

衍射微透镜的色散特性分析

杜晓晴^{1,2}, 徐 灿²

(1. 教育部光电技术及系统重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆大学微系统研究中心, 重庆 400030)

摘 要:衍射微透镜具有会聚和色散功能,且体积小、易于集成和阵列化,是实现光谱成像仪和微型光谱仪的一种新型技术。光谱分辨率是评价衍射微透镜分光特性的主要指标,根据标量衍射理论,给出了多相位菲涅尔透镜的设计公式,并利用球面波的传输理论推导了微透镜主焦距与光谱分辨率之间的函数关系,得出在入射波长和位相阶数一定的情况下,光谱分辨率与中心焦距之间呈反比;理论推导的结果与已发表的实验结果一致。

关键词:衍射微透镜;菲涅尔透镜;色散;光谱分辨率

中图分类号:TN256 **文献标识码:**A

Analysis of Dispersion Characteristic of Diffractive Micro Lens

DU Xiao-qing^{1,2}, XU Can²

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Microsystem Research Center, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Diffractive micro lens can be used as a light spitting element in imaging spectrometer and micro spectrometer for its function of image and dispersion and its character of small volume, easy to integrate and array-with. The formula group for the design of multi-phase micro Fresnel lens according to scalar diffraction theory was given and the transmission theory of spherical wave were used to deduce the relation of focal distance of the micro lens with spectrum resolution. According to the relation spectrum resolution is inverse proportional to focal distance given a certain incident wavelength and phase number, and the theoretic formula is consistent with reported experimental result.

Key words: diffractive micro lens; fresnel lens; dispersion; spectrum resolution

1 引言

透镜是构成光路系统的重要而又基本的光学元件,有会聚、发散、准直、成像等作用。通过微纳加工技术以及二元光学,可以实现透镜的微型化、阵列化和集成化^[1],适应光纤通信、信息处理、航空航天、生物医学等对光学系统微型化的要求。

衍射微透镜是二元光学透镜,根据衍射原理,通过改变入射光波的位相,一般为多阶相位,实现会聚功能。衍射微透镜除了具有会聚功能外,还能实现分光。美国光量子中心罗姆实验室的 Denise Lyons 首先在 1995 年 4 月国际光学工程学会上提出了利用微透镜色散特性设计成像光谱仪^[2]。微透镜将入射光线沿光轴方向进行色散,不同波长的光会聚于光轴上不同的位置,因此可将透镜沿光轴方向扫

描获得不同波段的光谱图像。与传统的成像光谱仪相比,二元光学微透镜同时具有会聚和色散的功能,因此整个系统光学元件较少,光学结构简单,且分辨率高,使其作为分光元件在光谱仪、光纤通信中的波分复用中具有很大的应用潜力。

虽然衍射微透镜的色散特性逐渐得到应用,但是其色散特性并没有一个比较系统的定量讨论与描述,因为目前微透镜的大多数应用集中在集成光学的互连中,主要应用的是其会聚特性。本文将对衍

基金项目:重庆市自然科学基金(No. CSTC - 2006BB2151)资助。

作者简介:杜晓晴(1978 -),女,副教授,博士,主要研究方向为光学探测技术。E-mail:duxq@cqu.edu.cn

收稿日期:2008-06-25

射微透镜的色散特性进行分析,评价微透镜的光谱分辨率。

2 衍射式微透镜的分光原理

衍射微透镜的结构基于菲涅耳半波带板(Fresnel zone plate, FZP)的思想实现,如图1(a)所示^[3],因此衍射微透镜也称作菲涅耳透镜。其中, FZP 的半波带划分满足:

$$\begin{aligned} d_1 &= d_0 + \frac{\lambda}{2} \\ d_2 &= d_0 + \lambda \\ &\vdots \\ d_N &= d_0 + \frac{N\lambda}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, d_0 值称为波带板的焦距 f 。当用波长为 λ 的平面波正入射照明一个菲涅耳波带板时,距离 d_0 的轴上点将成为一个亮点,该亮点成为菲涅耳波带板的主焦点,有:

$$f = d_0 = r_1^2 / \lambda \quad (2)$$

其中, r_1 为波带板第一个环带半径。

如果从 P 点对圆孔光栏可做 1000 个半波带,挡住全部偶数半波带后, P 点的复振幅为 $E_1 + E_3 + E_5 + \dots + E_{999} \approx 500E_1$ 。

因此, FZP 轴上点 P 的光强是每个通光半波带的复振幅同相加,于是 P 点的振幅和辐光强便会大幅度增加,形成亮点,菲涅耳波带板像透镜一样,能够将平面波会聚到轴上主焦点 P 。而且,衍射作用产生的有效焦距同波长成反比,因此可以通过改变焦距来获得不同的单色光,实现分光。

