

太赫兹透镜天线的进展研究

陈屹聪, 王烁博, 翟国华, 高建军*

(华东师范大学 物理与电子科学学院, 上海 200241)

摘要: 太赫兹天线是未来第六代移动通信(6G)的重要组成部分, 其中太赫兹透镜天线因其高增益、稳定的辐射特性、低成本等优点, 受到广泛关注。太赫兹透镜天线不存在馈源遮挡的问题, 能够实现多种波束控制功能, 其聚焦功能可应用于成像系统, 也可在测试装置中起波束准直的作用。太赫兹制作工艺的进步使太赫兹透镜天线的加工精度更高、效果更好, 也进一步促进太赫兹透镜天线的发展。本篇综述总结了近五年报道的太赫兹透镜天线, 综合其功能、制作工艺、形态、应用场景等特点对它们进行介绍。

关键词: 太赫兹天线; 太赫兹透镜天线; 成像; 第六代移动通信

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A

A review on Terahertz lens antennas

CHEN Yi-Cong, WANG Shuo-Bo, ZHAI Guo-Hua, GAO Jian-Jun*

(School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Terahertz (THz) antenna is an indispensable component of the future 6G mobile communication, among which THz lens antenna has attracted extensive attention due to the merits of high gain, stable radiation performances, low cost etc. The THz lens antennas can operate without suffering from the problem of feeding occlusion, they can also realize the functions of beam control. The function of focusing can not only be applied in the imaging system, but also play the role of collimation in the test devices. The advancement of THz fabrication technology makes the THz lens antenna more precise and effective, which further promotes the development of the THz lens antenna. In this review, the THz lens antennas reported in the last five years are summarized by synthesizing their features such as functions, fabrication processes, morphologies, and applications.

Key words: THz antenna, THz lens antenna, imaging, 6G

引言

随着频谱资源的日益紧张, 对太赫兹(Terahertz, THz)频段的研究成为当今的热点方向。太赫兹波的工作范围在 100 GHz 到 10 THz 之间, 在成像、医学诊断、军事安全等领域有广泛应用。与毫米波相比, 太赫兹波的可用带宽更宽、方向性更强、抗干扰和保密性更好; 与光波相比, 则效率更高、穿透力更强^[1]。

太赫兹天线在太赫兹无线通信中起着举足轻重的作用, 其性能将直接影响整个系统的质量^[2]。由于太赫兹波在自由空间中传输损耗比较大, 因此

设计高增益、低损耗、低成本的太赫兹天线以补偿路径损耗就显得尤为重要。

一般情况下, 太赫兹天线的设计方法大多是沿用传统微波天线设计方法并对其进行改进。天线种类有太赫兹喇叭天线^[3]、太赫兹透镜天线^[4]、太赫兹传输阵天线^[5]、太赫兹反射面天线^[6]、太赫兹微带天线^[7]、太赫兹片上天线^[8]等。其中, 太赫兹透镜天线和太赫兹反射面天线都具有强大的波束控制能力, 且有高增益的优势, 但是相比于反射面天线, 透镜天线没有馈源遮挡的问题, 能适应更多的场景。由于频率上升到太赫兹段, 透镜天线的结构不再像

收稿日期: 2023-04-06, 修回日期: 2023-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(62034003)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62034003)

作者简介(Biography): 陈屹聪(1997-), 女, 博士生, 主要研究领域为新型天线设计等. Email: Chenyicong0323@163.com

*通讯作者(Corresponding author): Email: jgao@ee.ecnu.edu.cn

Received date: 2023-04-06, Revised date: 2023-08-27

大笨重,且随着现代太赫兹制作工艺的迅速发展,太赫兹透镜天线的加工集成也不再困难,应用日益广阔,因此对太赫兹透镜天线的研究引起了不少学者的注意。

在太赫兹频段,全金属透镜存在较大的欧姆损耗,因此近几年多采用介质来完成太赫兹透镜天线的设计,比如传统的硅^[9]、耐高温树脂^[10]、高分子材料聚乳酸(PLA)^[11]、聚四氟乙烯(PTFE)^[12]、聚甲基戊烯(TPX)^[13]等。太赫兹透镜天线实现的功能也很广泛,如利用全介质透镜产生涡旋波^[14]、基于3D打印技术的极化转换器控制极化类型^[15]、加载在漏波天线上提高天线的方向性^[16]、实现全息成像功能^[17]、作为成像或测试系统的波束准直^[18]等。

目前对太赫兹透镜天线的研究已经有很多突破性进展,本文将简要概括近五年报道的太赫兹透镜天线,对其功能、制作工艺、形态、应用等方面的特点进行介绍。

1 波束控制

太赫兹透镜天线一个非常重要的功能是通过调控太赫兹波的幅度相位等,来实现各种波束的产生^[19-25],比如常见的涡旋波^[11, 14, 19, 20]、贝塞尔波束^[21],或者实现一些波束性能的转变比如极化转换^[15, 24]、极化分束^[25]等。

如图1(a)所示,He等人利用3D打印技术,设计了两个工作在140 GHz的全介质透镜^[11]。这两个透镜均由42×42个介质单元组成,材料为有损聚乳酸,该透镜天线通过改变介质单元的高度实现360°相位变化,分别实现单偏转准非衍射轨道角动量(Oribital Angular Momentum, OAM)波和双偏转准非衍射OAM波。由于单元是各向同性的,其幅度相位不受入射波极化方向影响,而透镜天线的极化则取决于馈源的极化方向。透镜天线产生的涡旋波束半径在 $55.58\lambda_g$ (λ_g 为140 GHz处的波导波长)的范围内基本不变,传播方向也基本不变,在不同发射距离下的模式纯度几乎保持不变,均高于95%。

