

微波与光波分离聚焦集成透镜设计

车荣荣, 扈梓轩, 朱旗

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系应用电磁实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:设计了一种由光学菲涅耳透镜和微波螺旋结构透镜组成的集成透镜,微波透镜实现对入射微波能量的聚焦,光学菲涅耳透镜实现对入射可见光聚焦.由于微波螺旋结构对入射光没有阻挡作用,同时光学菲涅耳透镜对微波传输影响很小,且所提出的微波与光波分离聚焦集成透镜可以在将微波与光波分离汇聚于不同位置,微波焦点与光波焦点横向距离为35 cm,并在微波焦点处电场强度增强5倍.故加载此集成透镜后可以在充分利用入射可见光的基础上,实现对微波信号的发射和接收.

关键词:微波透镜;光学透镜;螺旋阵列

中图分类号: TN015; TN912 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.01.007

引用格式: Che Rongrong, Yi Zixuan, Zhu Qi. Design of an integrated lens for separating microwave and optical wave[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014,44(1):61-66.

车荣荣,扈梓轩,朱旗.微波与光波分离聚焦集成透镜设计[J].中国科学技术大学学报,2014,44(1):61-66.

Design of an integrated lens for separating microwave and optical wave

CHE Rongrong, YI Zixuan, ZHU Qi

(Dept. of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: An integrated lens was designed, which is composed of an optical Fresnel lens (OFL) and a microwave helix array (MHA). The OFL focuses the incident light wave while the MHA focuses on the incident microwave. The MHA has little effect on blocking incident light while the OFL has effect on microwave transmission. The proposed integrated lens can simultaneously focus microwave and optical wave on two different spots, and the distance between them is 35cm. The intensity of the electric field has a 5-fold improvement at the microwave focus. So it can transmit and receive microwave signal on the basis of the full use of the incident visible light when the integrated lens is uploaded.

Key words: microwave lens; optical lens; parasitic helices array

0 引言

太空中的卫星需要同时具有自主供能和通信的能力.要具备上述功能,卫星必须加载太阳能电池板和天线.为了发挥这两种器件的功能,它们必须安装

在卫星表面.如果利用可分别实现对微波与光波分离汇聚的集成透镜,将接收天线和太阳能电池板分别置于集成透镜相应的光学焦点和微波焦点处,则既可同时增加照射太阳能电池板的光通量,又可增加微波天线的接收口径,实现对卫星表面的高效利

收稿日期:2013-03-12;修回日期:2013-04-28

作者简介:车荣荣,女,1988年生,硕士生.研究方向:微波透镜. E-mail: cherr@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:朱旗,博士/教授. E-mail: zhuqi@ustc.edu.cn

用,减小卫星系统的载荷及发射成本.

光学菲涅耳透镜于 1822 年第一次用做灯塔透镜后,由于其具有较高的光学效率、较大的面积与质量比、方便制造、适应空间环境能力强、成本低等特点,在太阳能光伏发电系统中得到了广泛应用^[1]. Ryu 等通过推算光通量分布的叠加设计了一种模块化的菲涅耳透镜^[2],且由计算可知,用此方法设计的菲涅耳透镜可以使汇聚后的光强分布均匀性提高 20%,对光的透过率提高 70%.

与光学透镜类似,微波透镜也可以实现对入射微波能量的汇聚.例如,在遥感应用中,微波透镜可将微波信号汇聚到一个小区内以获得高精度探测^[3].与传统微波曲面透镜相比,微波波带片透镜结构简单、加工方便^[4].传统的微波波带片透镜由相间的透明带与不透明带组成^[5],如图 1 所示.其中,奇数标记(1,3,…)是透明带,偶数标记(2,4,…)是不透明带.透明带由微波传输介质构成,如空气等;不透明带一般由金属片实现.当微波能量入射到微波波带片透镜时,一部分能量被不透明带反射,另一部分能量则通过透明带,基于干涉原理汇聚于焦点处^[6].由于存在不透明带的反射,该种微波透镜能量利用率低,为此,文献提出了介质型微波波带片透镜^[7]:一类由同一均匀介质上的同心环状槽构成;另一类由两种或多种介电常数不同、厚度相同的介质组成.介质波带片透镜通常较重,例如当介电常数为 2.2,工作频率为 11.8 GHz 时,介质波带片透镜的厚度达 26.3 mm,且随着介电常数的升高,对入射微波反射增强,降低系统的效率.

