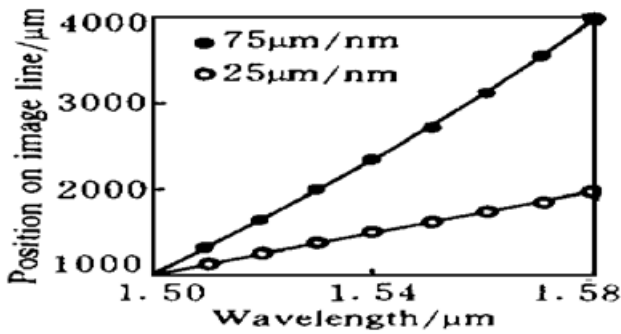


Fig. 2 Dispersion on the image line

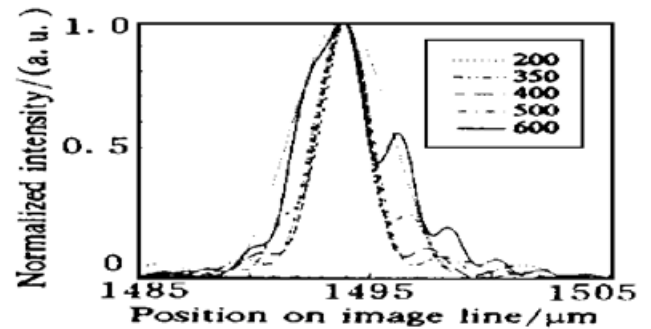


Fig. 3 Image intensity distributions for the grating with different numbers of teeth

计算表明, 对于无像差点, 色散增大时, 光栅的分辨率因像的展宽而维持不变, 这与分辨率仅仅与级数和槽面数有关相一致。对于有像差的点, 光栅色散的增大还将带来像差的增加, 如图 4 所示, 当  $q_2$  分别等于 2000、4000 时, 对应的平均色散率为  $25 \mu\text{m}/\text{nm}$ 、 $75 \mu\text{m}/\text{nm}$ , 色散大的情况下成像质量较差, 这是由于像差随色散增大而增大的缘故。

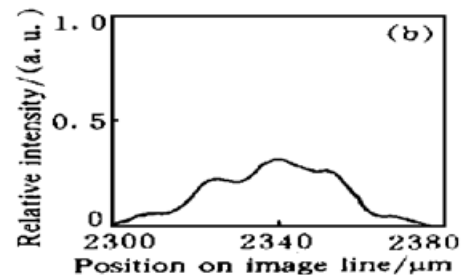
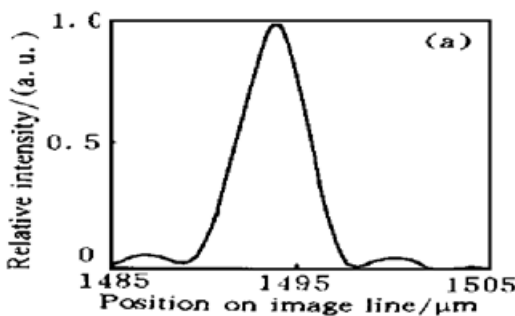


Fig. 4 Image intensity distribution for gratings with different dispersion. ( $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$ , the number of grating teeth = 240). (a)  $25 \mu\text{m}/\text{nm}$ , (b)  $75 \mu\text{m}/\text{nm}$

考虑在  $q_0$  点增加一消像差点, 其波长由(7)式算出, 图 5 给出了波长为  $1.54 \mu\text{m}$  入射光的强度分布, 同图 4(b) 相比, 成像质量有明显的改善(计算中采用与图 4(b) 相同的色散和光栅宽度), 利用(2)式计算出在槽面数为 240 时, 三点和二点消像差光栅的光栅边缘像差分别为  $0.2 \mu\text{m}$  和  $0.9 \mu\text{m}$ 。可见三点消像差光栅可明显减小非消像差点的像差。

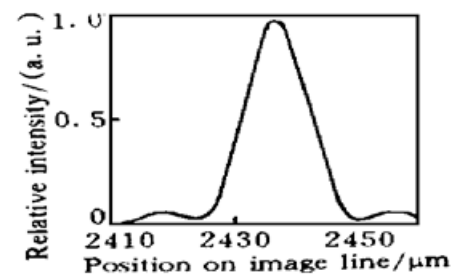


Fig. 5 Improvement of the image quality for gratings with three stigmatic points

结 论 本文给出了具有两个与三个消(无)像差点的平面场光栅的一般设计方法, 分析了影响成像质量的因素, 以期对

光栅型分波器(demultiplexer)的优化设计提供一些依据。

### 参 考 文 献

- [1] J. B. D. Soole, A. Scherer *et al.*, Monolithic InP/InGaAsP/InP grating spectrometer for the 1.48  $\mu\text{m}$  ~ 1.56  $\mu\text{m}$  wavelength range. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(18) : 1949~ 1951
- [2] R. Marz, C. Cremer, On the theory of Planar spectrographs. *J. Lightwave Technol. Lett.*, 1992, **10** (12) : 2017~ 2022
- [3] R. Guthier, S. Polze, The construction of stigmatic points for concave gratings. *Opt. Acta*, 1982, **29** (5) : 659~ 665
- [4] T. Namioka, M. Seva, H. Noda, Design and performance of holographic concave gratings. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1976, **15**(7) : 1181~ 1197

## Design and Imaging Analysis of Integrated Flat-Field Grating with Stigmatic Points

Zhao Chunhua    Zhu Zuhua    Chen Kangsheng

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Yang Yi

(Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

(Received 9 July 1997; revised 25 September 1997)

**Abstract** A general method for the design of a two-dimensional concave grating with stigmatic points is presented. The construction of gratings with three stigmatic points is given. The image quality versus the dispersion and the grating width are analyzed in detail.

**Key words** concave grating, stigmatic point, aberration.