

# 凹面光栅型波长解复用器的标量波动分析\*

赵春华\* \* 朱祖华 陈抗生

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

杨 易

(中国科学院上海冶金所集成光学室, 上海 200233)

**摘 要** 利用标量波动衍射理论, 通过对光栅槽面的数值积分, 计算了罗兰圆型集成二维凹面光栅像点的光强分布。给出了光线追迹法难以得到的光栅槽面沿光栅圆不同方位刻划所引起的成像点对于光栅方程式计算位置的偏离; 在对色散和分辨力的分析上, 获得了与光线追迹法很好的一致性; 分析了光栅的槽面数、光源的模场宽度以及因工艺产生的槽面圆角对光栅成像的影响; 最后给出了光栅的波像差和光线像差的计算。

**关键词** 罗兰圆, 凹面光栅, 高斯束。

## 1 引 言

在波分复用(WDM)光纤通信系统中, 凹面光栅因其同时具有色散和会聚功能而受到重视, 一些集成的波长解复用器大多采用刻划在平板波导上的凹面光栅作为分光元件, 这些解复用器结构紧凑, 适用于多通道的波长分离。刻划在平板波导上的二维凹面光栅, 由于其光束的传播限制在平板波导平面内, 因而没有三维体形光栅所特有的像散及弧矢方向的彗差。文献[1]、文献[2]分别报道了基于 InP 和 GaAs 衬底的波长分离器, 分离器中的凹面光栅采用罗兰圆结构, 利用波导阵列对光进行输入输出耦合, 该结构可以实现与探测器的单片集成<sup>[3, 4]</sup>; 为了便于同光探测器混合集成, 有的凹面光栅将光谱面设计成平面, 此即所谓的平面场型光栅<sup>[5]</sup>; 文献[6]利用光线追迹法给出了二维凹面光栅的一般设计方法; 文献[7]对光栅进行了严格的电磁理论分析, 但其分析仍限于平面光栅。目前, 有关凹面光栅的详尽的电磁分析还未见报道。文献[8]推导了一种用标量波动法分析的解析式, 但其推导中引入了较多的近似, 难以给出精确的结果。本文利用标量波动理论分析二维罗兰圆型凹面光栅光谱面上的光强分布, 计算中采用在二维平面中传播的高斯束来模拟入射光在平板波导中的衍射, 直接采用数值积分计算光栅槽面对高斯束的衍射, 通过计算, 分析了影响凹面光栅成像位置和成像质量的各种因素, 为光栅的优化设计提供了依据。只要不涉及能量在各衍射级次间的分

\* 国家科委 863 高科技项目。

\* \* 浙江大学信电系物理电子学与光电子学专业博士生, 现在广东省邮电规划设计院工作。

收稿日期: 1997-01-30; 收到修改稿日期: 1997-04-24

配, 标量波动理论的分析还是相当精确的。

## 2 基本原理

集成波长分离器的结构如图 1(a) 所示, 由输入/输出波导、平板波导和凹面光栅组成。光从输入波导射入, 在平板波导中散开并传播至凹面光栅, 经凹面光栅衍射后由输出波导将不同波长的光从不同的波导输出。罗兰圆型的光栅结构如下: 光栅采用半径为  $R$  的圆型结构, 光源和光谱像均位于与光栅圆相切于光栅顶点、半径等于  $R/2$  的罗兰圆上, 光栅的槽面在光栅顶点处的切线上的投影为常数, 此常数即为光栅周期。

