

# 温度变化对谐衍射透镜性能的影响

邢德财<sup>1,2</sup> 冯国英<sup>1</sup> 杨李茗<sup>2</sup> 周礼书<sup>2</sup>

(1 四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2 成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

**摘要** 分析了温度变化对谐衍射透镜的焦距、谐振波长、衍射效率等性能的影响,建立了相应的数学表达式,并对其进行了数值模拟.提出了漂移函数的概念,以表征焦距和共振波长随温度的变化程度.另外,还给出了各谐振级次的衍射效率随温度变化的相关规律.最后比较了在相位匹配数不同、但设计波长相同时,温度变化对衍射效率的影响,发现相位匹配数越大,衍射效率对温度变化越敏感.

**关键词** 谐衍射透镜;温度变化;漂移函数;衍射效率

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

## 0 引言

由于衍射透镜的焦距随波长呈反比变化,因此色散较大是衍射成像器件的最大缺陷.1995年, Sweeney<sup>[1]</sup>和 Faklis<sup>[2]</sup>等人提出了谐衍射透镜的概念.谐衍射透镜也叫多级衍射透镜,它的单色像差与普通衍射透镜类似,光谱特性介于折射透镜与衍射透镜之间<sup>[1-3]</sup>,可用在多光谱、宽视场及大数值孔径的光学系统中,如彩色投影或扫描<sup>[3]</sup>、多波长共焦<sup>[4]</sup>等.而对光学系统来说,特别是军事和空间系统,环境因素会对其产生极大的影响,当然,温度便是其中之一.目前已有学者就温度对普通衍射透镜的影响进行了研究<sup>[5-6]</sup>,而本文主要就温度变化对谐衍射透镜的焦距、谐振波长、衍射效率等性能的影响进行了分析.

## 1 理论分析

### 1.1 焦点漂移和共振波长漂移

图1展示的是谐衍射透镜与普通衍射透镜的示意图.谐衍射透镜的特点是相邻环带间的光程差是设计波长 $\lambda_0$ 的整数 $p$  ( $p \geq 2$ ;  $p = 1$ 为普通衍射透

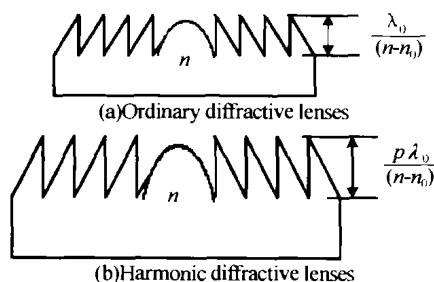


图1 普通衍射透镜与谐衍射透镜的示意图

Fig. 1 Sketch of harmonic diffractive lenses and ordinary diffractive lenses

镜)倍,最大调制深度 $h_{max}$ 为 $p\lambda_0 / (n - n_0)$ ,是普通衍射透镜的 $p$ 倍.在近轴区域,根据菲涅耳波带理论,第 $j$ 环带的半径位置为<sup>[2,7]</sup>

$$r_j^2 = 2jP\lambda_0 f_0 / n_0 \quad (1)$$

式中, $p$ 为整数,代表最大位相调制是 $2\pi$ 的 $p$ 倍,称为谐衍射透镜的相位匹配数; $n_0$ 为像空间折射率; $\lambda_0$ 为设计波长; $f_0$ 为设计焦距.

当温度变化为 $\Delta T$ 时, $r_j$ 和 $n_0$ 均发生变化<sup>[5]</sup>,即

$$r_j(\Delta T) = r_j(1 + \alpha_g \Delta T) \quad (2)$$

$$n_0(\Delta T) = n_0 + (dn_0/dT)\Delta T \quad (3)$$

式中, $\alpha_g$ 为透镜材料的热膨胀系数.