图1(b)是一个3D打印离散介质透镜天线^[21],材料为耐高温树脂,制造过程简单、成本低。离散介质透镜的单元由顶部六棱锥形防反射结构和底部六棱柱相位补偿器两部分组成,介质高度的变化使相位变化覆盖360°。文中将两个相同的平面内可旋转离散介质透镜组成一个太赫兹非衍射贝塞尔波束发射装置,它能够在300 GHz处进行全方位

覆盖的二维波束扫描,视场角高达86.2°。这两个透镜可以将喇叭天线发射的准高斯光束转换为伪贝塞尔光束,在同一方向和相反方向同时旋转两个离散介质透镜就可以分别在方位角和仰角上产生贝塞尔光束。该二维扫描太赫兹贝塞尔波束发射装置可被广泛应用于太赫兹快速非接触探测、跟踪和成像系统。

图1(c)中展示的是使用聚四氟乙烯制作成的双曲面平顶波波束成形透镜^[12],它可以将伪高斯波束在菲涅耳区特定距离处转换为平顶波束。该透镜的两个曲面分别起到准直和波束形成的作用。使用100 GHz的锥形喇叭天线作为馈源,在距离喇叭3 m处可以形成一个半径40 cm的高质量平顶波束,生成的平顶波束的半径也可以通过改变透镜和喇叭之间的相对距离来调节。

如图1(d)所示,由Amarasinghe等人提出了用于广角波束的扫描和接收的龙勃透镜^[22]。透镜的前端增加一个直径为1 mm的聚苯乙烯曲面圆柱形透镜,以消除垂直于透镜平面方向上的衍射。当放置在馈源天线(如喇叭天线)前面时,它可以用作大角度波束的接收器。当用作发射器时,透镜可以使输出光束在大角度范围内转向。实验表明,在130~180 GHz频率范围内,该天线可以接收二维平面上总收集角度为50°的波束。将透镜大约横向平移2.6 cm,可产生超过70°的广角光束转向。

图1(e)中给出的是一个工作频率为300 GHz的高增益线极化转圆极化透镜天线^[24],采用3D打印技术,由耐高温树脂制成,制作简便,成本低廉。透镜由离散变高介质柱和栅格组成,通过介质柱的高度变化来实现所需的传输相位。每个介质柱上面挖出一个长方体凹槽,用于防反射,下层的栅格则利用各向异性,起到极化转换器的作用,将标准线极化角锥喇叭发出的线极化入射波转化为圆极化波。该透镜在300 GHz可实现右旋圆极化辐射,增益为30.8 dBic,其1 dB增益带宽和3 dB轴比带宽分别达到13.3%和18.8%。

图1(f)展示的是由Zhu等人提出的工作在140 GHz的极化分束透镜天线^[25],左边的是罗雄棱镜(中间产物),右边的是菲涅尔-罗雄棱镜,均利用熔融沉积成型(Fused Deposition Modelling, FDM)3D打印技术制作而成,材料为聚乳酸。菲涅尔-罗雄棱镜由离散的介质栅格构成,调节介质栅格的尺寸,可以控制沿x方向和y方向的折射率张量,因此

可以独立调控正交极化波之间的偏转角。将菲涅耳原理应用于该罗雄棱镜,可以在保持极化分束偏转角度不变的情况下,大大减小透镜的厚度和重量。同时,由于在介质中损耗的能量较少,也提高了棱镜的传输效率。此外,与传统的由两个直角三角形棱镜组成的罗雄棱镜相比,菲涅耳-罗雄棱镜制造简单、无需进一步组装。在140 GHz处,x极化和y极化波之间的偏转角为 7° ,x极化入射时,菲涅耳-罗雄棱镜的峰值增益为24.8 dBi,y极化入射时增益峰值为25.6 dBi。

表1对上述波束控制太赫兹透镜天线进行了总结,可以看出3D打印技术在太赫兹透镜天线的加工制造中非常受欢迎,特别是离散介质透镜的加工。这是因为3D打印技术的飞速发展使离散介质透镜的制作精度更高,生产时间和成本大幅降低。

2 增益增强

作为一种典型的高增益天线,太赫兹透镜天线呈现出非常优秀的辐射特性,并可以放置在馈源天线主辐射方向上,起到增强方向性、提高增益、降低旁瓣、提高有效各向同性辐射效率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)的作用^[13, 16, 26-42]。

如图2(a)所示,是由Kokkonen等人设计的一个工作在220~330 GHz的超轻高定向性透镜天线^[26]。该天线呈子弹形,由氧化钼锂(Li_2MoO_4 , LMO)空心玻璃微珠(Hollow Glass Microspheres, HGMS)陶瓷复合材料制成,重量仅5克。透镜天线由波导馈电,焦距1.5 mm,波束很窄,半功率波束宽度仅为 2.5° ,增益为27.5 dBi,旁瓣为18 dB。

图2(b)中的超半球面硅透镜组装在一个 4×2 的振荡器辐射源阵列上^[27],工作频率670 GHz硅透镜的直径为12 mm,高7.1 mm。透镜的作用是抑制衬底模式的聚集,并进一步增加馈源的指向性。文献[28]中也提到一个半球形硅透镜,它与相干光导脉冲源连接阵列结合,提高了阵列的方向性。