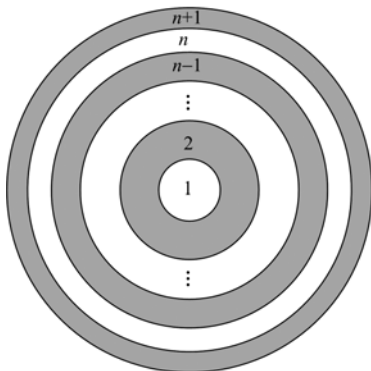


图 1 微波波带片透镜结构图

Fig. 1 Structure of a microwave zone plate lens

为了解决传统波带片透镜能量利用率低、重量较大等问题,本文提出利用螺旋阵列组成具有平面结构特征的微波波带片透镜,并将此透镜与光学菲涅耳透

镜进行集成,形成了具有微波与光波分离聚焦功能的集成透镜.该集成透镜具有透光性好、重量轻、光和微波汇聚能力强等特性,并可以同时入射的光波和微波汇聚于同一平面上不同位置处,如图 2 所示.

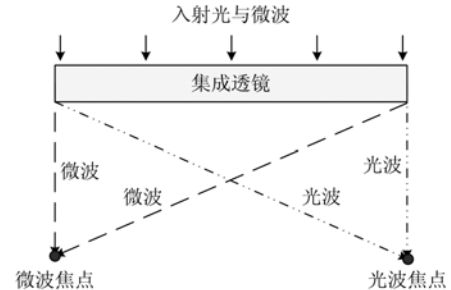


图 2 可分离汇聚光波和微波的集成透镜原理图

Fig. 2 The schematic of the proposed integrated lens for focusing light and microwave at difference position

1 基于微波波带片原理的螺旋透镜设计

为了使入射平面波经过透镜后能在焦点处汇聚,通过透镜的波在焦点处应该同相.微波波带片透镜基本原理如图 3 所示,其结构尺寸应满足:

$$\left. \begin{aligned} L_{n+1} - L_n &= \lambda/2 \\ L_1 - F &= \lambda/2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

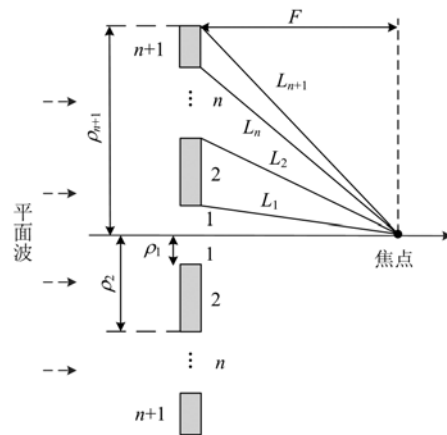


图 3 微波波带片透镜原理图

Fig. 3 The schematic of microwave zone plate lens

式中, L_n 是焦点距第 n 个区域外边界的距离, F 是焦距, λ 是自由空间波长.

由三角公式知:

$$L_n^2 = F^2 + \rho_n^2 \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得

$$\rho_n = \sqrt{n\lambda F + (n\lambda/2)^2} \quad (3)$$

从式(1)可以看出,波带片相邻区域内的对应点到焦点的波程差是半个波长,即相位相差 π .因此要

使通过奇数波带片的微波能量能在焦点处,和通过偶数波带片的微波能量叠加,需要对其相位进行 $(2m+1)\pi$ 补偿. 图 4 所示的螺旋 $(3/4 < C_\lambda < 4/3, 12^\circ < \alpha < 14^\circ)$ 是一种典型的慢波结构^[8],螺旋结构对微波信号相位的延迟关系如下^[8]:

$$\Delta\varphi = \frac{\omega}{v}l - \frac{\omega}{c}d = \frac{\omega}{c}l - \frac{\omega}{c}d = \frac{2\pi}{\lambda}(l/p - d) = \frac{2\pi}{\lambda}\{l\sin\alpha + [(2t+1)/2t](l\cos\alpha/C) - d\} = (2t+1)\pi, (t \geq 2) \quad (4)$$