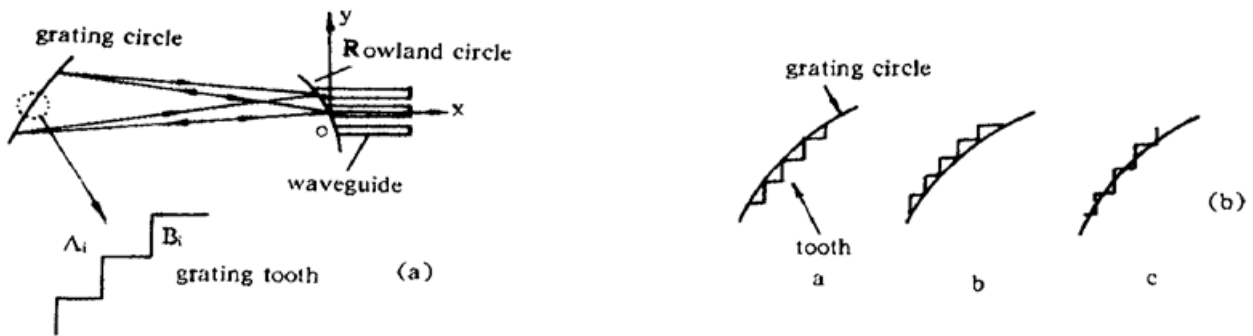


Fig. 1 (a) Diagram of a Rowland-type integrated concave grating, (b) Diagram of three types of groove etching method

本文的分析基于文献[1]中的结构参数, 光栅周期为  $5.1 \mu\text{m}$ , 光栅圆半径为  $18 \text{ mm}$ , 光栅衍射级次为 18, 波导为 InP/InGaAsP/InP 的双异质结结构, 四元层的带隙波长为  $1.0 \mu\text{m}$ 。

对光栅的成像分析基于如下的假定: 只考虑二维结构的成像, 即光束只在平板波导平面内传播, 不考虑刻槽深度对成像的影响; 光栅槽面为光滑的全反射镜面, 所有槽面均受到入射光的照射, 光束对槽面的入射不受邻近槽面的遮挡; 光栅槽面相互平行, 且槽形为直角。由于闪耀波长的选取只影响不同波长间的相对强度, 不影响光谱的位置以及分辨力和线色散率等参数, 为简化计算, 取闪耀波长为  $1.5 \mu\text{m}$ 。(文献[1]中为  $1.51 \mu\text{m}$ ) 这样, 在图 1(a) 所示的坐标系下, 凹面光栅工作槽面与坐标轴平行。光栅为罗兰圆中伊格尔(Eagle)型结构, 以利特罗(Littrow)自对准方式工作, 不同波长的光从放置在  $x$  轴上的输入波导射入, 经光栅衍射后从不同的波导输出。由于在波长  $1.5 \mu\text{m}$  处自对准(入射角精确地等于反射角), 因此  $1.5 \mu\text{m}$  的光在输入波导口(0点)处成像。整个成像分析基于  $1.5 \mu\text{m}$  的工作波长, 其它波长在其对应位置的成像分析与  $1.5 \mu\text{m}$  波长相类似。

下面采用标量波动理论计算光栅光谱像的强度分布。将输入波导(即 0 点)处的光场分布由一模场半径为  $w_0$  的高斯光斑来模拟, 高斯光斑在平板波导中的菲涅耳衍射由一高斯束描述<sup>[9]</sup>:

$$u(x, y) = A_0 \frac{w_0}{w(x)} \exp \left[ -\frac{y^2}{w^2(x)} \right] \exp \left[ -jkx - jk \frac{y^2}{2R(x)} + j\zeta(x) \right] \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} w(x) &= w_0 [1 + (x/x_0)^2]^{1/2}, & R(x) &= x [1 + (x_0/x)^2], \\ \zeta(x) &= \tan^{-1}(x/x_0), & w_0 &= (\lambda x_0 / n\pi)^{1/2} \end{aligned}$$

式中的  $k = 2\pi n/\lambda$ ,  $n$  为波导折射率, 光源(入射光)的位置即为高斯束的束腰,  $w_0$  为束腰处的模场半径(模场半径定义为光强降为峰值的  $1/e^2(0.135)$  时的束斑半径), 高斯束经槽面衍射

后的传播仍由菲涅耳衍射描述, 故第  $i$  个槽面对光场分布的贡献为:

$$v_i(x, y) = \frac{1}{j\lambda(x - x_i)} \exp[jk(x - x_i)] \int_{y_i}^{y_i + D_i} u_i(x_i, \zeta) \exp\left[j\frac{k}{2(x - x_i)}(y - \zeta)^2\right] d\zeta \quad (2)$$