若对使用波长为 $\lambda$ 的第 $m$ 衍射级成像,则其焦距为<sup>[1-3]</sup>

$$f(\lambda) = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f_0 \quad (4)$$

从式(4)可见,当 $m\lambda = p\lambda_0$ 时, $f(\lambda) = f_0$ ,这就是谐衍射透镜能减小色差的原因.此时的 $\lambda$ 称为谐振波长,对应的衍射级次称为谐振级次,而 $m\lambda = p\lambda_0$ 则称为谐振条件.从谐振条件可以看出,对于相同的光谱范围和设计波长,不同的 $p$ 值会带来不同的谐振波长和共振级次,且较大的 $p$ 值一般有较多的谐振级次和共振波长,因此, $p$ 提供了另一个设计自由度,用以控制在给定的光谱范围内将哪几种波长会聚到同一位置;但是较大的 $p$ 值相应的是较深的调制深度,这会给加工带来相应的困难.同时,在数值孔径一定的情况下,随着 $p$ 的增大,环带宽度由窄变宽,环带总数减少,谐衍射透镜的衍射性能减弱,而折射性能却得到增强,材料对光谱的影响也将增大<sup>[2,3]</sup>.另外, $p$ 越大,谐衍射透镜的最大色差将减小,当 $p$ 大到一定程度时,其性质变为折射型透镜,色差即由决定于波长变为决定于材料色散<sup>[4]</sup>.

从式(1)~(4)可知,当温度发生变化时

$$f(\lambda, \Delta T) = \frac{r_j^2(\Delta T)n_0(\Delta T)}{2mj\lambda} = (1 + \alpha_g \Delta T)^2 \left(1 + \frac{dn_0}{dT} \frac{\Delta T}{n_0}\right) f(\lambda) \quad (5)$$

由式(5)可见,当温度发生变化时,对于 $\lambda$ 波长的光波,它的焦距将发生一定的漂移. 接下来,假设 $\lambda_m$ 代表第 $m$ 级的谐振波长,即

$$\lambda_m = \frac{n_0 r_j^2}{2mj f_0} \quad (6)$$

由此可见,当温度发生变化时,要维持焦距不变,则

$$\lambda_m(\Delta T) = (1 + \alpha_g \Delta T)^2 \left(1 + \frac{dn_0}{dT} \frac{\Delta T}{n_0}\right) \lambda_m \quad (7)$$

比较式(5)与式(7)可知,当温度发生变化时,若要保持谐振波长不变,则焦距将发生漂移;反之,若维持焦距不变,则谐振波长将发生漂移,且二者漂移量相同,即

$$\beta = (1 + \alpha_g \Delta T)^2 \left(1 + \frac{dn_0}{dT} \frac{\Delta T}{n_0}\right) \quad (8)$$

定义 $\beta$ 为温度发生变化时衍射透镜的波长或焦距的漂移函数,其值与衍射透镜的材料、像空间介质、温度变化量等有关.

## 1.2 衍射效率

对于衍射透镜,其衍射效率为<sup>[1-3]</sup>

$$\eta_m(\lambda) = \text{sinc}^2 \left[ \frac{p\lambda_0}{\lambda} \frac{n(\lambda) - n_0(\lambda_0)}{n(\lambda_0) - n_0(\lambda_0)} - m \right] \quad (9)$$

式中, $n$ 为衍射透镜材料的折射率. 从式(9)可知,考虑材料色散时,各谐振波长一般不能同时取最大衍射效率. 在设计时,要求衍射透镜对设计波长产生的最大位相调制为 $2\pi$ 的 $p$ ( $\geq 2$ )倍,即

$$p = \frac{h_{\max}}{\lambda_0} [n(\lambda_0) - n_0(\lambda_0)] \quad (10)$$

式中, $h_{\max}$ 为最大调制深度. 然而,由于制作上的误差或者使用环境发生变化,都将导致 $h_{\max}$ 发生变化,从而使 $p$ 不再与设计时的值相等,这样将带来衍射效率的变化.

与 $r_m$ 一样,当温度发生变化时, $h_{\max}$ 也将发生变化<sup>[5]</sup>,即

$$h_{\max}(\Delta T) = h_{\max}(1 + \alpha_g \Delta T) \quad (11)$$

由式(3)、(9)、(10)和式(11)可得当温度发生变化时

$$\eta_m(\lambda, \Delta T) = \text{sinc}^2 \left\{ \frac{h_{\max}(1 + \alpha_g \Delta T)}{\lambda} [n(\lambda) - n_0(\lambda) + \left(\frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT}\right) \Delta T] - m \right\} \quad (12)$$