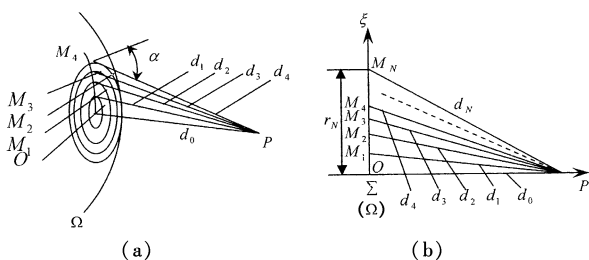


图1 菲涅耳半波带

为了便于加工,通常将上述波带板制作成具有浮雕表面的相位结构,浮雕的厚度在波长量级,即采用位相补偿的办法,通过减小或增加奇数波带的厚度,使光通过偶数波带时相对于奇数波带再产生 π 的相位变化,如图2(a)所示,这样得到的透镜称为菲涅耳透镜^[4]。在实际应用中,为了提高衍射效率,可将菲涅耳透镜的每个波带再分为多个同心圆环,制成多台阶的位相型结构,形成多台阶的位相型菲涅耳透镜,如图2(b)所示。

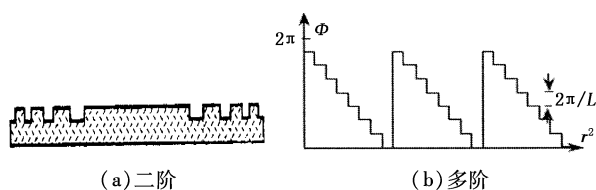


图2 位相型菲涅耳透镜示意图

由菲涅耳衍射积分可以得到第 n 级衍射光的焦点公式:

$$f_n = -r_1^2 / (2\lambda n) \quad n = jL - 1 \quad (j \in \mathbb{N}) \quad (3)$$

其中, L 为台阶数, -1 级衍射波会聚于菲涅耳透镜的主焦点上,主焦距为:

$$f = r_1^2 / 2\lambda \quad (4)$$

3 衍射式微透镜的分光特性

由公式(2)和公式(4)可以得出,如果透镜的设计波长为 λ_0 ,称为中心入射波长,对应有焦距 f_0 ,称为主焦距,则其他入射波长的焦距与中心波长的焦距之间的关系:

$$f = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda} \quad (5)$$

由公式(5)可知,较小的入射光波波长对应较大的焦距,反之亦然。示意图如图3所示。

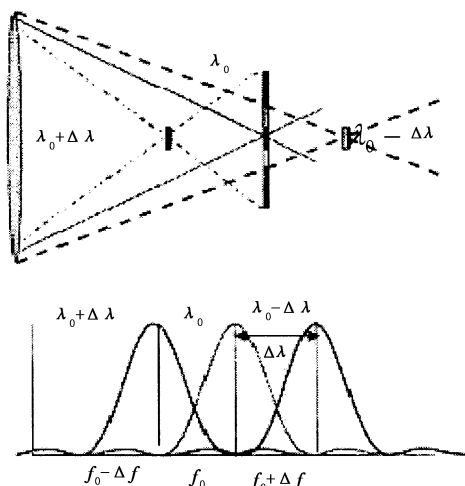


图3 宽带光入射下菲涅耳透镜沿光轴方向的光场分布示意图

在分光应用中,为了保证中心焦点处光的单色性,必须要尽量减小中心波长周围光谱的影响,即要求中心波长两侧的光的会聚焦点要远离中心焦距。如果采用瑞利判据作为分辨标准,也就是指一条光的中央极大与近旁另一条光线的第一极小值重合,认为此时可以恰好分辨这两条光线,如图3所示,此时 $\Delta\lambda$ 为菲涅耳透镜的光谱分辨率。如果令 $\lambda = \lambda_0 \pm \Delta\lambda$,代入公式(5),可求得:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0 |f_0 - f|}{f} = \frac{\lambda_0 \cdot \Delta f}{f} \quad (6)$$

可以看到,在给定的入射波长 λ_0 下,要获得较

小的 $\Delta\lambda$, 要求焦距要大。同时, Δf 必须满足一定条件, 使得 $(\lambda_0 + \Delta\lambda)$ 和 $(\lambda_0 - \Delta\lambda)$ 两条谱线在中心焦距 f_0 处的光强足够小。

$(\lambda_0 + \Delta\lambda)$ 谱线首先在焦点 $(f_0 - \Delta f)$ 产生和发射, 由于该谱线的发射端为一会聚点, 因此, 可以认为谱线将以球面波传输方式到达主焦点 f_0 , 简谐球面波的波函数如下式所示:

$$E(r, t) = \frac{E_0}{r} \cos[k(r - \omega t) + \varphi_0] \quad (7)$$

式中, r 为球面波的传播距离。当波函数采用复指数形式时, 光强可由下式计算:

$$I = E * E^* = \frac{E_0^2}{r^2} \quad (8)$$

设初始时光斑大小为 r_0 , 则初始光强 $I_0 = E_0^2$ 称为源强度。由式(8)可知, 光强随着传播距离的增加而降低, 当 $r/r_0 \geq 32$ 时, 相对光强衰减为源强度的 0.1% 以下, 这时可忽略对主光强的影响, 达到可分辨的条件。

