

相位阶跃变化型太赫兹波带片

鞠智鹏^{1,2}, 李德华^{1,2}, 周 薇¹, 马建军^{1,2}, 李乾坤^{1,2}, 屈 操^{1,2}

- (1. 山东科技大学 太赫兹研究中心, 山东 青岛 266590;
2. 青岛市太赫兹技术重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘 要: 对相位阶跃变化型太赫兹波带片衍射效率进行了理论研究。根据标量衍射理论, 相位阶跃变化型波带片可以完成对高斯光束太赫兹波的聚焦。相位阶跃变化型波带片的衍射规律与薄透镜聚焦的规律相似。对其在光轴以及焦平面上太赫兹强度分布及衍射效率进行了模拟, 通过与相位连续变化型, 台阶型波带片的衍射效率进行对比分析, 结果表明相位阶跃变化型波带片具有更好的衍射效率和性能。计算了一种相位阶跃变化型太赫兹波带片的加工尺寸, 适合微机械加工法, 有很好的应用价值。

关键词: 相位阶跃; 衍射光学; 太赫兹; 波带片

中图分类号: O434.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1519-04

Phase-stepped-changing Terahertz zone plate

Ju Zhipeng^{1,2}, Li Dehua^{1,2}, Zhou Wei¹, Ma Jianjun^{1,2}, Li Qiankun^{1,2}, Qu Cao^{1,2}

- (1. Terahertz Science and Technology Research Center, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Qingdao Key Laboratory of Terahertz Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Diffraction efficiency investigation of zone plate with stepped phase for terahertz frequencies was presented in this paper. According to Rayleigh-Sommerfeld diffraction theory, the zone plate with phase stepped changing can focus Gaussian beam with high diffraction efficiency. Diffraction law of the phase-stepped-changing zone plate was similar to thin lens. Simulations of intensity distribution and diffraction efficiency in phase-stepped-changing, phase-continuous-changing and phase-correcting Fresnel zone plate were conducted and compared. Results show that the focusing performance and the diffraction efficiency of phase-stepped-changing zone plate is better. A phase-stepped-changing zone plate is calculated. It can be produced by micro-mechanical method.

Key words: phase-stepped-changing; diffraction optics; terahertz; zone plate

收稿日期: 2012-10-10; 修订日期: 2012-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61071016/F010608); 青岛市科技计划项目(10-3-4-2-5-jch);

山东科技大学研究生科技创新基金(YCB110086)

作者简介: 鞠智鹏(1987-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹波带片的研究。Email: jzp370784@163.com

导师简介: 李德华(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事太赫兹辐射源、脉冲整形以及调制器方面的研究。

Email: jcbwl@sdust.edu.cn

0 引言

波带片具有聚焦和成像功能,是常用的衍射器件之一。与传统透镜、抛物面镜等器件相比,波带片具有设计和结构简单、质量小、体积小、成本低等优点,因此,已经被广泛应用于空间光学,远程光通信,图像识别和图像处理等领域。近 20 年来,随着太赫兹技术的发展^[1-3],人们已经研制了适用于太赫兹波段的波带片^[3-5]。由于太赫兹波带片使用的材料及加工尺寸与传统光学、微波波段波带片不同,太赫兹波带片的加工也遇到了困难。光刻法无法达到太赫兹波段刻槽深度的要求,而机械法加工精度不够。针对太赫兹波带片这一加工问题,文中设计了易于加工的相位阶跃变化型波带片,模拟了其衍射性能,并与相位连续变化型^[6-7]和台阶型^[8]波带片的衍射性能进行了比较分析。