式中  $u_i$  由(1)式给出, 积分限中的  $y_i$  为工作槽面的端点坐标,  $D_i$  为槽面宽度; 由于槽面平行于  $y$  轴, 沿槽面的积分即为沿  $y$  轴积分;  $x_i$  为第  $i$  个槽面的横坐标。光栅槽面对光场的总贡献由各槽面贡献的叠加算出。

$$V(x, y) = \sum_i v_i(x, y) \quad (3)$$

要计算光谱线上的光场, 上式中的  $x, y$  应为光谱线上的点。若假设光谱线为  $x = g(y)$  (本计算中光谱线为罗兰圆), 则(3)式可写为:

$$V(y) = \sum_i v_i[g(y), y] \quad (4)$$

光强度分布与光场分布的关系为:

$$I(y) = V(y)V^*(y) \quad (5)$$

### 3 数值计算结果

对(5)式作数值积分, 即可计算罗兰圆(光谱面)上成像点的光强分布。要计算(5)式, 必须知道  $n$  的值,  $n$  为与 InP 层相匹配的 InGaAsP 层的折射率。它与光的工作波长和四元层的带隙波长有关。采用修正的单个有效振子法, 能量为  $E (= h\nu)$  的光子在  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  中的折射率, 可以用插值法从 GaInP 和 GaInAs 的数据所推得的特性参数而得到<sup>[10]</sup>, 近似表示为:

$$n^2 = 1 + \frac{E_d}{E_0} + \frac{E_d}{E_0^3}E^2 + \frac{\eta E^4}{\pi} \ln \frac{2E_0^2 - E_g^2 - E^2}{E_g^2 - E^2} \quad (6)$$

$$E_g = 1.35 - 0.72y + 0.12y^2, \quad y = 2.2020x / (1 + 0.0659x),$$

$$E_0 = 0.595x^2(1 - y) + 1.626xy - 1.891y + 0.524x + 3.391,$$

$$E_d = (12.36x - 12.71)y + 7.54x + 28.91, \quad \eta = \pi E_d / 2E_0^2(E_0^2 - E_g^2),$$

(6)式中  $E$  为光子能量,  $E_g$  为带隙能量。当工作波长为  $1.5 \mu\text{m}$ 、波导层带隙波长为  $1.0 \mu\text{m}$  时, 利用(6)式可计算出波导层的折射率为 3.229。

下面利用标量波动理论分析各种因素对光谱像的位置和强度的影响, 计算中光栅槽面取 300 个且对称刻划在光栅顶点的两边, 入射光模场半径取  $1 \mu\text{m}$ 。

#### 3.1 槽面刻划对光谱位置的影响

首先分析光栅槽面沿光栅圆不同方位刻划对像点位置的影响, 如图 1(b)中, a 型槽面沿

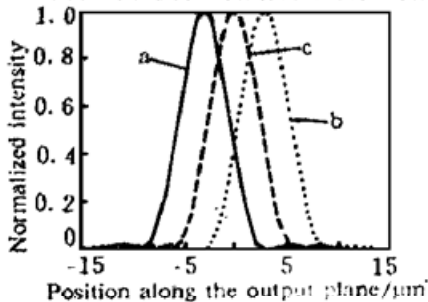


Fig. 2 Diagram of the image intensity distribution for three types of etching method

光栅圆的内缘向内刻划, b 型槽面沿光栅圆的外缘向外刻划, c 型光栅圆通过工作槽面的中点。图 2 示出了用(5)式计算的光强分布曲线, 由于计算中采用的是自对准波长  $1.5 \mu\text{m}$ , 由光栅方程式决定的光强峰值(像点位置)应在罗兰圆上的  $y = 0$  (图 1(a)中的坐标原点)处。由图 2 可见, 三种刻划方式的光强峰值并不都与光栅方程式的计算相一致, 在 a 和 b 的情形下, 分别向两边偏移约  $3 \mu\text{m}$ , 只有 c 基本与光栅方程式的计算一致。这是因为凹面光栅不同于平面光栅, 平面光栅各个槽面是完全相同的, 其工作槽面上任一点均可在其相邻的光