## 2 数值分析

以半导体红外光学材料锗(Ge)为例,研究用它来制作成的衍射透镜在中红外波段( $3.2 \mu\text{m} \sim$

$4.5 \mu\text{m}$ )应用时,温度变化对它的性能的影响. 相关参数为<sup>[5]</sup>:锗的折射率随温度的变化率 $dn/dT = 270 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,热膨胀系数 $\alpha_g = 6.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,设计波长 $\lambda_0$ 为 $4.0 \mu\text{m}$ ,设计焦距 $f_0$ 为 $150 \text{ mm}$ , $p$ 设计为 $10$ ,并将衍射透镜置于空气中,令 $n_0 = 1$ ,且忽略其随波长的变化,即 $n_0(\lambda) = n_0(\lambda_0)$ ,而 $dn_0/dT = -0.964 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . 在中红外波段内,根据材料手册所提供的数据可拟合出锗的折射率与波长的关系,其结果如图2.

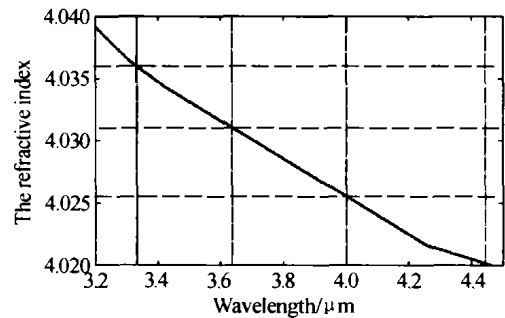


图2 锗的折射率与波长的关系

Fig. 2 The relation between the refractive index of Ge and wavelength

### 2.1 漂移函数

当温度发生变化时,焦点的漂移或者谐振波长的漂移都可以用漂移函数来描述. 为此,根据式(8)计算了漂移函数与温度变化的关系,其结果如图3. 从图3可以看出,由于 $\alpha_g$ 与 $dn_0/dT$ 都较小,但 $\alpha_g$ 又比 $dn_0/dT$ 大得多,因此,在这种条件下,漂移函数 $\beta$ 与温度变化 $\Delta T$ 之间呈近似线性关系.

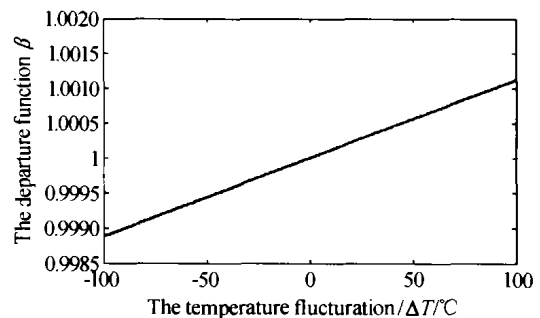


图3 漂移函数与温度变化的关系

Fig. 3 The relation between the shifting function and temperature fluctuation

### 2.2 衍射效率

衍射效率是人们最关心的问题,温度的变化会对衍射透镜的折射率和几何尺寸以及像空间的折射率等多种因素造成影响,从而造成对衍射效率的影响.

在 $\lambda_0$ 为 $4.0 \mu\text{m}$ ,且 $p = 10$ 的情况下,根据谐振条件 $m\lambda = p\lambda_0$ ,可知在中红外波段内谐振波长分别为: $4.4444 \mu\text{m}$ 、 $4.0 \mu\text{m}$ 、 $3.6364 \mu\text{m}$ 和 $3.3333 \mu\text{m}$ ,其分别对应的衍射级次为:9、10、11和12,且相应的材料折射率可由图2得出,分别为4.0203、4.0255、

4.0306 和 4.0361.