1 结构设计

根据波动衍射理论^[9],将波带片设计为一组同心圆环,相邻圆环(第一个环带除外)发出的次波到焦点光程相差波长的 N 倍, N 为阶跃系数。以 $N=3$ 为例,如图 1 所示,环带的外边缘半径为 r_n , n 为波带序号, f 为预设焦距, H 为波带片中心厚度, m 为任意环带与第一环带相差的波长个数,波带片的环带外边缘与焦点之间的距离为 $f+m\lambda$ 。相位阶跃变化型波带片第 2,3,4 个环带外边缘与焦点的距离分别为 $f+\lambda$, $f+4\lambda$, $f+7\lambda$,而在同一环带中,通过改变各点厚度,使得各点发出的次波到达焦点时光程相等,从而使得各次波在焦点处相位相同,起到对太赫兹波会聚的作用。

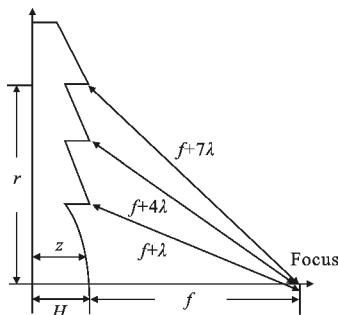


图 1 相位阶跃变化型波带片剖面结构示意图
Fig.1 Profile of phase-stepped-changing zone plate

通过图 1 可知,波带片环带外边缘半径 r 与其焦距 f 和预设波长 λ 的关系满足

$$r_n = \sqrt{2mf\lambda + (m\lambda)^2} \quad (1)$$

当入射波为平面波时,每个环带中距离波带片中心为 r 处的厚度 z 满足

$$nd + f + m\lambda = nz + \sqrt{r^2 + (f + d - z)^2} \quad (2)$$

式中: n 为材料的折射率。求解公式(2):

$$z(r) = d \frac{(n-1)f + mn\lambda}{n^2 - 1} - \frac{\sqrt{(n-1)^2 f^2 + (n^2 - 1)r^2 + m^2 \lambda^2 - 2(n-1)m\lambda f}}{n^2 - 1} \quad (3)$$

得到太赫兹波带片各环带中各点厚度随 r 的变化关系。

2 聚焦性能

模拟选用材料为聚丙烯(折射率 $n=1.475$,厚度 $H=5 \text{ mm}$,直径 $D=52 \text{ mm}$),波带片焦距 $f=100 \text{ mm}$,预设太赫兹波长 $\lambda=0.3282 \text{ mm}$,忽略吸收和反射损耗。根据瑞利-索末菲标量衍射理论,图 2 所示平面波上各点均可看作次波源,次波源所发出的平面次波在场点 P_1 处引起的复振幅为^[10]:

$$U(P_1) = \frac{1}{j\lambda} \sum_s U(P_0) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}_{01}) dS \quad (4)$$

式中: $U(P_0)$ 为波面上 P_0 点的复振幅; r_{01} 为次波源到场点的向量 \mathbf{r}_{01} 的模; \mathbf{n} 为次波源波面上法向单位向量; k 为波数; dS 为次波中心面元面积。

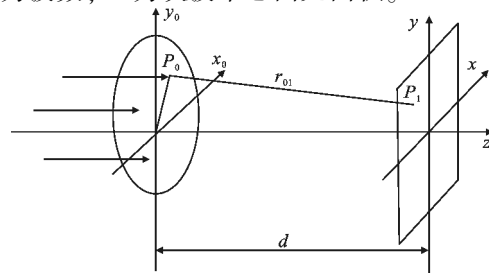


图 2 太赫兹波带片衍射示意图
Fig.2 Diffraction diagram of terahertz zone plate

假设 P_0 点坐标为 $(r\sin\theta, r\cos\theta, 0)$, 像点 P_1 坐标为 (x, y, d) , 波带片厚度为 z ,

$$r_{01} = \sqrt{(d-z)^2 + (r\cos\theta - y)^2 + (r\sin\theta - x)^2} \quad (5)$$

$$\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}_{01}) = (d-z)/r_{01} \quad (6)$$

