一种太赫兹平面波面整形透镜设计

郑靖奎，马云贵

（浙江大学光电信息工程学系，杭州 310058）

摘要：基于传输线模型和弯曲金属线结构，设计一组太赫兹波段下波面整形透镜设计的基本单元，并据此进一步提出一种波面整形透镜的设计方案。此设计具有在亚波长尺度上对太赫兹波传输进行高效调制的重要特点，对太赫兹技术的发展推广和实际应用具有重要意义。

关键词：光学；太赫兹；波面整形透镜；负介电常数；相位调制

中图分类号：O436.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-2850(2014)15-1535-06

A design of a planar meta-lens for manipulation of terahertz wavefront

ZHENG Jingkui, MA Yungui

(*Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*)

Abstract: Based on the transmission-line model and a meander metal line structure, we proposed a design of a set of phase-modulating units working at terahertz, and a further design of a terahertz wavefront-shaping len was proposed. This proposal is demonstrated for terahertz wave transmission with high efficiency over a subwavelength scale, which yields crucial benefits for terahertz technology improvements and applications.

Key words: optics; terahertz; wavefront-shaping len; negative dielectric constant; phase modulation

0 引言

太赫兹波通常是指频率在0.3～3.0 THz范围的电磁波，对应波长大约在1 000～100 μm，介于微波与红外波段之间。

至今，太赫兹技术在越来越多的领域有重要应用，包括信息通信、生物医药科学与医疗、无损测量、国土安全、食品农作物质量控制、环境监控、超快计算等[1]。太赫兹技术的发展也对相关器件提出了新的要求，波面整形透镜就是其中十分重要的一种。

传统透镜通过电磁波在介质内部传输过程中累积的相位变化实现对波面的控制和塑造。这使其受制于材料本身的固有特性和参数，并且由于需要相位变化的积累，在原理上必然也需要具有可观的厚度，这使得波面整形透镜在设计、体积、结构等方面仍然受到一定限制。而如果能使通过光程积累的相位变化经由在平面表面的相位突变完成，就可以实现“平面透镜”。这种超平面与三维结构超材料相比，在厚度、制造复杂度上有更大优势。近来有研究已经通过在单一表面上引入适当设计的离子作用进而引入受控的相位梯度不连续地证明了应用于折射的“广义斯涅尔定律”[2]，并且在微波段通过纳米天线技术实现了多种超表面，可以实现接近任意角度折反射、聚焦、涡旋光等多种波面整形效果[2～4]。而射频下频率选择表面的概念可以结合纳米天线技术，通过电路理论更好地阐释了超表面并促进其设计。而如何在不同波段实现更优秀的设计、如何将相关方案和经验推广应用到太赫兹波段，也是当下波面整形器件研究的一大热点。

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20110101120059）

作者简介：郑靖奎（1992—），男，本科生，主要研究方向：新型人工电磁介质、纳米光学器件与技术

通信联系人：马云贵，研究员，主要研究方向：新型人工电磁介质、纳米光学器件与技术. E-mail：yungui@zju.edu.cn

研究在 MONTICONE 等[5]提出的中红外波段 3 层超表面叠堆基础上，首先阐述相关研究背景，再展示基于理论设计出的太赫兹波面整形透镜模型建模仿真后的结果并加以讨论。研究成果对太赫兹检测通讯等技术有重要应用意义。

1 基于超表面堆叠的中红外波面整形透镜

基于不同填充材料实现纳米电路的研究[6]，MONTICONE 等[5]提出了一种能够实现高效、偏振不敏感、宽相位调制范围的超材料结构，改进了 MEMARZADEH 等[7]提出的双层超表面堆叠，采用 3 层堆叠扩大相位控制范围，并且验证了反常折射、聚焦等波面整形效果。这对太赫兹波段实现高效波面整形透镜设计具有重要启示意义。

在 MONTICONE 等[5]的设计中，首先根据所需波面整形效果计算出波面整形透镜平面上各点所需的相位调制量，再根据中传输线模型与相位—阻抗关系设计出以 45°步长覆盖 360°相位调制范围的 8 组基本单元[5]，据此将相应单元放置在波面整形透镜的相应位置，实现波面对应的整形效果。

具体设计结构如图 1 所示。其基本模块是一个复合方形纳米粒，离子部分（红色）具有负介电常数 ε_p，电介质部分（蓝色）具有正介电常数 ε_d，可分别视为纳米电感和纳米电容[8]，并且当电场与界面垂直时被并联起来[6,9]。当其形成一维重复结构时，就成为了具有等效阻抗（沿纳米棒的单位方向上）的超表面。

