2025年3月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2025)03-0189-08

太赫兹表面波3D打印金属梯度折射率透镜天线

聂博宇,刘埇,卢宏达*,朱少园,吕 昕

(北京理工大学 集成电路与电子学院,北京 100081)

摘 要:为解决太赫兹频段紧凑型多波束天线结构复杂且制备难度大的问题,提出两种工作 于355 GHz频段的太赫兹龙勃透镜天线和部分麦克斯韦鱼眼(PMFE)透镜天线。两种天线均采用周 期性金属钉床结构实现梯度折射率表面波透镜,最小特征结构尺寸达60 μm。为调控天线非扫描 面波束辐射方向,在两种表面波透镜边缘均加载环形波纹结构;此外,将馈电波导阵列与表面波 透镜一体设计,保证天线结构一体性,并采用高精确度(10 μm)3D 打印技术一体加工,结合磁控溅 射技术完成两种天线表面金属化,实现太赫兹表面波透镜天线低成本可靠制备。仿真结果表明, 龙勃透镜天线和 PMFE 透镜天线在 350~360 GHz 频段范围内,分别实现±60°和±72°的波束扫描 能力。对龙勃透镜天线进行样机加工制造与测试验证,在 350~360 GHz 频带范围内,表现出良好 的阻抗匹配特性和多波束特性:多波束扫描范围为±60°,增益高于16 dBi,波束扫描损耗优于 1.2 dB。测试结果与仿真设计结果的吻合性验证了该方案的可行性,为太赫兹多波束天线的设计 实现提供了一种崭新的设计思路和技术选择。

关键词:太赫兹;多波束天线;透镜天线;3D打印
 中图分类号:TN821
 文献标志码:A
 doi: 10.11805/TKYDA2024335

Terahertz surface-wave 3D-printed metallic gradient-index lens antennas

NIE Boyu, LIU Yong, LU Hongda*, ZHU Shaoyuan, LYU Xin

(School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To address the issues of complex structure and high fabrication difficulty associated with compact multi-beam antennas in the terahertz frequency band, a terahertz Luneburg lens antenna and a partial Maxwell Fisheye(PMFE) lens antenna operating in the 355 GHz band are proposed. Both antennas use a periodic metallic bed-of-nails structure to realize a gradient refractive index surface wave lens with a minimum structural dimension of 60 µm. To regulate the beam direction in the non-scanning plane, corrugated rings are loaded on the edges of the surface wave lenses. In addition, the waveguide feeding array and the surface wave lens are designed as one piece to ensure structural integrity. Highprecision 3D printing(10 µm precision) combined with magnetron sputtering are employed to realize the metallization of two surface wave lenses and low-cost realization of terahertz antenna prototype. The simulated results show the beam scanning capability of $\pm 60^{\circ}$ and $\pm 72^{\circ}$ for the Luneburg lens antenna and PMFE lens from 350 GHz to 360 GHz, respectively. The Luneburg lens antenna is verified by prototype fabrication and testing, which demonstrates good impedance matching and multibeam scanning performance from 350 GHz to 360 GHz, with a beam scanning range of $\pm 60^{\circ}$, a gain higher than 16 dBi, and a beam-scanning loss better than 1.2 dB. The agreement between the measured and simulated results demonstrates the feasibility of this scheme and provides a new design idea and technology choice for the realization of terahertz multibeam antenna design.

Keywords: terahertz; multibeam antenna; lens antenna; 3D printing

收稿日期: 2024-06-30; 修回日期: 2024-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62271047; 61901040; 12173006);北京理工大学科技创新计划特立学生科技创新团队资助项目 (2024CX06031)

^{*}通信作者: 卢宏达 email:luhongda@bit.edu.cn

超高速率、立体化、超密集用户覆盖必成为第6代无线通信(6G)场景特征^[1]。现有的频谱资源已日渐拥挤, 为支撑未来超高质量通信愿景与潜在的用户通信需求,对太赫兹频段通信设备的探索,尤其是在100 GHz及以 上的频段实现6G无线通信信号覆盖已成为研究焦点^[2]。在如此高的频段实现稳定信号覆盖,这对前端天线性能 提出更高要求:一方面,为克服太赫兹频段电磁波在传播路径中的能量衰减,保证稳定通信链路,需具备高增 益辐射能力;另一方面,高方向性天线必然伴随着窄波束覆盖范围,面临密集的用户需求场景,需具备多波束 覆盖能力。