假定从 P_0 点发出的次波传播距离 d 时振幅为 1, 位相值为 0, 那么传播到 P_1 点处复振幅及位相值分别为:

$$A=d/(az+r_{01}) \tag{7}$$

$$\omega=2\pi(az+r_{01})/\lambda \tag{8}$$

像点 P_1 处的复振幅为各次波面复振幅矢量和, 即

$$U(P_1)=\frac{1}{j\lambda} \sum_{r=0}^{r_1} \sum_{\theta=0}^{2\pi} Ae^{i\omega} \cos(n, r_{01}) r dr d\theta \tag{9}$$

场点 P_1 处的太赫兹波的强度为:

$$I=U(P_1)U^*(P_1) \tag{10}$$

取不同 P_1 点得到的衍射波面决定像面上复振幅分布, 由此计算波面各处光强分布。波带片衍射效率按下式计算, 式中 a 为焦斑半径。

$$\eta=\frac{\int_0^a |U(P_1)|^2 2\pi r dr}{\int_0^a |U(P_0)|^2 2\pi r dr} \tag{11}$$

根据公式(10), 对相位阶跃变化型、相位连续变化型、八台阶、四台阶和二台阶波带片沿 z 轴的太赫兹波强度分布以及在焦平面上的强度分布进行仿真, 结果如图 3-4 所示。

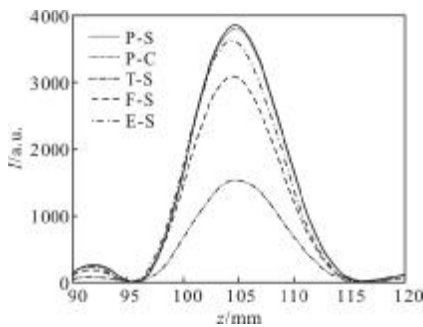


图 3 太赫兹波入射时沿 z 轴的光强分布

Fig.3 Intensity distribution along z -axis for a THz wave incidence

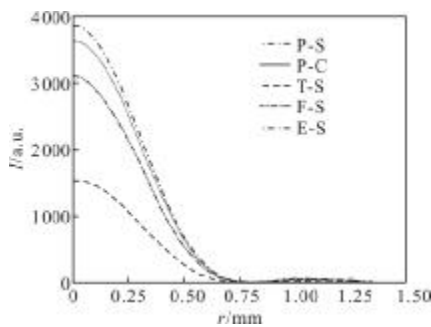


图 4 太赫兹波入射时沿轴向的光强分布

Fig.4 Intensity distribution along r -axis for a THz wave incidence

图 3 为沿轴向太赫兹强度的分布, 可以看出八台阶、四台阶、相位连续变化型波带片、相位阶跃变化型波带片、二台阶的主焦点位置的坐标值依次增大。相位阶跃变化型、相位连续变化型、八台阶、四台阶、二台阶波带片主焦点处的太赫兹强度依次减小。图 4 为焦平面上沿径向太赫兹强度的分布, 五种波带片焦斑半径均为 $a=0.7959 \text{ mm}$ 。

由图 3, 图 4 和公式(11)得出中心最大场强及衍射效率如表 1 所示。相位阶跃变化型波带片衍射效率与相位连续变化型波带片基本一致。八台阶、四台阶和二台阶波带片的衍射效率分别为相位阶跃变化型波带片的 94.6%、80.8%、40.5%, 可见相位阶跃变化型波带片具有良好的聚焦性能。

表 1 不同波带片的聚焦性能

Tab.1 Focusing properties of different zone plate

Zone plate	Maximum intensity/a.u.	Main focus /mm	Diffraction efficiency
Phase-stepped-changing	3.8572×10^3	104.700 0	0.814 5
Phase-continuous-changing	3.8136×10^3	104.700 0	0.814 7
Two-stepped	1.5437×10^3	104.800 0	0.329 9
Four-stepped	3.0941×10^3	104.500 0	0.658 2
Eight-stepped	3.6274×10^3	104.400 0	0.770 9