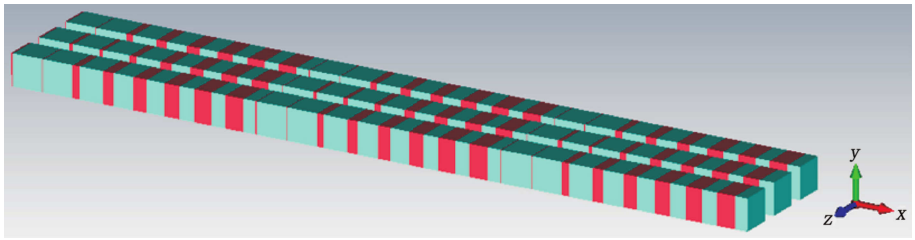


图 1 超结构及其基本单元

Fig. 1 Metastructure and its basic units

在具体材料选择上，诸如掺 Al 氧化锌半导体材料这类非金属的离子材料由于中等损耗和较大可调谐性[10]，十分适合于实现这一频段的纳米电路。在 3 μm 波长上，掺 Al 氧化锌遵从经典 Drude 模型 $\varepsilon_p=\varepsilon_\infty-[\omega_p^2/\omega(\omega+i\gamma)]$，其中 $\varepsilon_\infty=3.3$，$\omega_p=2\pi352.2$ THz，$\gamma=2\pi30.4$ THz. 如果考虑损耗，等效电路则应当被修正加入一个并联纳米电阻。电介质部分采用了 Si，其在 3 μm 波长下相对介电常数 $\varepsilon_d=11.77$[11]. 其中，纳米单元的尺度在亚波长级别，并且在现有纳米技术下可实现[6]。在中央谐振区周围，不同数值的感性和容性电抗均可在大范围上获得。

这一结构具有在亚波长尺度上高效实现波面整形，同时对入射电磁波偏振与入射角不敏感等多种优点。

2 仿真设计

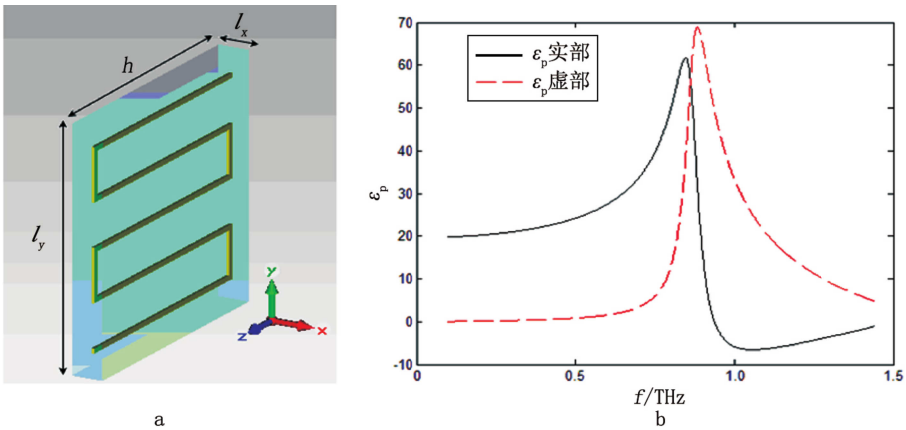
2.1 弯曲金属线结构

要在太赫兹波段（应用频率为 1 THz）实现类似的平面波面整形透镜设计，首先需要找到具有负介电常数的材料或结构，实现 3 层超表面堆叠基本单元中的离子材料部分。

文献[12]设计的弯曲金属线结构因其近零的磁导率特性可用于微波段的吸收体制作。但是，该结构可通过金属线间距、介质等参数调谐的谐振频率和其具有的负材料特性使该结构可以作为一种负介电常数超结构应用于本设计。

更值得注意的是，这种结构需要沿波矢方向和电场方向有一定传播距离，即结构厚度，而在磁场方向上只具有很小的厚度，这恰恰适用于太赫兹波段超结构波面整形透镜设计。做出一定调整后的弯