对应菲涅耳透镜的情况, 初始时的 r_0 为焦点 $(f_0 - \Delta f)$ 处的爱里斑半径 r_λ , 传输距离 $r = \Delta f$, 当 $\Delta f/r_\lambda \geq 32$ 时, 焦点 f_0 处的谱线 $(\lambda_0 + \Delta\lambda)$ 的强度衰减到 0.1%, 此时菲涅耳透镜可分辨的最小波长间隔为 $\Delta\lambda$ 。爱里斑半径 r_λ 为:

$$r_\lambda = \frac{1.22 \times (\lambda_0 + \Delta\lambda)}{D} \quad (9)$$

其中, D 为菲涅耳透镜数值孔径。

因此, 将 $\Delta f = 3.1r_\lambda$ 代入公式(6)中, 可求得在光谱分辨率为 $\Delta\lambda$ 时, 菲涅耳透镜所需的主焦距 f_0 :

$$f_0 = \frac{\Delta f}{\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0 + \Delta\lambda}\right)} = \frac{32r_\lambda}{\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0 + \Delta\lambda}\right)} = \frac{39 \times (\lambda_0 + \Delta\lambda)^2}{D \cdot \Delta\lambda} \quad (10)$$

对于多阶相位, 最小线宽 v 与最大环带半径 R 与环带数 M 的关系有^[5]:

$$v = \frac{r_M}{2M} = \frac{R}{2M} \quad (11)$$

其中, 环带数 M 又可表示为^[5]:

$$M = R^2 L / (2f_0 \lambda_0) \quad (12)$$

其中, L 为台阶数; R 为最大环带半径。因此, 联合式(11)和式(12)可求得最大环带半径 R :

$$R = \frac{\lambda_0 f_0}{vL} \quad (13)$$

因此, 根据公式(13), 代入菲涅耳透镜数值孔径 D 的表达式:

$$D = \frac{R}{f_0} = \frac{\lambda_0}{vL} \quad (14)$$

将公式(14)代入公式(10), 得到台阶数为 L 的菲涅耳透镜主焦距 f_0 设计公式:

$$f_0 = \frac{39 \times (\lambda_0 + \Delta\lambda)^2 \cdot v \cdot L}{\lambda_0 \cdot \Delta\lambda} \quad (15)$$

如果 $\Delta\lambda \ll \lambda_0$, 则 $\lambda_0 + \Delta\lambda \approx \lambda_0$, 代入公式(15)中, 整理后得到:

$$\Delta\lambda = \frac{39 \times \lambda_0 \cdot v \cdot L}{f_0} \quad (16)$$

可以看到, 衍射微透镜的光谱分辨率与透镜的中心设计波长 λ_0 、制备工艺最小线宽 v 、透镜相位台阶数 L 和透镜主焦距 f_0 有关; λ_0 和 v 越小, 透镜能获得的光谱分辨率越高。在 λ_0, L 和 v 一定的情况下, 光谱分辨率与主焦距之间呈反比, 较大的主焦距将获得较小的光谱分辨率。利用该公式可以计算出在 589nm 的设计波长下, 1 μm 线宽的 8 阶微透镜的焦距与分辨率的关系曲线图, 如图 4 所示。可以看出, 当焦距设计为 679mm 时, 微透镜的分辨率为 0.27nm, 与国内发表的实验结果 0.3nm 是一致的^[4], 这证明推导的公式是比较准确的。

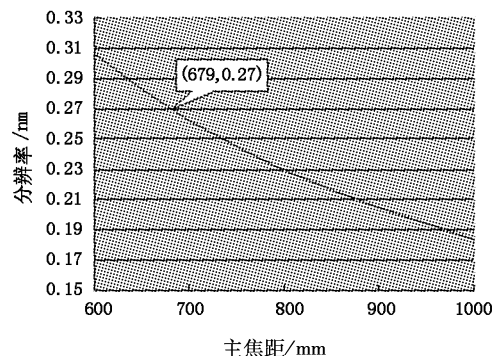


图 4 微透镜的焦距与分辨率的关系曲线图 ($\lambda_0 = 589\text{nm}, v = 1\mu\text{m}, L = 8$)

4 结论

菲涅耳透镜具有良好的分光和聚焦特性, 本文根据菲涅耳透镜的基本工作原理, 利用球面波的传输理论推导了要使菲涅耳透镜的光谱分辨率为 $\Delta\lambda$ 时所应满足的中心焦距条件, 其推导结果得到了国内发表的实验结果的验证。在下一步工作中, 将通过工艺设计、工艺实验以及测试技术等, 验证并修正本文的设计工作。

参考文献:

- [1] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [2] 孙强, 于斌, 王肇圻, 等. 二元光学在红外超光谱探测中的应用[J]. 中国科学 E, 2003, 33(9): 839 - 844.
- [3] 谢敬辉, 赵达尊, 阎吉祥. 物理光学教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [4] 纪宪明, 沐仁旺, 韩良恺. 可用作分光元件的二元菲涅耳透镜[J]. 光电工程, 2003, 30(6): 4 - 7.
- [5] 程志军, 黄光, 何苗, 等. 8 相位 256×256 衍射微透镜的设计与制作[J]. 光电子技术与信息, 2002, 15(1): 32 - 35.