表1 用于波束控制的太赫兹透镜天线

Table 1 THz lens antennas for beam control in references

参考文献	结构	技术	材料	工作频率	功能
[11]	离散介质	3D打印	聚乳酸	140 GHz	产生偏转准非衍射OAM波
[12]	双曲面	-	聚四氟乙烯	100 GHz	产生平顶波束
[21]	离散介质	3D打印	耐高温树脂	300 GHz	发射非衍射贝塞尔波束
[22]	超半圆+圆柱	3D打印	金属+聚苯乙烯	130~180 GHz	扫描和接收广角波束
[24]	离散介质	3D打印	耐高温树脂	300 GHz	高增益线极化转圆极化
[25]	离散介质	3D打印	聚乳酸	140 GHz	极化分束

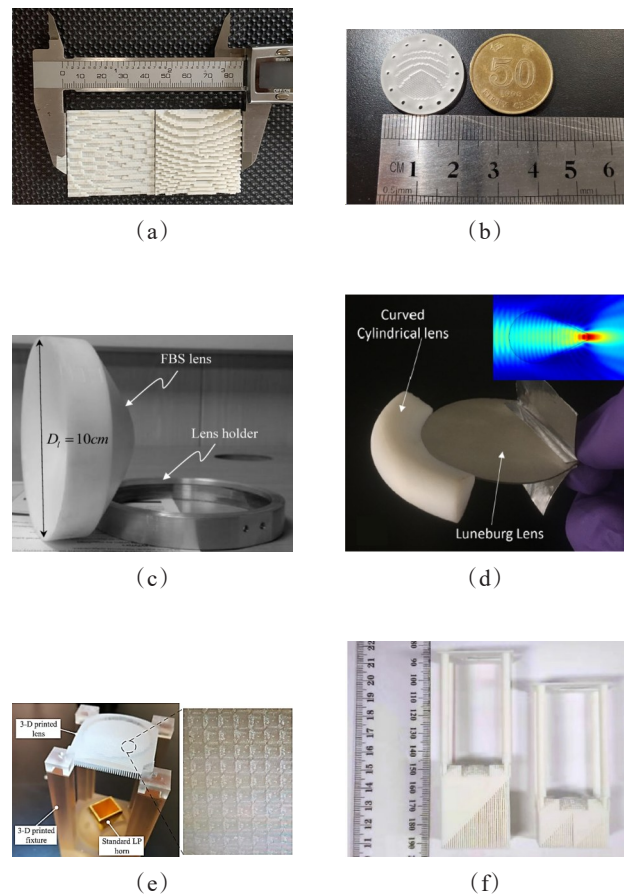


图1 (a)准非衍射OAM透镜,图片引用自文献[11],(b)非衍射贝塞尔波束发射透镜,图片引用自文献[21],(c)平顶波束透镜,图片引用自文献[12],(d)龙勃透镜,图片引用自文献[22],(e)线极化转圆极化透镜,图片引用自文献[24],(f)极化分束器,图片引用自文献[25]

Fig. 1 (a) Lens for quasi-nondiffractive OAM waves, and the picture is quoted from Ref. [11], (b) nondiffractive Bessel beam launcher, and the picture is quoted from Ref. [21], (c) flat-top beam shaper, and the picture is quoted from Ref. [12], (d) Luneburg lens, and the picture is quoted from Ref. [22], (e) LP-CP converter, and the picture is quoted from Ref. [24], (f) polarization beam splitter, and the picture is quoted from Ref. [25]

图2(c)中展示的是加载在漏波天线上的半圆柱形聚四氟乙烯透镜,其直径为3.8 mm^[16]。当频率调至280~330 GHz时,太赫兹波束从与法向夹角6°扫描到39°,扫描率约为0.7°/GHz,整体扫描范围为33°。光束方向几乎不受半柱面透镜的影响,加载透镜使天线的方向性从14dBi增加到23dBi。

在图(d)中,聚甲基戊烯透镜加载在CMOS超宽带调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)雷达表面,其工作频段为220~320 GHz^[13]。该雷达的高并行性频谱传感显著降低了太赫兹前端电路的带宽要求,并能保证在整个频段保持峰值输出功率和灵敏度。增加透镜能使雷达的EIRP从0.6 dBm提高到20 dBm。

除了常用的硅、聚四氟乙烯、聚甲基戊烯,蓝宝石纤维也经常应用于太赫兹透镜的加工和设计。如图2(e)所示,圆柱形蓝宝石纤维透镜放置在光导天线上,可用于增强大面积光导天线的发射功率^[29]。通过优化蓝宝石纤维的直径,最终发现当蓝宝石纤维厚度为220 μm,间隙大小为10 μm时,可以有效地将光载流子限制在光导天线电极附近。这使得在蓝宝石光纤和半导体与天线终端之间的接口处入射电磁波的耦合增强了约40倍,将大面积光导天线发射器的总效率提高到约7~10倍。

图2(f)中的平面透镜使用聚合物和金属增材3D打印技术,由24×24个不同尺寸的金属光栅超表面单元组成,能够实现0°~315°的局部相移^[30]。与传统的介质透镜相比,二维的平面透镜厚度极薄,在高度上节省空间,同时该透镜能够实现约15 dB的增益提高。

表2总结了上文中提到的高增益太赫兹天线的各项性能,可以看出用于增益提升的太赫兹透镜天线通常是沿用传统曲面透镜的形状,制作简单、效果明显。而且所用到的材料多种多样,可以满足各种性能需求,适用场景广泛。

3 聚焦准直

最初的透镜天线常被做成中间厚两边薄的形状,用于对光波或电磁波进行聚焦或准直。平行的波束经过透镜折射,在透镜焦点处汇聚;反之,处于透镜焦点处的馈源辐射出的波经过透镜折射,就可以实现平行波束。目前对透镜聚焦功能的应用越来越多样化^[10, 17, 43-56],准直功能也被广泛应用于各种成像或测量系统中^[18, 57-60]。