式中,螺旋中的相速和光速比 $p = \frac{v}{c} = \frac{1}{\sin\alpha + [(2t+1)/2t](\lambda\cos\alpha/C)}$, v 是微波沿着螺旋传播的相速度, c 是自由空间光速, t 是螺旋匝数, ω 是角频率, l 是螺旋线的总长, d 是 t 匝螺旋总高度, α 是螺旋升角.

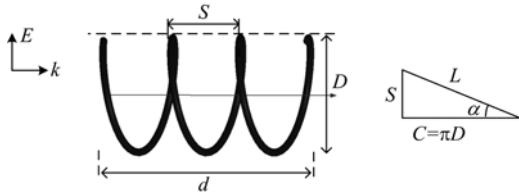


图 4 螺旋结构图

Fig. 4 The structure of a helix

将螺旋结构置于偶数波带片上,可延迟通过其中的微波相位. 将多个螺旋结构置于多个偶数区波带片上,形成如图 5 所示螺旋阵列,补偿微波从奇、偶波带片到焦点的相差,实现微波能量的汇聚. 由式(4)实现 $(2m+1)\pi$ 的相位补偿,螺旋的匝数应为整数. 由图(5)可以看出,第 n 个螺旋波带片的宽度为:

$$w_n = \rho_{n+1} - \rho_n (n = 1, 3, \dots) \quad (5)$$

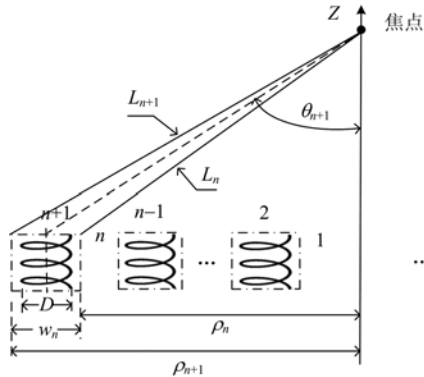


图 5 对称螺旋微波波带片透镜的左半部分图

Fig. 5 The schematic of the left part of the symmetric helix microwave zone plate lens

当焦距 F 为 10λ 时,不同位置(不同 n)对应的螺旋波带片的宽度如图 6 所示.

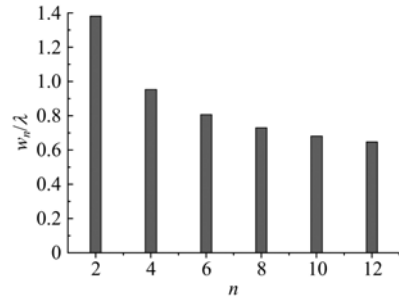


图 6 螺旋波带片宽度

Fig. 6 The width of the n th zones

为了保证所有的螺旋在特定工作频率具有相同的移相特性,阵列中的螺旋应该有相同的结构和尺寸,但是从图 6 可以看出,第一个螺旋波带片的宽度较大,近似为其他宽度的两倍,其余螺旋波带片宽度大致相同. 故在本文的螺旋微波波带片透镜的研究中,拟用两排螺旋阵列组成第一波带片,其他波带片用一排螺旋阵列构成,如图 7 所示.

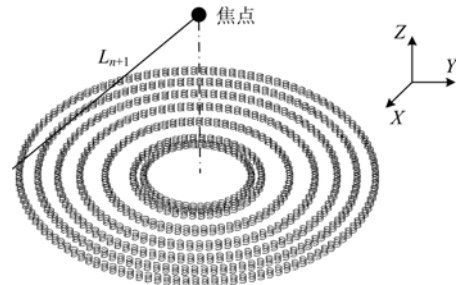


图 7 螺旋波带片透镜

Fig. 7 The layout of final helix microwave zone plate lens

2 光学菲涅耳透镜设计

菲涅耳透镜是由一系列小棱镜构成的平板薄片透镜^[9-11]. 当光线垂直入射时,菲涅耳透镜上一个齿的光路情况如图 8 所示. 其中, n 为透镜材料折射率, β 为小棱镜倾斜角, γ 为折射角, F 为焦距; h 为该齿中心到焦轴的距离.