针对高频段结构复杂,设计成本高,功耗控制难以及加工技术受限等一系列挑战,结构简单的毫米波无源 多波束天线辐射架构逐步成为解决高频多波束覆盖的热点研究方案^[3],如,无源多波束矩阵成形网络^[4-6]、准光 无源多波束成形网络^[7-9]。此外,梯度折射率透镜天线因其灵活的波束覆盖能力、大角度波束覆盖潜力^[10-14]以及 低结构成本,在毫米波及更高频段的多波束成形需求中具有突出优势。传统的梯度折射率透镜天线,如文献[11] 中采用介质 3D 打印的方式,通过调整介质填充物在每个晶胞中的填充率,实现龙勃透镜的梯度折射率分布,并 利用固定角度摆放的馈源组,实现空间5个波束水平与俯仰方向±20°覆盖,但介质材料透镜带来的介质损耗对于 毫米波及太赫兹频段的技术沿用带来困难; 文献[12]中提出了基于不等间距平行板波导组金属透镜形式, 该方式 有效避免了介质材料的使用,但并未给出天线多波束能力,且其球形透镜与分离馈源形式的天线结构对毫米波 太赫兹频段的天线集成带来挑战。因此基于人工电磁材料理论以及超材料的概念,将亚波长的周期性金属单元 构成的表面波结构与平行板波导结构结合,广泛用于等效折射率的实现,参与准光学波束成形设计[15-18]。文献 [17-18]分别提出了平行板波导加载金属柱与金属孔为单元的周期性表面波透镜结构,通过调控金属单元的几何 尺寸参数,实现相对应的等效折射率分布,从而满足电磁透镜能力与大角度扫描多波束能力。其中文献[18]中的 全金属透镜天线在毫米波频段实现了大于50°的波束扫描能力。在太赫兹频段已对金属多波束天线进行了一些尝 试[19-23],如文献[22]中通过改变平行板波导高度调控其TE模式,实现龙勃透镜天线,并在300 GHz实现±25°波束 扫描。研究结果表明全金属透镜天线在太赫兹频段具有良好的稳定性,但其波束覆盖范围仍有很大的提升空间, 因此将人工电磁材料用于太赫兹梯度折射率透镜天线的设计具有实现潜力,但如何实现太赫兹频段亚波长尺寸 金属周期结构成为新的挑战。硅基的微加工工艺,在太赫兹频段具有很高的适用性,尤其是在大规模的天线阵 列设计中[24-25],但其采用的刻蚀工艺对于一系列不同尺寸的周期性结构,面临结构参数不能灵活调控的技术瓶

颈。本文采用高精确度 3D 打印加工方式, 并结合磁控溅射金属化技术,在 355 GHz 频段分别对龙勃透镜和部分麦克斯韦鱼眼 (PMFE)透镜天线进行设计加工。透镜内 部结构均采用金属平板加载的周期性金属 钉床,利用其高度变化实现梯度折射率分 布。仿真及测试结果表明,两种天线均可 实现大于±60°的高增益波束覆盖能力,为 THz 频段多波束天线设计实现提供了新的 解决方案。

1 透镜天线结构与工作原理

设计的 PMFE 透镜天线及龙勃透镜天 线分别见图 1(a)和图 1(b)。两种天线均由 表面波透镜部分与多个 WR-2.2 标准矩形 波导均匀排列组成的馈电波导网络部分构 成,其波导宽度 *a*_{wave}=558.8 μm,且相邻 波导中间波导壁宽度 *b*_{wall}=200 μm。为保 证表面波透镜能够将馈入球面电磁波经由 表面波透镜变为平面电磁波出射,龙勃透 镜的馈电波导置于表面波透镜边缘焦点 处; PMFE 透镜的馈电波导平行排列,位 于透镜内部距离透镜中心 0.45*R* 处的准焦