图 4 和图 5 分别表示在不考虑材料色散和考虑材料色散时, 谐衍射透镜的各谐振波长在其相应的谐振级次上的衍射效率与温度变化的关系. 从图 4 可以看出, 不考虑材料色散时, 温度变化对衍射效率的影响几乎是对称的, 其峰值衍射效率位于温度变化为 0 处, 且低级次的衍射效率曲线比高级次的平坦. 从图 5 则可看出, 虽然衍射效率曲线同样具有低级次比高级次总体上平坦的特征, 但是由于考虑了材料色散, 除设计波长所在的衍射级次 ( $m = p$ ) 外, 其它级次的衍射效率不再相对于温度变化呈近似对称分布, 且峰值衍射效率也不再位于温度变化为 0 处, 而是产生了漂移. 一般而言, 对于  $m > p$  的衍射级次, 峰值衍射效率向负温度变化 (相对于温度降低) 方向漂移; 而对于  $m < p$  的衍射级次, 峰值衍射效率向正温度变化 (相对于温度升高) 方向漂移. 不过, 应注意的是这条规律仅适合于  $dn/dT - dn_0/dT > 0$  时的情况, 对于  $dn/dT - dn_0/dT < 0$  时, 情况则相反.

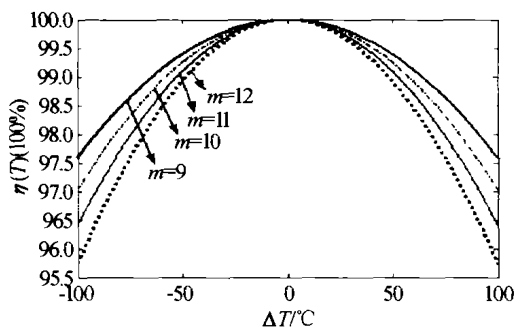


图 4 不考虑材料色散时, 温度变化对衍射效率的影响 ( $p = 10$ )  
 Fig. 4 The influence of temperature fluctuation upon the diffraction efficiency (neglecting the material dispersivity,  $p = 10$ )

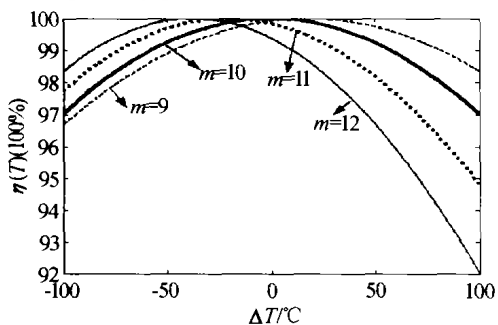


图 5 考虑材料色散时, 温度变化对衍射效率的影响 ( $p = 10$ )  
 Fig. 5 The influence of temperature fluctuation upon the diffraction efficiency (considering the material dispersivity,  $p = 10$ )

另外, 不同  $p$  值的谐衍射透镜, 温度变化对其性能的影响是不一样的. 从谐振条件可知, 设计波长所在的衍射级次为  $m = p$  级. 为此, 我们分析了在  $p$  值不同、但设计波长相同时, 温度变化对设计波长在

$m = p$  级上的衍射效率的影响, 如图 6. 从图 6 可以看出,  $p$  越小, 衍射效率相对于温度变化的曲线就越平坦, 换句话说,  $p$  越大, 衍射效率对温度的变化越敏感. 另外, 经过模拟, 我们发现在其它谐振级次具有与此相同的规律.

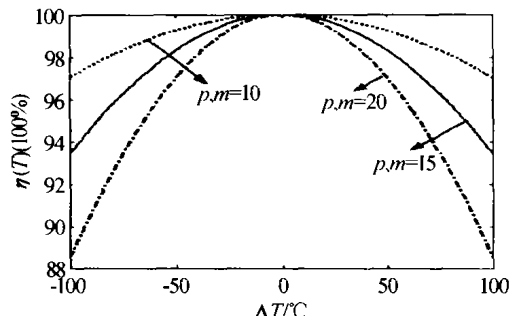


图 6 在不同的  $p$  下, 温度变化对衍射效率的影响  
 Fig. 6 The influence of temperature fluctuation upon the diffraction efficiency for different  $p$

因此, 从上面的理论与数值分析可知,  $p$  作为谐衍射透镜的一个设计参数, 对谐衍射透镜的性能有极大的影响.  $p$  的选择除应考虑谐振波长及其衍射效率外, 还应该充分考虑材料的色散特性、所使用的环境和加工工艺等. 环境的温度波动范围很大、材料的色散比较大时, 都不宜选择较大的  $p$  值. 总之, 确定一个最佳的  $p$  值没有一个定量的计算公式, 需要综合考虑以上因素并结合实际需要进行折衷处理.