由几何原理得

$$\tan(\gamma - \beta) = \frac{h}{F} \quad (6)$$

由折射定律得

$$\sin \beta n = \sin \gamma \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得

$$\beta = \arctan \left\{ \frac{h}{n \sqrt{F^2 + h^2} - F} \right\} \quad (8)$$

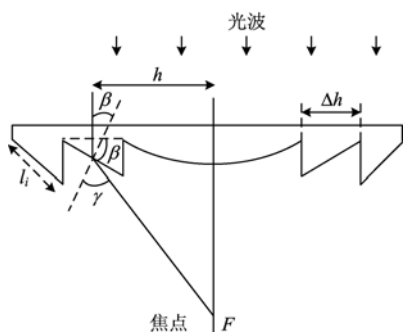


图 8 光学菲涅耳透镜示意图

Fig. 8 The schematic of an Optical Fresnel lens

当光波正入射时,这些小棱镜使光线偏折并向焦点处汇聚,根据式(8)可以求出菲涅耳透镜不同位置上小棱镜的倾斜角。

3 集成透镜设计

作为实例,本文设计了一个工作频率为 11.8 GHz、焦距为 31cm 的螺旋波带片透镜,其中螺旋的直径 D 和节距 S 分别为 1.1 cm (0.43λ) 和 0.7 cm (0.28λ)。螺旋波带片透镜由 6 对环形波带片(6 个螺旋波带片,6 个空气波带片)构成,每个螺旋波带片中心和焦点连线与焦轴的夹角 θ_n (如图 5 所示)的值如表 1 所示。

表 1 螺旋波带片中心和焦点连线与焦轴的夹角 θ_n

参数	波带片 1	波带片 2	波带片 3	波带片 4	波带片 5	波带片 6
θ_n	θ_2	θ_4	θ_6	θ_8	θ_{10}	θ_{12}
值($^\circ$)	18.7	28.1	34.3	39.0	42.9	46.0

位于不同 θ_n 处,不同匝数单个螺旋对正入射平面波电磁能量的汇聚效果如图 9 所示。

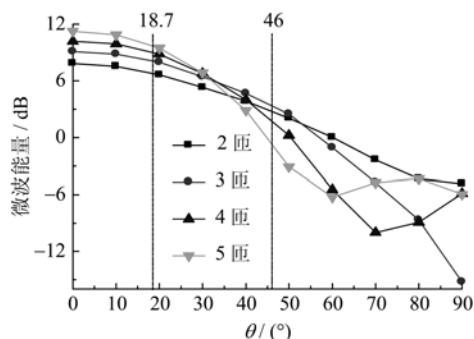


图 9 不同匝数、不同 θ_n 处单个螺旋对正入射微波能量的汇聚效果, $f = 11.8$ GHz
Fig. 9 The convergency of microwave by HAL with different turns and θ_n , $f = 11.8$ GHz

由电磁波理论可知,当螺旋匝数 ≥ 3 ,周长约为 1λ 时,螺旋间耦合很小^[6],所以利用螺旋阵列构成波带片时,可以不考虑螺旋间的耦合.将上述能量分布相加可得由不同匝数螺旋构成的透镜对微波的聚焦能力,如表 2 所示.由表 2 可以看出,采用 3 匝螺旋作为组阵单元时,透镜具有最强的聚焦能力。

表 2 不同匝数螺旋的不同波带片在焦点处对微波能量的汇聚效果

Tab. 2 The convergency effect for microwave energy in different microwave zone plate with different turns