如图3(a)所示,在文献[10]中,Wu等人设计

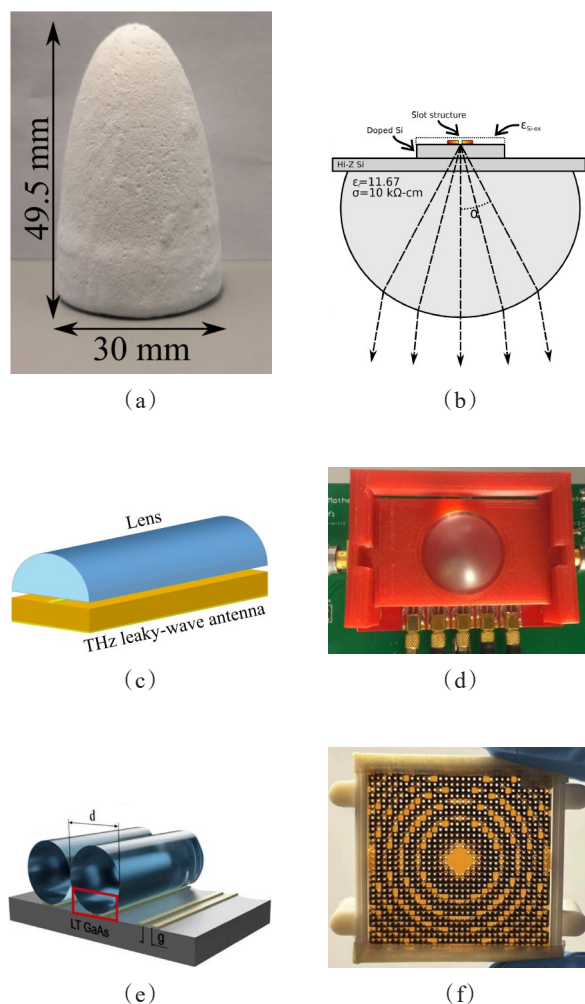


图2 (a)子弹形陶瓷复合透镜,图片引用自文献[26],(b)超半球形硅透镜,图片引用自文献[27],(c)半圆柱形聚四氟乙烯透镜^[16],(d)半球形聚甲基戊烯透镜,图片引用自文献[13],(e)圆柱形蓝宝石纤维透镜,图片引用自文献[29],(f)3D打印平面透镜,图片引用自文献[30]

Fig. 2 (a) Bullet shaped ceramic composite lens, and the picture is quoted from Ref. [26], (b) hyperhemispherical Si lens, and the picture is quoted from Ref. [27], (c) hemicylindrical PTFE lens^[16], (d) hemispherical TPX, and the picture is quoted from Ref. [13], (e) cylindrical sapphire-fiber lens, and the picture is quoted from Ref. [29], (f) 3D printed planar lens, and the picture is quoted from Ref. [30]

了一对基于3D打印的离散介质透镜,透镜轻薄、损耗小、制作工艺简单、成本低,介质选用耐高温树脂,不易刮伤和变形。可变高度的介质柱作为透镜的单元,可通过改变其高度来补偿两个透镜之间的传输相位实现360°相位覆盖。两个离散介质透镜组合成一个三维近场聚焦扫描透镜天线,为三维

表2 高增益太赫兹透镜天线

Table 2 High gain THz lens antennas in references

参考文献	形状	材料	工作频率	应用
[13]	半球形	聚甲基戊烯	220~320 GHz	CMOS 超宽带调频连续波雷达
[16]	半圆柱	聚四氟乙烯	280~330 GHz	漏波天线
[26]	子弹形	氧化钨锂空心玻璃微珠陶瓷复合材料	220~330 GHz	-
[27]	半球形	硅	670 GHz	振荡器辐射源阵列
[28]	半球形	硅	100~600 GHz	光导脉冲源
[29]	圆柱形	蓝宝石纤维	-	光导天线
[30]	平面超材料	聚合物和金属增材 3D 打印	140 GHz	调频连续波雷达

太赫兹成像应用开辟新的途径。图3(a-ii)给出了当频率为300 GHz时,在距离透镜0.5、4.5和8.5 mm处的平面上的焦点分布,证明同步反向旋转和同向旋转两个离散介质透镜可以分别在径向和切向上扫描其焦点,因此该透镜天线可以结合旋转和线性平移实现三维聚焦扫描。实验表明在300 GHz频率下,直径为15 mm的透镜天线可以在直径29 mm、长度8 mm的三维圆柱空间内扫描焦点。

图3(b)中展示了基于二氧化钒绝缘体-金属转变的热可切换太赫兹多聚焦透镜^[43],该透镜由C形槽超表面阵列组成,能够在0.3~1.2 THz范围内实现多个焦点的聚焦效果。当温度高于 T_c (~68 °C)时,二氧化钒材料表现出金属特性,透镜功能开启,即超表面将输入的x极化太赫兹波转换为经过所需相位和幅度调制的y极化波,然后将y极化太赫兹平面波聚焦到四个焦点。在温度低于 T_c 时,透镜呈关闭状态,近似透明且不影响太赫兹波前。以0.8 THz入射波为例,实验证明,在20 °C时,焦平面上可见直径为4.0 mm的均匀太赫兹光斑,在70 °C时,可以清楚地分辨出四个焦点,相邻两个焦点对在x和y方向上的距离均为2 mm。因此,调整环境温度能动态调节太赫兹透镜功能,这对未来发展有源调制太赫兹器件具有重要意义。