线上^[26]。通过文献[26]中方法,保证良好馈电匹配。两种透镜的大角度波束扫描均通过切换不同的馈电端口实现,见图1(c)。为保证透镜结构经过3D打印加工后具备良好的金属化能力及测试稳定性,将表面波透镜与馈电波导凹槽阵列进行一体化3D打印加工,并进行磁控溅射表面金属化。溅射金属选用金,镀层厚度为500 nm,保证工作频段下的趋肤深度要求。由于周期性钉床结构对电磁波的表面传输特性,仅对结构表面进行金属化仍具备可靠的电磁传输特性,且与全金属结构天线的电性能基本无异。完成金属化后,馈电波导金属上盖板采用机械加工单独加工方式,再与馈电波导阵列组合装配。

表面波透镜部分由周期性的金属钉床构成,周期性金属钉床单元结构见图1中的局部图,其中金属柱均为边 长*a*=60 μm,高为*h*的长方体,金属柱周期*p*=160 μm。表面波金属透镜工作原理即通过调控金属柱单元的高度, 实现不同的等效折射率数值,从而满足龙勃透镜与PMFE透镜的梯度折射率分布,如式(1)~(2)所示^[26-27]:

$$n_{\rm Luneburg} = \sqrt{2 - \left(r/R\right)^2} \tag{1}$$

$$n_{\rm PMFE} = \frac{2}{1 + (r/R)^2}$$
 (2)

$$h = \frac{\arctan \frac{p \sqrt{n^2 - 1}}{p - a}}{k_0} \tag{3}$$

式中: n_{Luneburg} 为龙勃透镜折射率分布; n_{PMFE} 为 PMFE 透 镜的折射率分布;R为透镜半径;r/R为透镜平面各点 归一化半径; k_0 为电磁波在真空中的传播常数。

第3期

实现龙勃透镜与 PMFE 透镜的梯度折射率分布,关 键在于找到 $h,n_{Luneburg},n_{PMFE}$ 与r/R之间的关系,文献[28] 给出金属柱高度与折射率的对应关系,见式(3)。龙勃 透镜与 PMFE 透镜二者的折射率分布不同,对应的金属 柱高度 h_2 与 h_1 不同,见图 1,本文均统一成h进行讨论。 值得注意的是,式(1)~式(3)中给出的折射率n及高度h随着透镜半径r为连续变化的关系,而实际加工中考虑 到金属钉床存在离散周期p,在设计过程中对金属柱高 度进行离散分布处理,可得到如图 2 所示的 PMFE 透镜 与龙勃透镜的金属钉床离散高度与折射率分布。



Fig.2 Height profile of the bed of nails and refractive index profile 图 2 金属钉床高度分布与折射率分布

从图2中可见,在355 GHz处,设计梯度折射率与理论梯度折射率分布吻合良好;由于金属钉床结构的色散 特性,在350~360 GHz其他频点处出现折射率的拟合偏差,但对辐射特性的影响可忽略。此外,由图1中侧视图 注意到,在表面波透镜的边缘处,额外设计了一系列的环形波纹结构,其环形贯穿整个辐射口面,局部视图见 图3(a),环形波纹结构的具体参数见表1和表2。在表面波透镜有限大的金属基板上,辐射口面边缘与自由空间 产生截断,表面电磁波经透镜传输后在边缘辐射时发生边缘绕射现象,导致出射电磁波能量在E面维度上关于 表面波透镜平面出现明显不对称性,天线E面波束上翘,最大增益指向不为0°,图3(b)为没有倾斜张角过渡、仅 有倾斜张角过渡以及在倾斜张角处增加波纹结构情况下的E面辐射方向图。从图中可见,在增加边缘波纹结构 后,E面方向图最大增益指向由-16.6°修正至0°,具有明显的波束调控能力。为进一步验证该环形波纹结构电磁 特性,图3(c)给出了在波纹周期g=160 μm,波纹凹槽宽度 w=40 μm 情况下,不同波纹深度d的传输色散特性的 仿真结果。从图中可见,波纹凹槽深度d在100~140 μm之间均能保证电磁波在300~400 GHz频段范围内的有效 传输。此外,可利用电磁波在周期性波纹结构中的表面波传输特性以及其对电磁波表面束缚能力,实现对电磁 波在口面辐射时的波前调控。

