

基于菲涅耳透镜阵列的红外气体传感器

杜晓晴^{1,2} 徐 灿²

(¹ 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, ² 重庆大学微系统研究中心, 重庆 400030)

摘要 菲涅耳透镜同时具有分光与会聚特性,且体积小、重量轻和易复制,使其在光谱检测中得到逐步应用,但典型光谱成像仪采用菲涅耳透镜沿光轴扫描的方法来获得连续谱线,不利于光谱仪的稳定性。考虑到气体探测需求,选用多通道方式来获得多光谱,提出了一种基于菲涅耳透镜阵列的新型红外气体传感器,可实现吸收波长在 3~5 μm 的 CO_2 , CO , CH_4 , SO_2 气体的实时检测。利用球面波的传输理论和瑞利判据,推导了菲涅耳透镜光谱分辨率与透镜结构参数之间的函数关系,并以光谱分辨率小于 50nm 为性能指标,对 1 μm 工艺的 8 台阶菲涅耳透镜阵列的结构参数进行了计算和误差分析。结果表明,透镜阵列所需焦距为 47.84 mm,平均数值孔径大于 0.4。

关键词 物理光学; 红外气体传感器; 菲涅耳透镜; 分光特性; 光谱分辨率

中图分类号 TN256 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0237

Infrared Gas Sensor Based on Fresnel Lens Array

Du Xiaoqing^{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 Fresnel lens can realize both focus and dispersion of light and it also has the virtues including small volume, light weight and reproducibility, which makes it be widely used in spectral inspection. Typical spectral imaging instrument with Fresnel lens obtains continuous spectral lines by moving Fresnel lens along optical axis and therefore it will greatly decrease the stability of the whole instrument. Considering the requirement of gas detection, multi-channel mode was adopted to obtain multi-spectral and a novel infrared gas sensor based on a Fresnel lens array was presented. The gas sensor can real-time check and inspect of CO_2 , CO , CH_4 and SO_2 gases, whose adsorption wavelengths are all within from 3 μm to 5 μm infrared waveband. The relationship of spectrum resolution of Fresnel lens with structure parameters of lens was deduced by use of transmission theory of spherical wave and Rayleigh criterion. Moreover, structure parameters and their fabrication errors for 1 μm fabricated and eight phased Fresnel lens array were calculated when spectral resolution is required to be less than 50 nm. The calculated results show that the focal length of lens array is required to be 47.84 mm and the average numerical aperture can be more than 0.4.

Key words physical optics; infrared gas sensor; Fresnel lens; dispersion property; 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,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。菲涅耳透镜基于菲涅耳半波带板(FZP)实现^[1]。根据衍射原理,即通过改变入射光波的相位,一般为多阶相位,实现对光束的会聚功能,因此也称作衍射式微透镜。同时,

菲涅耳透镜还能将入射光线沿光轴方向进行色散,可以校正轴上色差和球差,且具有体积小、重量轻和可复制的优点,因此在光互连、光学扫描、光通信和全息显示等许多领域得到日益广泛的应用。

利用菲涅耳透镜作为分光元件是近年来实现光谱成像仪和微型光谱仪的一种新型技术。美国光量子中心罗姆实验室首先提出了利用微透镜色散特性设计出的成像光谱仪^[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,于是将探测器 CCD 元件固定,二元光学透镜沿光轴方向扫描,就可获得不同波段的光谱图像。由于二元光学微透镜同时具有会聚和色散的功能,因此与传统的成像光谱仪相比,该光谱仪不仅能获得很高的分辨率,而且整个系统光学元件较少,光学结构简单。但使菲涅耳透镜或探测器沿光轴进行精细的扫描来获得连续谱线,会增加设计和制作难度,而且不利于光谱仪的稳定性。

由于多光谱非常适合特定气体的检测,因此选用多通道阵列方式来获得多条光谱,提出一种基于菲涅耳透镜阵列的新型红外气体传感器,以实现吸收波长在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的气体检测,同时根据菲涅耳透镜的基本工作原理,对菲涅耳透镜色散特性评价指标—光谱分辨率进行了讨论与定量推导,这对菲涅耳透镜及其阵列的设计具有重要的理论指导意义。

2 传感器的结构与原理

设计的传感器结构如图 1 所示。由菲涅耳透镜阵列、探测器阵列、光学通道和钢柱组成。其中菲涅耳透镜阵列是传感器的色散与成像元件,能将波长为 λ_0 的光会聚到轴上主焦点 f_0 ,而其它波长的光则不会落在主焦点 f_0 上,其分光原理如图 2 所示。因此对于四种吸收波长在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的气体: CO_2 , CO , CH_4 , SO_2 ,由于这四种气体的吸收波长分别为 $4.26\ \mu\text{m}$, $4.60\ \mu\text{m}$, $3.32\ \mu\text{m}$ 和 $4.00\ \mu\text{m}$,可将这些吸收波长分别作为四个菲涅耳透镜的中心波长,每一个透镜对应一个中心波长(即一种气体),形成一个四通道的菲涅耳微透镜阵列。并通过钢柱与探测器阵列耦合构成一种红外气体传感器。为了便于制作,设计使得每个微透镜的主焦距相同,即等焦距透镜阵列,但每个微透镜对应的菲涅耳波带板结构不同,从而实现不同中心波长的会聚。这种结构的红外气体传感器具有实时探测、易于加工与集成等