如图3(c)所示,Katyba等人设计出了一个可拉伸菲涅尔透镜^[44]。该透镜将导电可拉伸单壁碳纳米管薄膜集成到可拉伸聚合物基板的不透明环中,其中可拉伸单壁碳纳米管薄膜作为不透明区,0.2 mm厚的弹性体作为透明可拉伸衬底,实现对透镜焦距的控制。作者利用后向波振荡器太赫兹成像技术研究了透镜的聚焦特性,证明了该菲涅尔透镜的径向拉伸可以改变透镜尺寸和焦点位置。图3(c-ii)展示了拉伸装置,图3(c-iii)则是在不同拉伸状态下透镜的电场分布。在拉伸实验中,该透镜

的工作频率为0.6 THz,其外半径增加了21%,焦点位置改变了50%。将可拉伸单壁碳纳米管薄膜集成到光子和光电子的方法,极大地促进太赫兹频谱范围内的各种灵活、可拉伸光学元件的发展。

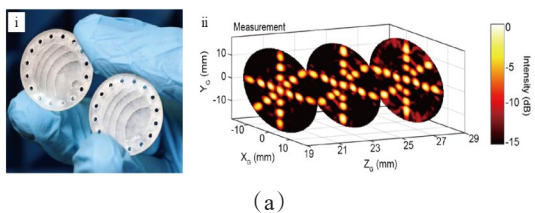
图3(d)中的两个离散介质透镜天线,是由耐高温树脂制作而成的,工作频率为300 GHz^[17]。二者级联后,用喇叭馈电,可实现动态全息成像。该级联透镜无需使用具有复杂馈电网络的有源器件或相变材料来局部控制每个单元,只要对附着在第一个透镜上的完美电导体(Perfect Electric Conductor, PEC)掩模进行简单的机械平移,就能实现动态全息成像。透镜中离散介质的高度基于改进的损失函数衍射深度神经网络设计,训练4个自定义输入场模式和相应的预期输出目标图像,得到透镜天线的相位轮廓。最后实验验证了,该透镜天线可在距离40 mm处的平面上清晰地展示“1, 2, 3, 4”四幅数字图像的动态切换。该离散介质透镜天线和设计方法可被实际应用于光存储和加密、近场通信等方向。

图3(e)中展示了一个工作在长波红外频段的大孔径,高数值孔径且偏振不敏感的超透镜^[45]。当频率上升到红外波段,高数值孔径超透镜在成像和光电子集成方面具有广阔的前景。该超透镜为单层全硅结构,由方形纳米柱组成方形晶格阵列。在中心波长为10 μm 处(对应频率为30 THz),超透镜的最大孔径为80 mm,数值孔径为0.45。并且它具有高分辨率成像能力,能够将入射光聚焦成小至约 1.04λ (λ 为波长)的光斑。此外,该超透镜是一块双面抛光硅片,非常轻薄,制造过程也只涉及单步光刻和成熟的CMOS技术,可以实现低成本、大规模的制造,为红外技术的超轻、紧凑型光学器件的发展提供了有效的解决方案。

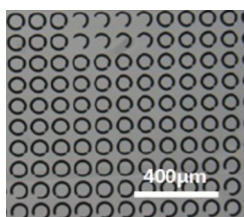
文献[55]中主要介绍了硅透镜集成太赫兹光导天线的光斑轮廓检测,并在测试系统中使用聚甲

基戊烯透镜对光束进行准直。如图 3(f)所示,左右两边半球形透镜为硅透镜,中间两个透镜为聚甲基戊烯透镜。文献[18]中也同时用到了硅衬底透镜和聚四氟乙烯透镜,如图 3(g)所示。作者将硅透镜加载在集成宽带蝴蝶结天线的优化场效应晶体管上,在测试时用两个聚四氟乙烯透镜准直。

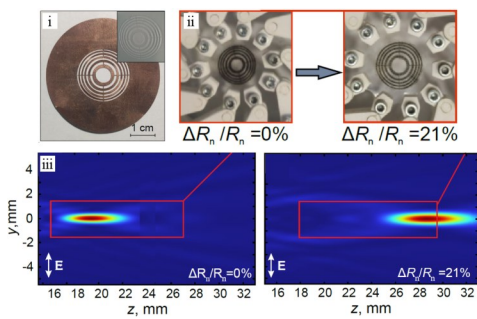
表 3 对该节中介绍的太赫兹透镜天线进行了总结。使用聚焦功能的透镜可以在各种成像系统中发挥作用,在测试系统中用于准直的透镜基本都是常见的商用曲面透镜,产量大、成本低。



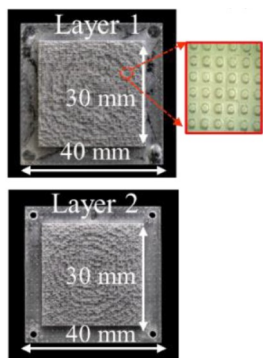
(a)



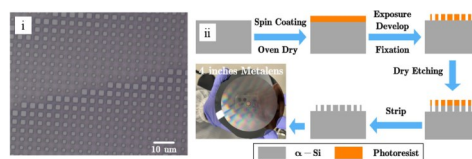
(b)



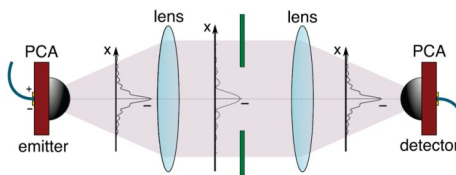
(c)



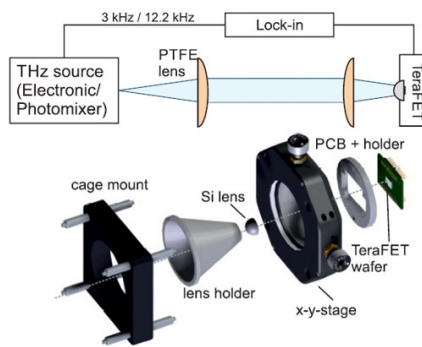
(d)