波带片位置	不同螺旋匝数的微波能量/dB			
	2 匝	3 匝	4 匝	5 匝
波带片 1	6.8	7.1	9	9.6
波带片 2	5.5	6.7	7.1	7.3
波带片 3	4.6	5.7	5.6	5.1
波带片 4	4	4.9	4.2	3.2
波带片 5	3.2	4	2.9	1.1
波带片 6	2.7	3.3	1.8	-0.8
总和	26.8	31.7	30.6	25.5

为了与传统的金属片波带片透镜进行比较分析,在 HFSS 中分别对螺旋波带片透镜与金属波带片透镜建模仿真,均用 1 V/m 的平面波作为入射波,二者焦轴上的电场分布如图 10 所示.由图 10 可以看出,螺旋波带片透镜对微波的汇聚强度相比于传统金属片波带片透镜高出了 61.8%。

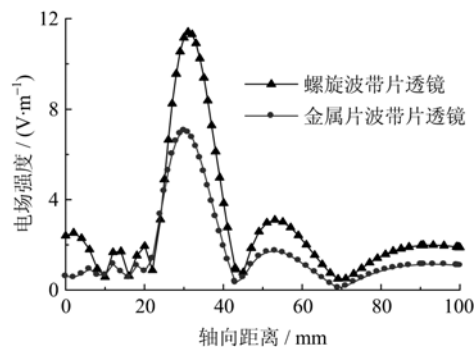


图 10 螺旋波带片透镜与金属片波带片透镜汇聚强度比较
Fig. 10 Comparison of focusing properties of the present helix microwave zone plate lens and the traditional microwave zone plate lens

同时,根据光学菲涅耳透镜的特性,小棱镜的宽度 Δh 越小,透镜的聚光性能越好,考虑到加工精度,取 $\Delta h = 0.07$ cm.所采用的菲涅耳透镜由 PMMA 有机玻璃制成,折射率 $n = 1.5$,焦距 $F = 31$ cm。

小棱镜尺寸 ($l_{\max} < 0.89$ mm) 的光学菲涅耳透镜对微波影响的仿真结果如图 11 所示.由图 11 可

见,小棱镜尺寸光学菲涅尔透镜对微波传输影响很小,因而小棱镜尺寸光学菲涅尔透镜可以和微波透镜结合构成微波可见光集成透镜.

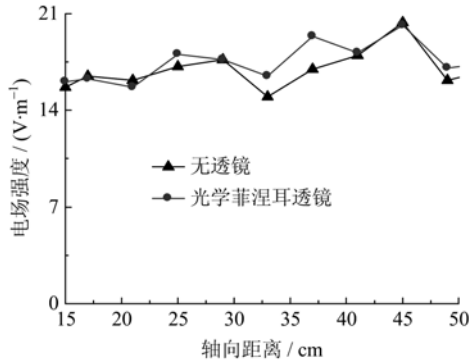


图 11 小棱镜尺寸光学菲涅耳透镜对微波的影响
Fig. 11 The effect of Optical Fresnel lens on microwave

为实现光波与微波分离汇聚,光学透镜与微波透镜的焦轴不能共线.拟将微波透镜和菲涅尔光学透镜偏轴部分重合放置(图 12(a)),则可以实现对可见光和微波的分离聚焦.本文选取图 12(a)中的虚线区域作为微波透镜和菲涅尔光学透镜集成区域,光学透镜和微波透镜分别选取 35 cm×35 cm 的菲涅耳透镜和由 164 个螺旋组阵构成的螺旋波带片透镜,最后制作的实物如图 12(b)所示.

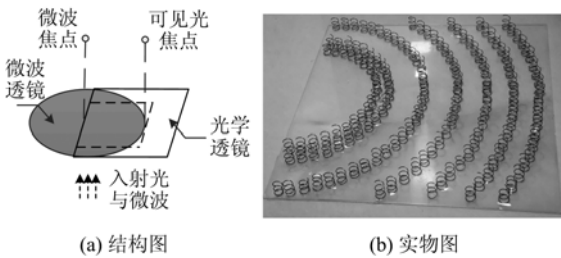


图 12 集成透镜结构图和实物图
Fig. 12 Schematic and photo of the present the integrated lens

4 仿真和测试结果

使用微波和光波测试系统分别对集成透镜的可见光汇聚、微波汇聚功能进行实验测量.微波暗室测量装置如图 13 所示,其中喇叭天线用来发射近似平面波(14.3 V/m),场强仪用来测试空间电场强度,坐标系用来确定焦点的位置.场强仪可在滑轨上移动,测量不同位置的电场强度.