栅槽面上找到相应的光程差为  $m\lambda$  的点(工作在  $m$  级), 而凹面光栅的各槽面不是完全相同的, 不能象平面光栅那样相邻槽面各点光程差点对点, 如果忽略波像差, 可以认为凹面光栅相邻槽面在光栅圆上的点的光程差为  $m\lambda$ 。这些点的干涉结果是在光栅方程式预见的位置上出现第  $m$  级像点, 由于光栅方程式只适用于光栅圆上的点, 而光栅的工作槽面总是有一定的宽度, 因此工作槽面上不在光栅圆上的点的槽间相干结果就会导致罗兰圆上像强度的峰值位置偏离光栅方程式计算的峰值位置。虽然将光栅按  $c$  的方式刻划可以基本消除偏移, 但由工艺因素造成的槽面圆角化仍会造成微小的偏移, 这一结果是光线追迹法难以获得的。

### 3.2 线色散率

光栅的线色散率定义为间隔  $1\text{ nm}$  的波长在输出面( $y$  方向)上分开的距离(以  $\mu\text{m}/\text{nm}$  计)。根据光栅方程式计算出的在入射波导附近的线色散率应为<sup>[11]</sup>:

$$dy/d\lambda = Rm/nd \tag{7}$$

式中  $R$  为光栅半径,  $m$  为衍射级次,  $n$  为波导折射率,  $d$  为光栅周期。由上式计算的线色散率为  $19.6\ \mu\text{m}/\text{nm}$ (文献[1]的设计值为  $20\ \mu\text{m}/\text{nm}$ ), 为了与波动法的计算相比较, 利用(5)式计算了输入波长间隔为  $1\text{ nm}$  的三个波长  $1499\text{ nm}$ 、 $1500\text{ nm}$  和  $1501\text{ nm}$  经光栅衍射后的成像位置, 计算结果如图 3, 由图可见, 相邻波长间隔为  $1\text{ nm}$  的光, 其光谱像在波导方向( $y$  方向)上间距与上式的结果相当吻合, 这证明了波动法计算的正确性。

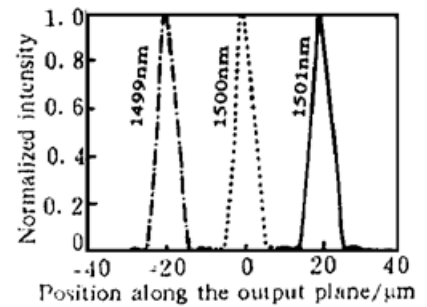


Fig. 3 Image positions for input wavelengths spaced at  $1\text{ nm}$  interval

### 3.3 光栅宽度

凹面光栅设计要确定光栅的宽度(槽面数), 其宽度的增大意味着有更多的槽面参与干涉, 会使光谱像变得尖锐, 但球差也随着光栅宽度增大而增大, 球差的增大使光栅边缘的相邻槽面光程差偏离波长的整数倍( $m\lambda$ ), 从而使得光谱像展宽, 当槽面球差的增大与槽面间的干涉作用相平衡时, 光栅便达到了其极限分辨力。由图 4 可见, 当光栅槽面数较少时, 不但谱线的峰值强度小, 而且光强度分布较平坦, 分辨力低, 随着槽面数的增多, 光强分布逐渐变强变锐, 当光栅槽面数大于 400 时, 光强分布的变化较慢, 当槽面数分别为 500、600、700 时, 光强分布的曲线几乎重合(图中只标了槽面数为 600 时的曲线), 不再变锐, 此时光栅达到其极限分辨力。根据图中曲线, 在极限分辨力时, 成像位置相距  $5\ \mu\text{m}$  的波长可以分辨(瑞利判据), 由  $20\ \mu\text{m}/\text{nm}$  的线色散率, 对应的波长分辨力为  $0.25\text{ nm}$ 。