由于两种透镜天线采用相同的环形波纹结构,以龙勃透镜为例,图4给出了不同透镜辐射边缘结构下的电场 能量分布。由于边缘断崖式的边界不连续,电磁波在脱离表面波透镜后在边缘发生绕射现象,绝大部分能量传 输方向发生上翘,见图4(a);采用倾斜张角过渡后,在一定程度上减轻了电磁波能量的偏转现象,但依旧有限, 见图4(b);采用4个环形波纹结构,当电磁波脱离表面波透镜后,由于波纹结构的表面波束缚特性,电磁波沿倾 斜过渡表面垂直环形波纹方向继续传播一段距离后,最终向自由空间辐射,有效减轻并弥补电磁波能量的偏转 上翘现象,见图4(c)。至此,两天线已具备完整高增益多波束覆盖能力,其中,龙勃透镜天线9个馈电波导以 15°为间隔环绕分布在透镜焦弧线上,实现±60°的波束覆盖范围,PMFE透镜天线可实现±70°的波束覆盖范围, 见图 5(a)~(b)。此外,通过观测龙勃透镜距离透镜中心 5 mm 的直线口面处相位分布可以看出,出射电磁波已呈 现良好的平面波特性,见图6,结合其辐射方向图可以看出透镜天线具有良好的方向性。







Fig.3 Details and effects of the ring structures 图3环形波纹结构细节图

表1 环形波纹结构参数(单位:um)

表2 边缘倾斜过渡结构参数(单位:um)

Table1 Structural parameters of corrugated ring(unit:µm) Table2 Structural parameters of the sloped extension ring(unit:µm)

| = | | | |
|-----------|-------|----------------|-------|
| parameter | value | parameter | value |
| g | 160 | t | 65 |
| g_0 | 140 | l_1 | 330 |
| d_1 | 104 | l_2 | 490 |
| d_2 | 120 | l_3 | 590 |
| d_3 | 115 | l_4 | 655 |
| d_4 | 130 | l ₅ | 685 |



Fig.4 Comparison of electric field distribution on the E-plane of different extension ring structures 图4 不同边缘过渡结构 E 面电场分布对比图



(b) E-plane radiation patterns for different extension ring structures



Fig.6 Phase distribution at the radiation aperture and simulated *H*-plane radiation patterns at 350, 355, and 360 GHz when port 5 is fed 图 6 龙勃透镜天线口面处相位分布与端口 5 馈电时 350,355 和 360 GHz 处*H* 面方向图仿真结果

2 天线加工与测试结果

在太赫兹频段尤其是大于 300 GHz 频 段实现天线样件加工与测试,加工误差以 及装配误差成为影响实际天线性能的关键 因素。由于表面波透镜部分采用周期性的 金属钉床结构,其金属柱边长为60 µm, 相邻金属柱间隔为100 um,在该尺寸条件 下难以采用金属机械加工的方式进行制造。 为保证天线加工精确度与结构稳定性,采 用具备高精确度3D打印能力的增材加工方 式实现。3D打印设备(Nano Arch S140, BMF)最高精确度可达到2 µm, 足以支撑 该天线中金属柱周期性结构加工。为提高 加工效率, 10 µm 打印精确度已足以满足 最小特征尺寸不小于 50 µm 情况下的结构 尺寸准确性。图 7(a)~(c)分别为采用 10 μm 精确度3D打印得到的透镜样件以及显微镜 观察视图,可见金属柱边长误差在±5 µm 范围内。在装配误差上,由于天线尺寸小, 为避免分件结构之间装配带来的误差影响 测试准确性,打印结构设计中将表面波透 镜部分及其馈电波导阵列一体进行高精确 度 3D 打印, 材料为 HTL 树脂, 这种设计方 式大大提高了天线装配测试过程中的可靠 性与性能稳定性。两天线整体尺寸一致, 均为14 mm×14 mm×1.6 mm($w_2 \times w_1 \times h_1$),以 便适用于同一套测试工装。对打印后的表 面波透镜中钉床结构及波导结构进行精确