(e)



(f)



(g)

图 3 (a-i) 三维近场聚焦扫描透镜,(a-ii) 同步反向旋转和同向旋转两个透镜,在 300 GHz 时三个焦平面($S = 0.5, 4.5$ 和 8.5 mm)上的功率密度,图片引用自文献[10],(b)多焦点透镜,图片引用自文献[43],(c-i) 可拉伸菲涅尔带板,(c-ii) 不拉伸和外径拉伸 21% 的带板,(c-iii) 不拉伸和外径拉伸 21% 时的电场分布,图片引用自文献[44],(d)双层级联离散介质透镜,图片引用自文献[17],(e-i) 高数值孔径超透镜,(e-ii) 超透镜加工流程图示意图,图片引用自文献[45],(f)时域谱仪测试系统,图片引用自文献[55],(g) 场效应管测试系统,图片引用自文献[18]

Fig. 2 (a-i) 3-D near-field focus-scanning lens, (a-ii) power densities on the three focal planes ($S = 0.5, 4.5$, and 8.5 mm) at 300 GHz by combining synchronous co-rotation and counter-rotation of the lenses, and the picture is quoted from Ref. [10], (b) multi-focus lens, and the picture is quoted from Ref. [43], (c-i) stretchable Fresnel flat zone plate, (c-ii) Fresnel flat zone plate at stretching degrees of 0 and 21%, (c-iii) E-field of the zone plate at stretching degrees of 0 and 21%, and the picture is quoted from Ref. [44], (d) two-layered cascaded discrete dielectric lens, and the picture is quoted from Ref. [17], (e-i) high numerical aperture metalens, (e-ii) the schematic diagram of processing flow of metalens, and the picture is quoted from Ref. [45], (f) measurement setup of the time domain spectrometer, and the picture is quoted from Ref. [55], (g) measurement setup of the Field-effect transistors, and the picture is quoted from Ref. [18]

表3 用于聚焦准直的太赫兹透镜天线

Table 3 THz lens antennas for focus and collimation

参考文献	结构	材料	工作频率	功能
[10]	离散介质	耐高温树脂	300 GHz	三维近场聚焦扫描
[17]	离散介质	耐高温树脂	300 GHz	动态全息成像
[18]	商用曲面透镜	聚四氟乙烯	490~645 GHz	准直、预聚焦
[43]	C形槽超表面阵列	二氧化钒	800 GHz	热可切换多聚焦
[44]	平面	可拉伸单壁碳纳米管薄膜 +可拉伸聚合物	0.3~1.2 THz	径向拉伸变焦
[45]	超透镜	硅	30 THz	成像
[55]	商用曲面透镜	聚甲基戊烯	0.25~1 THz	准直

4 总结与展望

近年来,太赫兹透镜天线有了飞速发展,这得益于太赫兹加工技术的精进,以及原材料生产的便利。目前太赫兹透镜天线根据其形状大概能分为曲面透镜和平面透镜。其中,曲面透镜一般情况下体积相对较大、相对厚重,但由于商用曲面透镜非常普遍,在没有特殊功能需求的情况下,更容易获得。平面透镜厚度薄、更轻便、易集成,可以设计实现各式各样的功能,应用于更加复杂多变的场合,因此广受学者们欢迎。

3D 打印技术作为太赫兹透镜天线加工的重要方法,其精度越来越高,成本越来越低,为天线设计在太赫兹频段的发展提供可能性。而天线制作的材料多使用高分子聚合物,他们大多质量轻、性能优良,能批量生产、造价便宜。近五年报道的3D 打印太赫兹透镜天线种类繁多、功能齐全,但多工作在1 THz 以下,这主要是由于目前的打印精度仍存在限制以及打印材料在高频时透过率较低。未来,随着3D 打印技术的成熟、精度的提高,必将推动太赫兹透镜天线的发展。另外,改善材料在高频的性能也能促进太赫兹透镜天线向更高的太赫兹频段突破。

此外,对第六代移动通信技术(6G)的持续研发也预示着未来太赫兹透镜天线会朝着更加多元化的方向发展。用于增益提高的太赫兹透镜天线,可以加载在各种馈源天线上,辅助其向外辐射能量。聚焦透镜则可以根据透镜的聚焦性能满足各种成像需求,如平面成像、三维成像、静态或全息成像等。尤其是近年被陆续报道的高数值孔径超透镜天线,在红外或光学成像中有着重要的应用。有波束控制能力的太赫兹透镜天线,可以根据其特点被应用在各个细分领域:如多波束或波束扫描天线能

用于目标追踪,利用透镜天线产生的涡旋波提高频谱利用率等。其中特别是能实现多波束和波束扫描的透镜天线,前景非常广阔。由于具有波束扫描功能的相控阵天线在太赫兹波段制造成本高昂、设计难度巨大,因此波束扫描透镜天线将会有长足的发展空间。

References

- [1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 910-928.
- [2] He Y J, Chen Y L, Zhang L, et al. An overview of Terahertz antennas [J]. *China Communications*, 2020, **17**(7): 124-165.
- [3] Hu J, Lyu W T, Zhu H T, et al. Design, uncertainty analysis, and measurement of a silicon-based platelet THz corrugated horn [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, **70**(7): 5897-5901.
- [4] Wu G B, Zeng Y S, Chan K F, et al. 3-D printed 3-D near-field focus-scanning lens for Terahertz applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, **70**(11): 10007-10016.
- [5] Miguel Camacho M, Boix R R, Kuznetsov S A, et al. Far-field and near-field physics of extraordinary THz transmitting hole-array antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, **67**(9): 6029-6038.
- [6] Qu S W, Xiao L, Yi H, et al. Frequency-controlled 2-D focus-scanning Terahertz reflectarrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, **67**(3): 1573-1581.
- [7] Abohmra A, hassan Abbas H, Al-hasan M, et al. Terahertz antenna array based on a hybrid perovskite structure [J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2020, **1**: 464-471.
- [8] Alibakhshikenari M, Virdee B S, Khalily M, et al. High-gain on-chip antenna design on silicon layer with aperture excitation for Terahertz applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, **19**(9): 1576-1580.
- [9] Grzyb J, Andree M, Jain R, et al. A lens-coupled on-chip antenna for dual-polarization SiGe HBT THz direct detector [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, **18**(11): 2404-2408.