曲金属线基本结构和在太赫兹波段的介电常数如图 2 所示。由图 2a 可知，该结构在 x 方向上仅具有很小的厚度。此结构可应用于电场沿 y 方向、磁场沿 x 方向、波矢沿 $-z$ 方向的正入射电磁波。结构参数 $l_x=3\ \mu m$，$l_y=25\ \mu m$，$h=25\ \mu m$，介质介电常数 $\varepsilon_h=2.9$，内部金属线宽 500 nm、沿 x 方向厚 250 nm、间距 sp=4.5 μm. 图 2b 为对应等效介电常数曲线。



a b

图 2 太赫兹波段弯曲金属线基本结构模型和参数

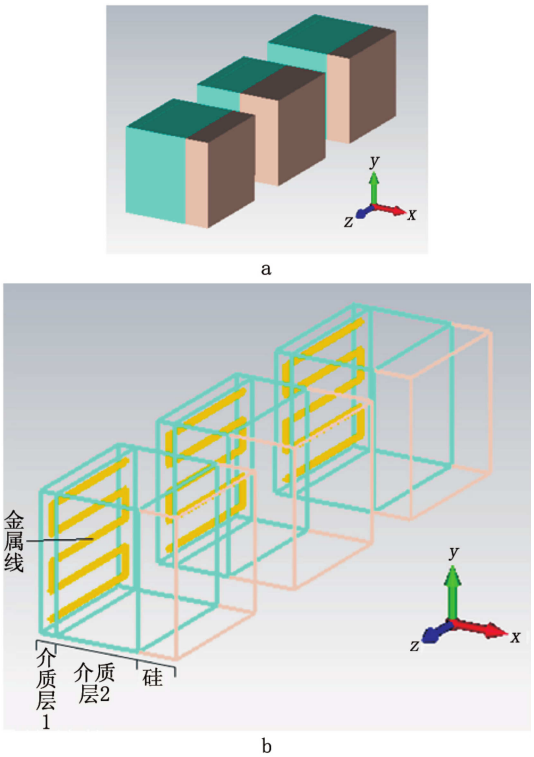
Fig. 2 Basic structure model of a meander metal line working at terahertz band and its parameters

a—基本结构模型；b—太赫兹波段的介电常数

a-Basic structure model; b-Dielectric constant (ε) at terahertz band

设计中考虑实际情况，特别是制造加工技术，采用“弯曲金属线基本结构＋介质＋硅”方案，如图 3 所示。图 3a 为具有固定相位调制值的 3 层超表面堆叠基本单元，由 3 个超表面基本单元组成，每个基本单元采用“弯曲金属线基本结构＋介质＋硅”，弯曲金属线所在介质层 1（如图 3b 所示）（蓝色）与调整宽度用的介质层 2（如图 3b 所示）（蓝色）相同，$\varepsilon_h=2.9$；右侧电介质材料为硅（红色），$\varepsilon_d=11.77$. 图 3b 清楚地显示了金属线位置和各层结构。注意到金属线结构的间距、线数等参数，位置及其所在的第一层介质层的厚度在 3 个超表面基本单元中均相同，不同的只是第 2 层介质层及 Si 的厚度，这使得加工更加容易。

需要提出的是，采用弯曲金属线结构与原来中红外波段下采用负介电常数自然材料不同。在本课题组采用的 3 层超表面叠堆中，单元中具有负介电常数的离子材料部分的宽度随单元调制的相位值不同而变化。对于自然材料，以文献[5]中采用的掺 Al 氧化锌为例，根据 Drude 模型计算出的介电常数 ε_p 与材料宽度无关，即 ε_p 并不随离子材料宽度变化而变化。但对于使用的弯曲金属线结构而言，当介质宽度变化时，金属线与金属线之间的电容也随之变化。由于产生负介电常数的本质为谐振，因此当介质宽度变化时，金属线结构的介电常数 ε_p 也会发生变化，因此并不能简单地将图 2 中得到的介电常数值代入进行参数计算。实际仿真显示，当介质层宽



a b

图 3 相位调制单元结构

Fig. 3 Structure of a phase-modulating unit

a—单元基本结构；b—透视示意图

a-Basic structure of the unit;

b-Transparent diagram

度增加时，ε_p 实部绝对值减小、虚部也减小，这意味着需要较大的负介电常数部分厚度，而较小的 ε_p 虚部值则有利于降低损耗。

2.2 3 层超表面叠堆相位调制基本单元

如上文所述，3 层超表面叠堆设计具有高效、偏振不敏感及入射角要求低等优点。为在此基础上构造波面整形透镜，需要首先获得覆盖 2π 范围的 3 层超表面堆叠组成的相位调制基本单元，其设计方案如前文所述。通过调节介质层 2 的厚度可以得到具有不同相位调制值的基本单元，例如可能以 45°为步长覆盖 360°的 8 个基本单元。