X-Y 平面内电场强度实验测量结果如图 14 所示.由图 14 可知,集成透镜可将入射的平面波汇聚到点(17 cm, 30.5 cm, 0 cm)附近.透镜轴向和横向电场强度实测值与 HFSS 仿真值的比较如图 15

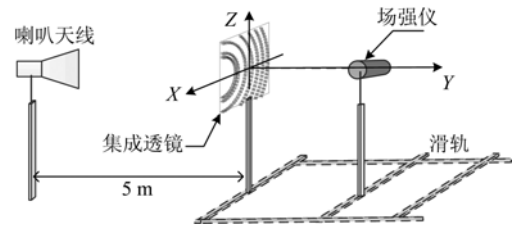


图 13 电场强度测试装置
Fig. 13 The E-field intensity distribution measurement setup

所示.从结果可以看出,集成透镜的轴向电场与横向电场的变化趋势与仿真结果基本一致,其幅度上的差异主要原因是:实测中,天线工作频率为 11.8 GHz,天线距透镜距离为 5 m,满足远场测试条件,但天线入射到透镜表面的电磁波与仿真中的理想平

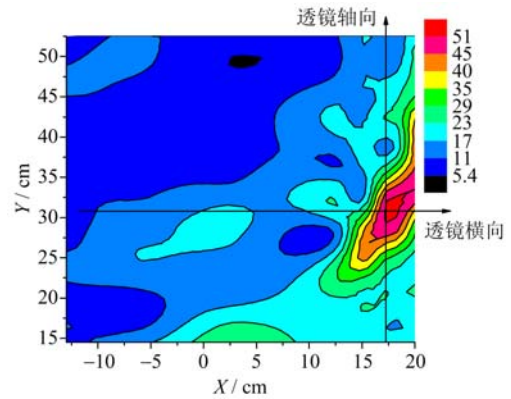


图 14 X-Y 平面实测电场强度值
Fig. 14 X-Y plane mapping of the measured E-field intensity

面波仍有一定的差异;场强仪具有一定的空间体积,测试给出的是该体积空间内电场强度的平均值,不能测出每个点的精确电场强度.

光学实验结果如图 16 所示.由图 16 可知,集成透镜可将垂直入射的平行光束汇聚到点(-17.5 cm, 120 cm, 0 cm)附近.比较图 14 与图 16 可以看出,集成透镜可同时将入射的微波与光波分别汇聚到两个不同的点,二者横向距离 35 cm.

为验证集成透镜的宽频特性,测试了透镜在不同微波频率下的汇聚作用.实验结果如图 17 所示,工作频率为 11.8 GHz 时透镜的汇聚作用最强,且在很宽的频率范围内都有汇聚作用.

5 结论

本文首次提出了由螺旋阵列构成的微波透镜,与金属片透镜和介质透镜相比,该透镜对微波的汇聚效率更高,更轻便.在此基础上,将菲涅耳透镜与之集成,形成可将同时入射的光波与微波分离聚焦

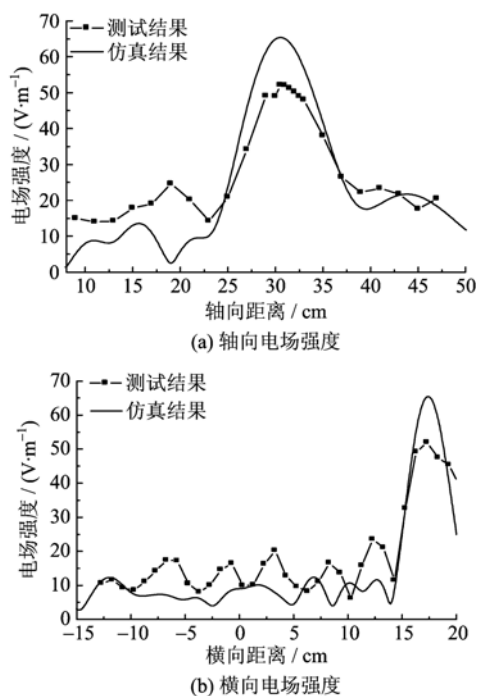


图 15 仿真和实测结果比较(工作在 11.8 GHz)