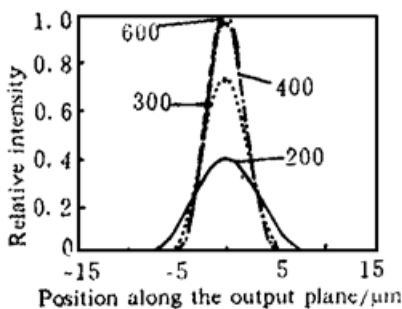


Fig. 4 Intensity distributions for different number of grooves

### 3.4 模场宽度

对于不同模场宽度的入射光, 输出像点的模场宽度是不同的。图 5 示出了归一化强度分布随入射光模场宽度的变化情况。当入射光模场半径  $w_0 = 1\ \mu\text{m}$  时, 输出光模场半径约  $4.1\ \mu\text{m}$ , 此时输出像点的强度分布曲线与系统的点扩散函数曲线[将(1)式中的高斯束用球面波替代, 即可用(5)式算出点扩散函数]几乎重合, 这说明当模场半径较小时, 输出光斑模

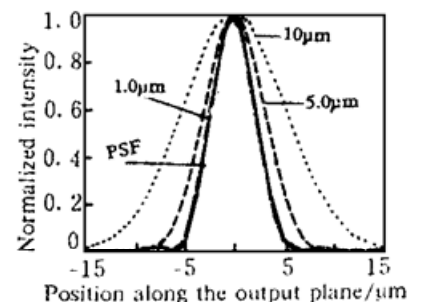


Fig. 5 Output light spot size versus input light spot size

场宽度主要受系统衍射分辨率力的影响，随着入射光模场半径的增大，像点的大小依赖于几何放大率，当入射光的  $w_0$  为  $5\ \mu\text{m}$  和  $10\ \mu\text{m}$  时，输出光的模场半径约为  $6.2\ \mu\text{m}$  和  $10.5\ \mu\text{m}$ ，其输入输出模场半径之比随输入模场半径的增大接近罗兰圆光栅的几何放大率  $1^{[6]}$ 。

### 3.5 光栅槽面圆角

在实际的光栅光刻和干法刻蚀工艺中，不可避免地会造成光栅槽面的圆角化，槽面圆角化是光栅损耗的重要来源之一，槽面圆角使得光栅的有效工作槽面变小，像点的光场变弱。输出光场的峰值强度随槽面圆角半径的变化如图 6(a) 所示。另外，如果光栅是按图 1(b) 中 c 的方式刻划，由于光栅槽面圆角的存在，使得光栅圆不再经过光栅的槽面中心，造成像点偏离光栅方程式的计算位置。图 6(b) 示出了当圆角半径为  $0.5\ \mu\text{m}$  和  $1.0\ \mu\text{m}$  时的光强分布，光强峰值出现明显的偏移，圆角半径越大，偏移越大。在实际的光栅工作过程中，还存在光栅相邻槽面的遮挡作用，槽面的遮挡一方面削弱了像点光强，另一方面也会抵消一部分像点偏移。

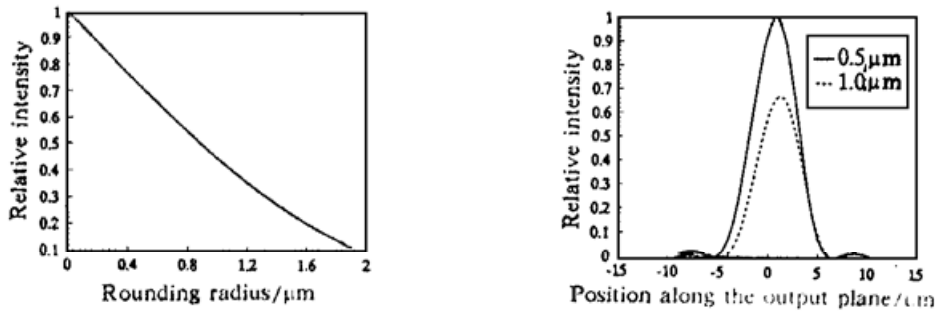


Fig. 6 (a) Image peak intensity versus groove rounding radius, (b) The deviation of image position caused by groove rounding