### 3 结论

理论与数值分析均证明, 温度变化将对谐衍射透镜的性能产生较大的影响. 谐衍射透镜的焦点或者谐振波长将随温度变化而产生漂移, 其漂移量可由相同的漂移函数来确定, 且漂移函数与温度变化之间的关系在一定的条件下可以近似为线性. 另外还得出, 不考虑材料的色散时, 各谐振级次的衍射效率相对于温度变化呈近似对称分布; 而当考虑材料色散时, 除设计波长所在的级次 ( $m = p$ ) 外, 其余级次的衍射效率都不相对于温度变化呈近似对称分布, 峰值衍射效率发生了漂移, 我们得出了相应的漂移规律; 但是, 不管是否考虑材料的色散, 低级次的衍射效率关于温度变化的曲线总体上都要比高级次的平坦. 最后比较了在位相匹配数不同, 但设计波长相同的情况下, 温度变化对衍射效率的影响, 发现位相匹配数越大, 衍射效率对温度变化就越敏感. 因此, 本文可为谐衍射透镜的设计和应用提供一定的参考.

#### 参考文献

- 1 Sweeney D W, Sommargren G E. Harmonic diffractive lenses. *Appl Opt*, 1995, **34**(14): 2469 ~ 2475
- 2 Faklis D, Morris D M. Spectral properties of multiorder

- diffractive lenses. *Appl Opt*, 1995, **34**(14): 2462 ~ 2468
- 3 金国藩, 严瑛白, 邹敏贤, 等. 二元光学. 北京: 国防工业出版社, 1998. 195 ~ 200  
Jin G P, Yan Y B, Wu M X, *et al.* The binary optics, Beijing: National defence industry press, 1998. 195 ~ 200
- 4 杜春雷, 白临波, 邱传凯, 等. 消色差谐衍射微透镜列阵的应用研究. 光子学报, 2000, **29**(5): 426 ~ 430  
Du C L, Bai L B, Qiu C K, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(5): 426 ~ 430
- 5 Behrmann G P, Bowen J P. Influence of temperature on diffractive lens performance. *Appl Opt*, 1993, **32**(14): 2483 ~ 2489
- 6 巴音贺希格. 温度涨落和波长偏离对衍射透镜性能的影响. 光子学报, 2003, **32**(5): 563 ~ 566  
Bayanheshig. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 563 ~ 566
- 7 杜春雷, 郭履容, 郭永康. 菲涅耳型衍射光学元件的研究. 光子学报, 1997, **26**(9): 824 ~ 831  
Du C L, Guo L R, Guo Y K. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(9): 824 ~ 831

## The Influence of Temperature Fluctuation upon Harmonic Diffractive Lenses Performance

Xing Decai<sup>1,2</sup>, Feng Guoying<sup>1</sup>, Yang Liming<sup>2</sup>, Zhou Lishu<sup>2</sup>

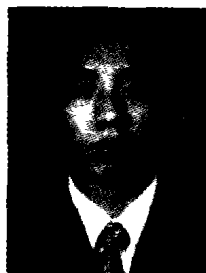
<sup>1</sup> School of Electronics and Information Science, Sichuan University, Chengdu 610064

<sup>2</sup> Fine optical engineering research center, Sichuan Chengdu 610041

Received date: 2004-03-05

**Abstract** The influence of temperature fluctuation upon focal length, harmonic wavelength and diffraction efficiency of harmonic diffractive lenses was analyzed, correspondingly, the mathematic formulas were constructed and some numerical simulations were carried out. The shifting function, which denoted the degrees of focal length and harmonic wavelength varied with temperature fluctuation, was developed. The disciplinarians of harmonic diffractive lenses' diffraction efficiency varying with temperature were listed. In the end, the influence of temperature fluctuation on harmonic diffractive lenses with different phase-matching number and the same designed wavelength was compared. The result indicates that the diffractive lens with lager phase-matching number was more sensitive to temperature fluctuation.

**Keywords** Harmonic diffractive lenses; Temperature fluctuation; Shifting function; Diffraction efficiency



**Xing Decai** was born in 1979, a postgraduate student of optics in School of Electronics and Information Science of Sichuan University. Directed by professor Feng Guoying. He is engaging in binary optics, high power laser and optic communications.