表 1 给出了相位调制基本单元的相关参数，金属线及介质层 1 的参数如图 1 所示，其中单元总长、宽、高均为 25 μm，表 1 中相位调制值为仿真值。图 4 展示了其仿真结果。为更好地显示波面，每组相位调制单元重复 3 次，并独立仿真电场分布。图 4 将 7 组结果拼接在一起便于比较。由于显示原因及逐个仿真，可能造成图中结构大小、电场分布等的细微差异或微小失真，但不影响其总体相位调制效果的展示。所得结果与文献[5]中展示的中红外（3 μm）波段下的相位调制结构具有相似效果。注意到图 4 中经不同相位调制后的出射波面依次具有不同延迟，并且出射场强与入射场强相近，这体现了本结构高调制效率的优点。

表 1 相位调制基本单元参数

Tab. 1 Parameters of phase-modulating units

序号	外层介质层 2 宽度 w_1/μm	内层介质层 2 宽度 w_2/μm	相位调制值 θ/°
1	0	0	23.60
2	0	4	45.00
3	10	8	92.50
4	15	10	133.26
5	18	15	182.20
6	20	18	222.00
7	21	21	260.00

需要提出的是，上述设计获得了 23.60～260.00°的相位调制范围，并未完全覆盖 2π 范围。但实际仿真结果显示，这一调制范围已经能够获得较好的调制效果。

另外，仿真显示，通过增加金属线结构，例如采用 3 层或 2 层金属线而不是上述设计中所采用的 1 层金属线，可以覆盖 2π 相位调制范围。但此做法除了增加实际制造难度外，也会对调制效率有较大影响。以表 1 中 222.00°相位调制值的单元为例，如果采用双层金属线结构，仿真显示其相位调制值可达 326.00°，但此时其效率大约只有单层金属线结构的 1/4.