### 3.6 光栅的光线像差和波像差

凹面光栅在其光谱面(罗兰圆)上存在像差，可以利用在光栅圆上的槽面坐标计算出文献 [1] 中光栅的光线像差和波像差，光线像差是光源经实际的光栅所成像与理想的光栅成像点在罗兰圆上的偏差，波像差为光栅边缘与光栅顶点的实际光程差与理想光程差的偏离，波像差是产生光线像差的原因，图 7 示出了利用光线追迹法计算的光线像差和波像差随槽面的变化情况(光栅顶点处的槽面为第 0 个槽面)，利用该图，可以求得在像差允许值范围内的最大光栅宽度，像差的存在使光栅的分辨力受到限制。

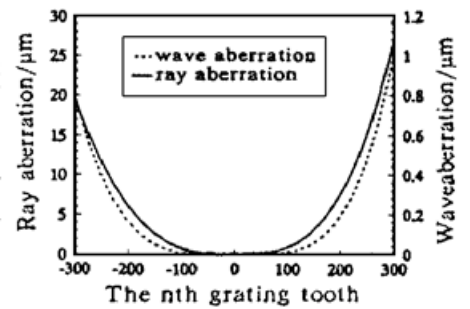


Fig. 7 The ray aberration and the wave aberration versus the groove number

**结 论** 本文用标量波动理论对二维罗兰圆型凹面光栅的成像进行了分析，计算了各种情况下的光谱像强度分布，由于波动分析考虑了整个槽面的衍射效应，因此可以获得几何光线追迹法难以得到的结果，从而为光栅的优化设计提供了更为有效的工具。

### 参 考 文 献

[1] J. B. D. Soole, A. Scherer, H. P. LeBlanc *et al.*, Monolithic InP/InGaAsP/InP grating spectrometer for the  $1.48\sim 1.56\ \mu\text{m}$  wavelength range. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(18) : 1949~ 1951

- [2] M. Fallahi, K. A. McGreer, A. Delage *et al.*, Demonstration of grating demultiplexer in GaAs/Al-GaAs suitable for integration. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(24) : 2217~ 2218
- [3] J. B. D. Soole, A. Scherer, Y. Silberberg *et al.*, Integrated grating demultiplexer and pin array for high-density wavelength division multiplexed detector at 1.5  $\mu\text{m}$ . *Electron. Lett.*, 1993, **29**(6) : 558~ 560
- [4] M. Fallahi, K. A. McGreer, A. Delage *et al.*, Grating demultiplexer integrated with MSM detector array in InGaAs/AlGaAs/GaAs for WDM. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(7) : 794~ 797
- [5] P. C. Clemens, R. Marz, A. Reichelt *et al.*, Flat-field spectrograph in SiO<sub>2</sub>/Si. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(8) : 886~ 887
- [6] Reihard Marz, Cornelius Cremer, On the theory of planar spectrographs. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(12) : 2017~ 2022
- [7] R. Petit, *Electromagnetic Theory of Gratings*. New York, Springer, 1980 : 63~ 121
- [8] K. A. McGreer, Diffraction from concave gratings in planar waveguides. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(3) : 324~ 326
- [9] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, *Fundamentals of Photonics*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1991 : 83
- [10] M. Erman, Ph. Jarry, R. Gamonal *et al.*, Monolithic integration of a GaInAs p-i-n photodiode and an optical waveguide: modeling and realization using chloride vapor phase epitaxy. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(3) : 399~ 411
- [11] K. R. Poguntke, J. B. D. Soole, Design of a multistripe array grating integrated cavity (magic) laser. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(12) : 2191~ 2200

## Scalar Wave Analysis of a Wavelength Demultiplexer Based on Concave Gratings

Zhao Chunhua      Zhu Zuhua      Chen Kangsheng

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

Yang Yi

(Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200233)

(Received 30 January 1997; revised 24 April 1997)

**Abstract** The characteristic of Rowland circle concave gratings is analyzed with the scalar wave theory. The deviation of the image position from that predicted by the grating equation is calculated. This result can't be obtained by the geometric ray tracing method. The calculated result of the dispersion and resolution consists with that calculated with the geometric ray tracing method. The image quality affected by the groove number, the mode size and the groove rounding is analyzed in details. The wave aberration and the ray aberration are also given.

**Key words** Rowland circle, concave grating, Gaussian beam.