Fig. 15 Comparison of simulation and experimental results at 11.8 GHz

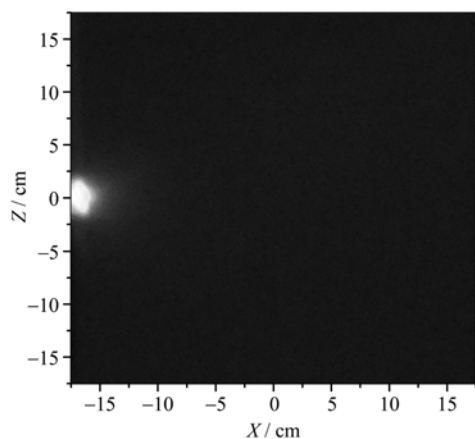


图 16 光波焦平面 ($y=37$ cm) 处的光强分布

Fig. 16 The focal plane for the optical wave at $y=37$ cm
(The focal length of the OFL is 37 cm)

的集成透镜. 通过在微波与光波汇聚点处分别放置微波天线和太阳能电池板, 可实现太阳能发电和接收/发射电磁波功能. 实验结果与仿真结果基本一致, 验证了本文设计方法的可行性.

参考文献 (References)

[1] Wu Y P, Eames P, Mallick T, et al. Experimental characterisation of a Fresnel lens photovoltaic concentrating system[J]. Solar Energy, 2012, 86(1):

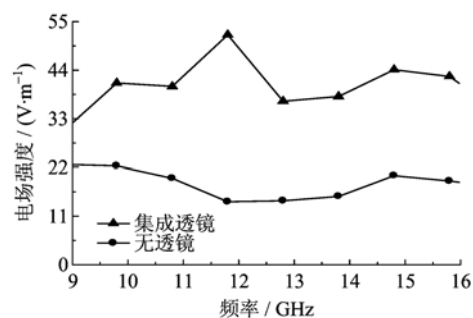


图 17 集成透镜汇聚微波的特性随频率变化关系

Fig. 17 The focusing properties of the integrated lens as the frequency changes

430-440.

- [2] Ryu K, Rhee J G, Park K M, et al. Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system[J]. Solar Energy, 2006, 80(12): 1 580-1 587.
- [3] Bogosanic M, Williamson A G. Microstrip antenna array with a beam focused in the near-field zone for application in noncontact microwave industrial inspection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2 186-2 195.
- [4] Hristov H D, Feick R, Grote W, et al. Indoor signal focusing by use of Fresnel zone plate[J]. Electronics Letters, 2003, 39(1): 67-68.
- [5] Karimkashi S, Kishk A A. Focusing properties of Fresnel zone plate lens antennas in the near-field region [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(5): 1 841-1 847.
- [6] Fan Y J, Ooi B L, Hristov H D, et al. Compound diffractive lens consisting of Fresnel zone plate and frequency selective screen[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2010, 58(6): 1 842-1 847.
- [7] Hristov H D, Rodriguez J M. Design equation for multielectric Fresnel zone plate lens [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(11): 574-576.
- [8] Kraus J D, Marhefka R J. 天线[M]. 三版, 北京: 电子工业出版社, 2006: 196-224.
- [9] 余随渐, 吴晗平, 熊衍建, 等. 太阳能采集用 1 000 mm 口径菲涅耳透镜设计[J]. 光电技术应用, 2009, 25(5): 35-38.
- [10] Sierra C, Vázquez A J. High solar energy concentration with a Fresnel lens [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(6): 1 339-1 343.
- [11] Guo J Q, Ohmori H, Uehara Y, et al. Diamond cutting of a large off-axis Fresnel lens mold [J]. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2009, 27(3): 1 345-1 350.