3 加工尺寸

上文模拟的相位阶跃变化型波带片各环带中各点的厚度随 r 的变化关系如图 5 所示。除第一环带外, 随着波带序数的增加, 环带周期和刻槽深度逐渐减小。

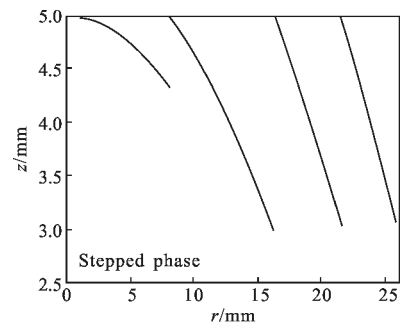


图 5 波带片各环带中各点的环带厚度与半径的变化关系

Fig.5 Relation between thickness and radius at different points on zone plate

相位阶跃变化型波带片加工尺寸如表2所示。波带序数为 n ,环带周期 $\tau=r_{n+1}-r_n$,刻槽深度 $h=H-z$ 。最小环带周期 $\tau=3.4418\text{ mm}$,最小刻槽深度 $h=0.6863\text{ mm}$,不同槽深最小差值 0.036 mm ,加工尺寸比相同半径的相位连续变化型波带片大一个数量级。微机械加工(MEM)精度在 10^{-3} mm ,能对该型波带片加工制作。波带序数 $n=4$,简化了加工过程。

表2 相位阶跃变化型波带片设计尺寸

Tab.2 Size of phase-stepped-changing zone plate

Band ordinal	Ring radius/mm	Ring cycle/mm	Edge thickness/mm	Groove depth/mm
1	8.108 5	8.108 5	4.313 7	0.686 3
2	16.256 8	8.148 3	2.981 2	2.018 8
3	21.558 2	5.301 4	3.019 1	1.980 9
4	25.829 7	3.441 8	3.054 9	1.945 1

4 结 论

在太赫兹波段,同时具有大数值孔径和短焦距的透镜制作比较困难,而太赫兹波带片可以很好地解决这个问题。文中设计了相位阶跃变化型波带片,模拟分析了太赫兹波入射时波带片的衍射性能,结果表明相位阶跃变化型波带片具有良好的聚焦性能。其加工尺寸适用于微机械加工法,有很好的应用价值。

参考文献:

- [1] Lu Yimin, Wang Jiachun, Lin Zhidan. Continuous THz transmission imaging experiment of $337\ \mu\text{m}$ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (2): 232-235. (in Chinese)
- [2] Guo Lantao, Mu Kaijun, Dong Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 51-56. (in Chinese)
郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 51-56.
- [3] Wang S, Yuan T, Walsby E D, et al. Characterization of T-ray binary lenses[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1183-1185.
- [4] Walsby E D, Durbin S M, Cumming D R S, et al. Analysis of silicon terahertz diffractive optics [J]. *Current Applied Physics*, 2004, 4(2-4): 102-105.
- [5] Walsby E D, Alton J, Worrall C. et al. Imprinted diffractive optics for terahertz radiation [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9): 1141-1143.
- [6] Li Dehua, Zhao Yang. Terahertz zone plates with continuous phase [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010(6): 1301-1305. (in Chinese)
李德华, 赵阳. 相位连续变化型太赫兹波带片 [J]. *强激光与粒子束*, 2010(6): 1301-1305.
- [7] Li Dehua, Zhao Yang, Sun Qingzhen, et al. Diffractive properties of Terahertz zone plates with continuous phase [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010 (8): 2021-2025. (in Chinese)
- [8] Wiltse J C. Zone plate designs for terahertz frequencies[C] // *SPIE*, 2005, 5790:167-179.
- [9] Alan K, Diane H, David B. Efficiency consideration for diffractive optical element [C]// *SPIE*, 1995, 2577: 114-122.
- [10] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics [M]. Beijing: Science Press, 1976: 42-44. (in Chinese)
顾德门 J W. 傅里叶光学导论 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1976: 42-44