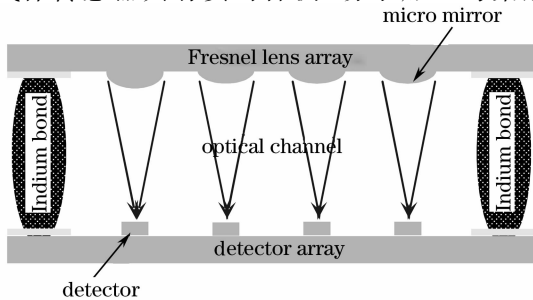


图 1 基于菲涅耳透镜阵列的红外气体传感器结构示意图

Fig. 1 Sketch map of structure of infrared gas sensor based on Fresnel lens array with the same focus.

特点。

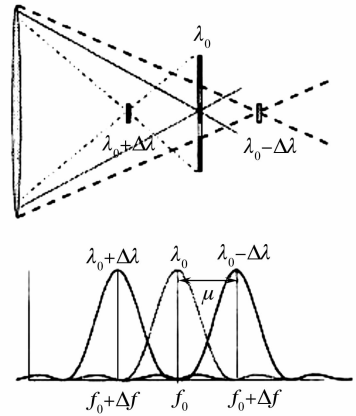


图 2 菲涅耳透镜的分光原理图

Fig. 2 Sketch map of dispersion principle of Fresnel lens.

3 菲涅耳透镜的分光特性

如图 2 所示,菲涅耳透镜将波长为 λ_0 的中心波长会聚到轴上主焦点 f_0 。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,焦距与波长之间的关系为

$$f = d_0 = r_1^2 / \lambda, \quad (1)$$

其中 r_1 为菲涅耳波带板第一个环带半径。

由(1)式得出,其它波长的焦距与中心入射波长的焦距之间的关系为^[3]

$$f = \lambda_0 f_0 / \lambda, \quad (2)$$

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光的会聚焦点要远离中心焦距,达到能分辨的目的。光谱分辨率是评价衍射微透镜分光特性的主要指标,也是传感器设计的重要性能指标,因此在透镜结构具体设计前,需要对菲涅耳透镜光谱分辨率的定义及其影响因素进行讨论。

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,作为分辨的极限,认为此时可以恰好分辨这两条光线,如图 2 所示,此时图 2 中 $\Delta\lambda$ 为菲涅耳透镜的光谱分辨率。如果令 $\lambda = \lambda_0 \pm \Delta\lambda$,代入(2)式,可求得

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0 |f_0 - f|}{f} = \frac{\lambda_0 \cdot \Delta f}{f} \quad (3)$$

可以看到,在给定入射波长 λ_0 ,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为

$$E(r, t) = \frac{E_0}{r} \cos[k(r - \omega t) + \varphi_0] \quad (4)$$

其中 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(5)式计算

$$I = E * E^* = E_0^2 / r^2, \quad (5)$$

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。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，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 可由(6)式得出^[1]

$$r_\lambda = 1.22(\lambda_0 + \Delta\lambda)/D, \quad (6)$$

其中 D 为菲涅耳透镜数值孔径。

因此，将 $\Delta f = 32 r_\lambda$ 代入(3)式中，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

$$f_0 = \frac{\Delta f}{\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0 + \Delta\lambda}\right)} = \frac{32r_\lambda}{\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0 + \Delta\lambda}\right)} = \frac{39(\lambda_0 + \Delta\lambda)^2}{D\Delta\lambda} \quad (7)$$

对于多阶相位，最小线宽 v 与最大环带半径 R 与环带数 M 的关系为^[4]

$$v = \frac{r_M}{2M} = \frac{R}{2M} \quad (8)$$

其中环带数 M 可表示为

$$M = \frac{R^2 L}{2f\lambda} \quad (9)$$

其中 L 为台阶数， R 为最大环带半径。因此联合(8)式和(9)式可求得最大环带半径为

$$R = \frac{\lambda_0 f_0}{L} \quad (10)$$

因此，菲涅耳透镜数值孔径 D 为

$$D = \frac{R}{f_0} = \frac{\lambda_0}{L} \quad (11)$$

将(11)式代入(7)式，得到台阶数为 L 的菲涅耳透镜主焦距 f_0 设计公式

$$f_0 = \frac{39(\lambda_0 + \Delta\lambda)^2 v L}{\lambda_0 \Delta\lambda} \quad (12)$$