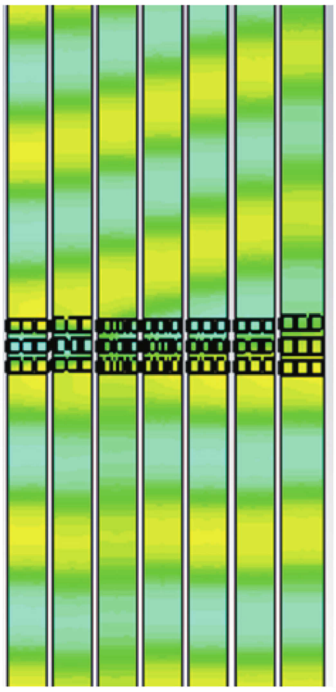


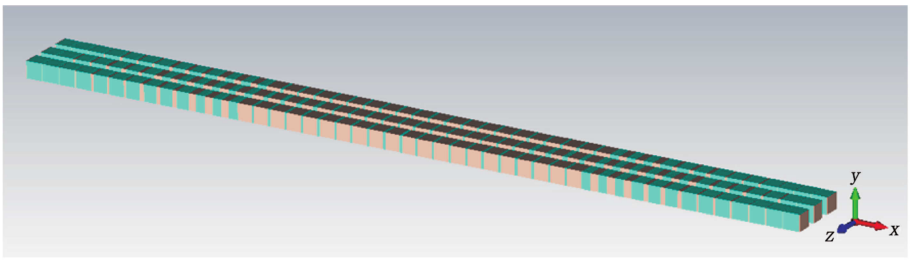
图 4 相位调制单元的仿真结果

Fig. 4 Simulation of phase-modulating units

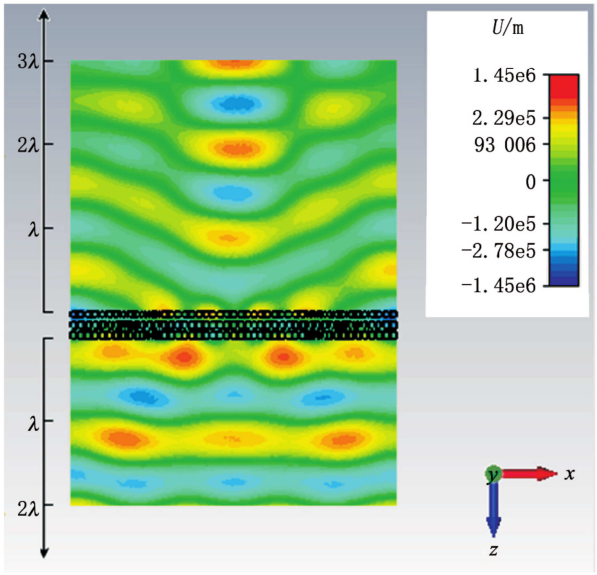
2.3 波面整形透镜

基于上述结果设计了 1 THz（波长 λ=300 μm）下的波面整形透镜。该透镜可以实现高效的聚焦效果，其焦距可通过不同相位调制单元排列来调节。研究采用的设计焦距 $f=2\lambda=600$ μm. 设计结构和仿真结果如图 5 所示。图 5a 为仿真采用的结构，其基本单元即前文所述设计。采用入射太赫兹波频率 1 THz，对应波长 λ=300 μm，电场沿 y 方向、磁场沿 x 方向、波矢沿 $-z$ 方向，正入射，图 5b 为仿真结果。可见在出射面内有聚焦现象，并且与设计焦距 2λ 吻合。

图 5 显示了较好的波面整形效果。需要注意的是，为更好地展



a



b

图 5　波面整形透镜（f=600 μm）的设计结构和仿真结果

Fig. 5　Structure and simulation of a wavefront-shaping len（f=600 μm）

a—波面整形透镜仿真结构；b—仿真结果

a-Structure of a wavefront-shaping len; b-Simulation result

示场分布，图 5 中标尺采用对数制，因此图中焦斑部分的场强远大于周围场强。

原理上，此波面整形透镜显然关于中心点镜像对称；仿真模型中，该波面整形透镜左右仅各 24 组单元，如果增加建模的单元数量，扩大透镜面积，显然会有更好的聚焦效果。

仿真结果可以说明此太赫兹波段相位调制基本单元的可行性，并且展示了其高效调制的优点。同时，研究表明其他波面整形效果的结构均可按上述基本结构和设计方法实现，例如一定角度折射等。

3　结论

在相关研究基础上结合计算与仿真，设计了对应太赫兹（1 THz）下具有负介电常数的弯曲金属线结构，基于此在考虑实际加工制造技术的基础上提出了 1 THz 下波面整形透镜相位调制基本单元的完整设计，并加以仿真优化，验证了本设计中相位调制基本单元的相位调制效果和高调制效率。最后，以固定焦距聚焦为例，采用此种相位调制基本单元，构造了 1 THz 下的波面整形透镜，仿真验证了其优良的聚焦效果。

在此基础上，通过调整优化相位调制基本单元，采用类似设计方案，可以设计出不同波段、不同频率下对应不同波面整形效果的高效、亚波长尺度波面整形透镜，这对于实现太赫兹波段波面整形，从而发展推广太赫兹技术应用具有重要意义。

[参考文献] (References)

[1] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.

[2] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.

[3] NI X, EMANI N K, KILDISHEV A V, et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. Science, 2012, 335(6067): 427.

[4] AIETA F, GENEVET P, KATS M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. Nano Letters, 2012, 12(9): 4932-4936.

[5] MONTICONE F, ESTAKHRI N M, ALÙ A. Full control of nanoscale optical transmission with a composite metascreen[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(20): 203903.

[6] SUN Y, EDWARDS B, ALÙ A, et al. Experimental realization of optical lumped nanocircuits at infrared wavelengths[J]. Nature Materials, 2012, 11(3): 208-212.

[7] MEMARZADEH B, MOSALLAEI H. Array of planar plasmonic scatterers functioning as light concentrator[J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2569-2571.

[8] ENGHETA N, SALANDRINO A, ALÙ A. Circuit elements at optical frequencies: nanoinductors, nanocapacitors, and nanoresistors[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(9): 095504.

[9] LIU N, WEN F F, ZHAO Y, et al. Individual nanoantennas loaded with three-dimensional optical nanocircuits[J]. Nano Letters, 2012, 13(1): 142-147.

[10] BOLTASSEVA A, ATWATER H A. Low-loss plasmonic metamaterials[J]. Science, 2011, 331(6015): 290-291.

[11] ICENOGLE H W, PLATT B C, WOLFE W L. Refractive indexes and temperature coefficients of germanium and silicon[J]. Applied Optics, 1976, 15(10): 2348-2351.

[12] ZHONG S, HE S. Ultrathin and lightweight microwave absorbers made of mu-near-zero metamaterials[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2083.