- [10] Wu G B, Zeng Y S, Chan K F, *et al.* 3-D printed 3-D near-field focus-scanning lens for Terahertz applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, **70**(11): 10007–10016.
- [11] He X Y, Yang Y, Deng L, *et al.* 3D printed sub-Terahertz all-dielectric lens for arbitrary manipulation of quasi-nondiffractive orbital angular momentum waves [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, **13**(17): 20770–20778.
- [12] Abbaszadeh A, Ahmadi-Boroujeni M, Tehranian A. Generating uniform irradiance in the Fresnel region by quasi-optical beam shaping of a millimeter-wave source [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(22): 32135–32146.
- [13] Yi X, Wang C, Chen X B, *et al.* A 220-to-320-GHz FMCW radar in 65-nm CMOS using a frequency-comb architecture [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2021, **56**(2): 327–339.
- [14] Wu G B, Chan K F, Shum K M, *et al.* Millimeter-wave and Terahertz OAM discrete-lens antennas for 5G and beyond [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, **60**(1): 34–39.
- [15] Wu G B, Zeng Y S, Chan K F, *et al.* 3-D printed circularly polarized modified fresnel lens operating at Terahertz frequencies [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, **67**(7): 4429–4437.
- [16] Lu P, Haddad T, Tebart J, *et al.* Mobile THz communications using photonic assisted beam steering leaky-wave antennas [J]. *Optics Express*, 2021, **29**(14): 21629–21638.
- [17] Liao D S, Wang M T, Chan K F, *et al.* A deep-learning enabled discrete dielectric lens antenna for Terahertz reconfigurable holographic imaging [J], *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, **21**(4): 823–827.
- [18] Bauer M, Ramer A, Chevchenko S A, *et al.* A high-sensitivity AlGaIn/GaN HEMT Terahertz detector with integrated broadband bow-tie antenna [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, **11**(1): 430–444.
- [19] Wu G B, Chan K F, Chan C H. 3-D printed Terahertz lens to generate higher order Bessel beams carrying OAM [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, **69**(6): 3399–3408.
- [20] Wu G B, Chan K F, Qu S W, *et al.* Orbital angular momentum (OAM) mode-reconfigurable discrete dielectric lens operating at 300 GHz [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, **10**(5): 480–489.
- [21] Wu G B, Chan K F, Qu S W, *et al.* A 2-D beam-scanning Bessel launcher for Terahertz applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, **68**(8): 5893–5903.
- [22] Amarasinghe Y, Mendis R, Shrestha R, *et al.* Broadband wide-angle terahertz antenna based on the application of transformation optics to a Luneburg lens [J]. *Scientific Reports*, 2021, **11**: 5230.
- [23] Gan Y E, Mirzaei B, Poel S V D, *et al.* 3.9 THz spatial filter based on a back-to-back Si-lens system [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(22): 32693–32708.
- [24] Wu G B, Zeng Y S, Chan K F, *et al.* High-gain circularly polarized lens antenna for Terahertz applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, **18**(5): 921–925.
- [25] Zhu J F, Yang Y, McGloin D, *et al.* Sub-Terahertz 3-D printed all-dielectric low-cost low-profile lens-integrated polarization beam splitter [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, **11**(4): 433–442.
- [26] Kokkonen M, Ghavidel A, Tervo N, *et al.* An ultralight high-directivity ceramic composite lens antenna for 220–330 GHz [J]. *IEEE Access*, 2021, **9**: 156592–156598.
- [27] Guimaraes G, Reynaert P. A 670-GHz 4×2 oscillator-radiator array achieving 7.4-dBm EIRP in 40-nm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2021, **56**(11): 3399–3411.
- [28] Garufo A, Sberna P M, Carluccio G, *et al.* A connected array of coherent photoconductive pulsed sources to generate mW average power in the submillimeter wavelength band [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, **9**(3): 221–236.
- [29] Ponomarev D S, Lavrukhin D V, Zenchenko N V, *et al.* Boosting photoconductive large-area THz emitter via optical light confinement behind a highly refractive sapphire-fiber lens [J]. *Optics Letters*, 2022, **47**(7): 1899–1902.
- [30] Chen X B, Yi X, Khan M I W, *et al.* A 140-GHz FMCW TX/RX-antenna-sharing transceiver with low-inherent-loss duplexing and adaptive self-interference cancellation [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2022, **57**(12): 3631–3645.
- [31] Gao L, Chan C H. A 0.45-THz 2-D scalable radiator array with 28.2-dBm EIRP using an elliptical Teflon lens [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2022, **57**(2): 400–412.
- [32] Zatta R, Jain R, Grzyb J, *et al.* Resolution limits of hyper-hemispherical silicon lens-integrated THz cameras employing geometrical multiframe super-resolution imaging [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, **11**(3): 277–286.
- [33] Gao L, Chan C H. A 0.47-THz ring scalable coupled oscillator-radiator array with miniature patch antennas [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, **70**(8): 3964–3974.
- [34] Li H X, Gao X, Bu X Y, *et al.* The Design Methods and Experiments for a 220-GHz quasi-optical cryogenic Schottky subharmonic mixer of high performance [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, early access, doi: [10.1109/TMTT.2023.3238814](https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3238814).
- [35] Chudpooti N, Duangrit N, Akkaraekthalin P, *et al.* 220–320 GHz hemispherical lens antennas using digital light processed photopolymers [J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 12283–12290.
- [36] Bunea A C, Neculoiu D, Stavrinidis A, *et al.* Monolithic integrated Schottky diode multiplier and rectenna for wireless communication link in the W band [J]. *IEEE Access*, 2022, **10**: 107386–107394.
- [37] Jalili H, Momeni O. A 0.46-THz 25-element scalable and wideband radiator array with optimized lens integration in 65-nm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, **55**(9): 2387–2400.
- [38] Gao L, Chan C H. A 0.68–0.72-THz 2-D scalable radi-