如果 $\Delta\lambda \ll \lambda_0$ ，则 $\lambda_0 + \Delta\lambda \approx \lambda_0$ ，代入(12)式中，整理后得到

$$\Delta\lambda = 39\lambda_0 v L / f_0, \quad (13)$$

可以看到，菲涅耳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。在 λ_0 和 L 一定的情况下，光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 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(13)式可以计算出在 589 nm 的设计波长下，当焦距设计为 679 mm 时，微透镜的分辨率为 0.27 nm，与国内发表的实验结果 0.3 nm 是一致的^[5]，证明推导的公式是比较准确的。

4 菲涅耳透镜阵列的结构参数设计

从(13)式可以看到，焦距越长，分辨率越高，但是却不利于系统的微小型化。在平衡实用化与系统微小型化要求中，选择 50 nm 作为微透镜的最大光谱分辨率。如果采用 1 μm 硅光刻工艺，则微透镜的最小线宽为 1 μm 。考虑到 8 台阶制作工艺已经很成熟，选择台阶数 $L = 8$ 。

4.1 主焦距设计

设计的菲涅耳透镜要求分辨率 ≤ 50 nm，考虑到制作过程中所产生的误差可能引起菲涅耳透镜中心波长的偏离，因此，在设计时，取分辨率为 30 nm，这样可以保证最后的分辨率在 50 nm 的范围之内。根据(13)式，将 $v = 1 \mu\text{m}$ ， $L = 8$ 代入，可以求出中心波长分别为 4.26 μm ，4.60 μm ，3.32 μm 和 4.00 μm 时所对应的焦距，如表 1 所示。由于设计的微透镜阵列是等焦距的，所以根据(13)式，选取其中的最大值，这样能够保证四个透镜都能满足设计要求。考虑制作偏差，取微透镜阵列的焦距为 47840 μm 。

表 1 四个中心波长分别对应的焦距

Table 1 Required focal lengths respectively for four center wavelengths

$\lambda_0 / \mu\text{m}$	$f_0 / \mu\text{m}$
3.32	34528
4.00	41600
4.26	44304
4.60	47840

4.2 微透镜的环带设计

制作时，每个环带半径需满足(14)式

$$r_m = \sqrt{2m\lambda_0 f_0 / L}, \quad (14)$$

其中 $m = 1, 2, \dots, M$ (M 为最大环带数)。

从(14)式可以看出,每一个环带的尺寸都不可能全为整数,而制作工艺的最小线宽为 $1\ \mu\text{m}$,因此在制作过程中可能引起中心波长的偏移,尤其是第一个周期的环带,因其环带面积最大,所以可能引起的偏移对微透镜的分辨率影响最大。设 r_1 为第一环带半径, r_1' 为工艺线宽要求取整后的第一环带半径, λ_0' 为第一环带半径取整后偏移的中心波长。根据(14)式计算得到表 2。从表 2 可以看出,第一环带半径在取整后中心波长偏离量都为 $0.01\ \mu\text{m}$,在考虑的工艺误差之内。根据前面的公式和设计焦距,可进一步求出四种波长所对应的最大环带半径 r_M 以及数值孔径 NA,如表 3 所示。可以看到,四个微透镜的理论数值孔径都在 0.4 以上。

表 2 第一环带半径取整后中心波长的偏移量

Table 2 Excursion of center wavelength after integral of radius of the first zone

$\lambda_0 / \mu\text{m}$	$r_1 / \mu\text{m}$	$r_1' / \mu\text{m}$	$\lambda_0' / \mu\text{m}$
3.32	199.26	199	3.31
4.00	218.72	219	4.01
4.26	225.72	226	4.27
4.60	234.55	235	4.61

表 3 最大环带半径以及数值孔径

Table 3 Radius of maximum zones and numerical apertures

$\lambda_0 / \mu\text{m}$	$r_M / \mu\text{m}$	NA
3.32	19854	0.415
4.00	23920	0.5
4.26	25475	0.5325
4.60	27508	0.575

5 结 论

菲涅耳透镜具有良好的分光 and 聚焦特性,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并计算了菲涅耳透镜的光谱分辨率与透镜主焦距的理论关系。在此基础上,设计了一种中心波长在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的多通道菲涅耳透镜阵列结构,可用于 CO_2 , CO , CH_4 , SO_2 含量气体探测,并初步考虑了工艺误差对菲涅耳透镜阵列光学性能的影响。

参 考 文 献

- Xie Jinhui, Zhao Dazun, Yan Jixiang. Physical Optics Tutorial [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005. 80~110
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. 80~110
- Sun Qiang, Yu Bin, Wang Zhaoqi *et al.*. Application of binary optics in infrared super spectral detection[J]. *Science in China (Series E)*, 2003, **33**(9): 839~844
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 辑, 2003, **33**(9): 839~844
- Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 186~210
金国藩,严瑛白,邬敏贤. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. 186~210
- Cheng Zhijun, Huang Guang, He Miao *et al.*. Design and fabrication of 256×256 diffractive microlens array with 8 phases [J]. *Optoelectronic Technology and Information*, 2002, **15**(1): 32~35
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
- Ji Xianming, Mu Renwang, Han Liangkai. A binary Fresnel lens used as light splitting element [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(6): 4~7
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