- tor array with -3 -dBm radiated power and 27.3-dBm EIRP in 65-nm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2022, **57**(10): 3114–3124.
- [39] Grzyb J, Rodríguez-Vázquez P, Malz S, *et al.* A SiGe HBT 215 – 240 GHz DCA IQ TX/RX chipset with built-in test of USB/LSB RF asymmetry for 100+ Gb/s data rates [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, **70**(3): 1696–1714.
- [40] Berkel S V, Malotau E S, Martino C D, *et al.* Wideband double leaky slot lens antennas in CMOS technology at submillimeter wavelengths [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, **10** (5) : 540–553.
- [41] Joint F, Gay G, Vigneron P B, *et al.* Compact and sensitive heterodyne receiver at 2.7 THz exploiting a quasi-optical HEB-QCL coupling scheme [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **115**: 231104.
- [42] Berkel S V, Malotau E S, Martino C D, *et al.* Wideband modeling of CMOS Schottky barrier diode detectors for THz radiometry [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, **11**(5): 495–507.
- [43] Wang T, He J W, Guo J Y, *et al.* Thermally switchable terahertz wavefront metasurface modulators based on the insulator-to-metal transition of vanadium dioxide [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(15): 20347–20357.
- [44] Katyba G M, Raginov N I, Khabushev E M, *et al.* Tunable THz flat zone plate based on stretchable single-walled carbon nanotube thin film [J]. *Optica*, 2023, **10** (1): 53–61.
- [45] Li J W, Wang Y L, Liu S J, *et al.* Largest aperture metalens of high numerical aperture and polarization independence for long-wavelength infrared imaging [J]. *Optics Express*, 2022, **30**(16): 28882–28891.
- [46] Sang D, Xu M F, Pu M B, *et al.* Toward high-efficiency ultrahigh numerical aperture freeform metalens: from vector diffraction theory to topology optimization [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, **16**(10): 2200265.
- [47] Al-Daffaie S, Jumaah A J, Rubio V L, *et al.*, Design and implementation of a terahertz lens-antenna for a photonic integrated circuits based THz systems [J], *Scientific Reports*, 2022, **12**: 1476.
- [48] Zatta R, Jagtap V S, Grzyb J, *et al.* Broadband lens-integrated CMOS camera-type THz compact antenna test range [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, **11**(5): 527–537.
- [49] Ullah N, Liu W G, Wang G C, *et al.* Gate-controlled terahertz focusing based on graphene-loaded metasurface [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(3): 2789–2798.
- [50] Ferreras M, Cibiraite-Lukenskiene D, Lisauskas A, *et al.* Broadband sensing around 1 THz via a novel biquad-antenna-coupled low-NEP detector in CMOS [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, **11**(1): 16–27.
- [51] Guo J Y, Wang T, Zhao H, *et al.* Reconfigurable Terahertz metasurface pure phase holograms [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**: 1801696.
- [52] Kinev N V, Rudakov K I, Filippenko L V, *et al.* Terahertz source radiating to open space based on the superconducting flux-flow oscillator: development and characterization [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, **9**(6): 557–564.
- [53] Gan Y, Mirzaei B, Silva J R G D, *et al.* Low noise MgB₂ hot electron bolometer mixer operated at 5.3 THz and at 20K [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, **119**: 202601.
- [54] Baselmans J J A, Facchin F, Laguna A P, *et al.* Ultra-sensitive THz microwave kinetic inductance detectors for future space telescopes [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, **665**: A17.
- [55] Suzuki Y, Mai T V, Yu X B, *et al.* Phase control of Terahertz waves using injection-locked resonant tunneling diode oscillator [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2022, **12**(5): 481–488.
- [56] Glück A, Rothbart N, Schmalz K, *et al.* SiGe BiCMOS heterodyne receiver frontend for remote sensing with small satellites [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2022, **12**(6): 603–610.
- [57] Freer S, Gorodetsky A, Navarro-Cia M. Beam profiling of a commercial lens-assisted Terahertz time domain spectrometer [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, **11**(1): 90–100.
- [58] Chudpooti N, Duangrit N, Akkaraekthalin P, *et al.* Electronics-based free-space Terahertz measurement using hemispherical lens antennas [J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 95536–95546.
- [59] Silva J R G, Finkel M, Laauwen W M, *et al.* High accuracy pointing for quasi-optical THz mixer arrays [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2022, **12**(1): 53–62.
- [60] Yuan H, Voß D, Lisauskas A, *et al.* 3D Fourier imaging based on 2D heterodyne detection at THz frequencies [J]. *APL Photonics*, 2019, **4**: 106108.