Fig.7 Prototype of Luneburg lens and PMFE lens antenna 图 7 龙勃透镜与 PMFE 透镜天线样件

度检测,其加工误差为±5 μm。在完成天线 3D 打印样件后,对天线金属化成为实现天线电磁性能的关键步骤。 由于表面波透镜部分复杂的物体表面结构,以及馈电波导凹槽结构,采用磁控溅射技术可获得良好的表面金属 化。为保证金材料的良好附着力,在 3D 打印基材上预先进行 30 nm 钛金属的溅射,随后进行 500 nm 金层溅射, 并满足该频段下趋肤深度。金属化后透镜见图 7(d)和图 7(e);图 7(f)和图 7(g)分别为金属钉床结构及边缘环形波纹 和馈电波导结构细节图,可见在金属化后其微小结构特征依旧完整可靠。 以龙勃透镜为代表进行电性能实验测试。为保证天线的可测性与稳定性,设计相应的工装夹具以及测试 UG-387法兰连接器,见图8(a)。为实现不同馈电波导的切换,将天线工装与UG-387法兰连接器进行对位滑动, 实现各个馈电波导的准确切换,以实现不同角度的波束扫描。由于馈电波导的空间有限,因此在单端口波导馈 电时,其他馈电波导端口并未采用匹配负载连接。端口间隔离度的测试比较困难,但经过HFSS全波仿真分析可 以看出,由于波导壁之间的良好隔离,其各个端口间隔离度在350~360 GHz可达30 dB,见图8(b)。采用矢量网 络分析仪(Keysight N5247B PNA-X)和太赫兹频率拓展模块(VDI WM570)进行天线回波损耗及辐射特性的组合测 试,考虑到天线的对称性,仅对端口1~5进行测试。各端口反射系数见图8(c),在350~360 GHz频段内反射系数 低于-12.5 dB,且与仿真结果吻合良好,体现了良好的阻抗匹配特性,验证了仿真设计的正确性。



龙勃透镜天线 H 面测试辐射方向图见图 9(a)和图 9(b)。本文重点关注最大增益方向±30°范围内的方向图,可 以覆盖主瓣和第一副瓣范围。图 9(a)为端口 1~5 分别馈电时,355 GHz 的测试 H 面主极化、交叉极化方向图以及 仿真 H 面主极化方向图。从图中可见,测得的多波束辐射特性与仿真结果吻合良好。不够理想的是,对应 15°和 60°波束的副瓣电平略高于-10 dB。对应各端口馈电的半功率波束宽度在 5.7°~6.3°范围内。交叉极化电平均低于 -20 dB,表现出很好的线极化特性。图 9(b)为其余频点 350,352,358 和 360 GHz 的测试 H 面主极化多波束方向图, 均表现出良好的多波束性能。增益的测量基于标准增益喇叭采用比较法进行,增益的测量基于标准增益喇叭采 用比较法进行,端口 5 馈电时各个频点增益展示在图 10(a)。可见在 350~360 GHz 范围内典型频点处增益浮动小于 0.6 dB。此外,为体现天线增益随扫描角度的变化,以 355 GHz 为代表的不同扫描角度下的增益在图 10(a)中给出。 其中,对应 0°,15°,30°,45°和 60°波束的增益分别为 17.3,17.1,16.7,16.4 和 16.1 dBi;多波束的扫描损耗优于 1.2 dB。图 10 (b)为 350,355 及 360 GHz 处的 E 面方向图测试结果,在不同频点下,其半功率波束宽度大于 32°,说明了该天线具 有扇形波束特征;同时,E 面最大辐射方向接近 0°,证明了前文所述的波纹环结构发挥了预期的波束优化作用。



3 结论

本文在 300 GHz 以上频段,给出了龙勃透镜天线和 PMFE 透镜天线两种具备大角度波束扫描功能的表面波金 属透镜天线设计方案,并基于高精确度 3D 打印技术结合磁控溅射金属化手段进行低成本可靠的样机制备。其 中,龙勃透镜天线和 PMFE 透镜天线在 350~360 GHz 分别实现±60°和±72°的波束扫描能力;对龙勃透镜天线样机 进行了测试验证,其在 350~360 GHz 频带范围内表现出良好的阻抗匹配特性和多波束辐射特性:多波束范围为 ±60°,增益高于16 dBi,波束扫描损耗优于1.2 dB。通过表面波透镜边缘结构设计,有效解决了类似表面波结构 天线普遍存在的 *E* 面波束上翘问题。测试结果与仿真设计结果的吻合性表明该方案的可行性,同时为亚毫米波 多波束天线与高精确度 3D 打印技术的结合提供了一种崭新的设计思路和技术选择。



参考文献:

- [1] DANG Shuping, AMIN O, SHIHADA B, et al. What should 6G be?[J]. Nature Electronics, 2020,3(1):20-29. doi:10.1038/s41928-019-0355-6.
- [2] YANG Ping,XIAO Yue,XIAO Ming, et al. 6G wireless communications: vision and potential techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(4):70-75. doi:10.1109/MNET.2019.1800418.
- [3] GUO Y J,ANSARI M,ZIOLKOWSKI R W,et al. Quasi-optical multi-beam antenna technologies for B5G and 6G mmWave and THz networks: a review[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2021(2):807-830. doi:10.1109/OJAP. 2021.3093622.
- [4] LIU Zhipeng, CHEN Fuchang, QIN Chong. A 7 × 8 butler matrix-fed multibeam antenna based on substrate integrated waveguide technology[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023,22(2):397-401. doi:10.1109/LAWP.2022.3213786.
- [5] GUO C A, GUO Y J, ZHU H, et al. Optimization of multibeam antennas employing generalized joined coupler matrix[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023,71(1):215-224. doi:10.1109/TAP.2022.3220976.
- [6] YANG Ye, PAN Yufei, ZHENG Shaoyong, et al. Analytical design method and implementation of broadband 4 × 4 Nolen matrix
 [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022,70(1):343–355. doi:10.1109/TMTT.2021.312139.
- [7] LI J, HE C, FAN H, et al. Gain-equalized multibeam antenna fed by a compact dual-layer Rotman lens at Ka-band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022,70(3):2307-2311. doi:10.1109/TAP.2021.3111199.
- [8] XU R, CHEN Z N. A transformation-optics-based flat metamaterial Luneburg lens antenna with zero focal length[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022,70(5):3287-3296. doi:10.1109/TAP.2021.3137528.
- [9] MIRMOZAFARI M, TURSUNNIYAZ M, LUYEN H, et al. A multibeam tapered cylindrical Luneburg lens[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021,69(8):5060-5065. doi:10.1109/TAP.2020.3048508.
- [10] QUEVEDO-TERUEL O, MIAO J W, MATTSSON M, et al. Glide-symmetric fully metallic Luneburg lens for 5G communications at Ka-band[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018,17(9):1588-1592. doi:10.1109/LAWP.2018.2856371.
- [11] 袁大力,张冰,黄卡玛.一种波瓣等化的多波束龙伯透镜天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(2):275-280. (YUAN Dali,ZHANG Bing,HUANG Kama. A multi-beam Luneburg lens antenna with lobe equalization[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(2):275-280.) doi:10.11805/TKYDA2020371.
- [12] 董俊峰,陈星. 一种新型金属透镜天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(3): 490-493. (DONG Junfeng, CHEN Xing. Design of a new metal lens antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3): 490-493.) doi:10.11805/TKYDA201803.0490.
- [13] PRINCE T J, ELMANSOURI M A, FILIPOVIC D S. Cylindrical Luneburg lens antenna systems for amplitude-only directionfinding applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(10): 7924-7932. doi: 10.1109/TAP. 2023. 3306638.
- [14] ZETTERSTROM O, FONSECA N J G, QUEVEDO-TERUEL O. Compact half-Luneburg lens antenna based on a glide-

symmetric dielectric structure[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(11): 2283-2287. doi: 10.1109/LAWP.2022.3179639.

- [15] LIAO Q,FONSECA N J G,QUEVEDO-TERUEL O. Compact multibeam fully metallic geodesic Luneburg lens antenna based on non-Euclidean transformation optics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(12): 7383-7388. doi: 10.1109/TAP.2018.2872766.
- [16] RICO FERN & NDEZ J, VIDARSSON F V, ARREBOLA M, et al. Compact and lightweight additive manufactured parallel-plate waveguide half-Luneburg geodesic lens multiple-beam antenna in the Ka-band[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022,22(4):684-688. doi:10.1109/LAWP.2022.3222172.
- [17] LIAN J W, ANSARI M, HU P, et al. Wideband and high-efficiency parallel-plate Luneburg lens employing all-metal metamaterial for multibeam antenna applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023,71(4):3193-3203. doi:10.1109/TAP.2023.3242118.
- [18] ZETTERSTROM O,CASTILLO-TAPIA P,POYANCO J M,et al. Planar glide-symmetric dielectric half-Luneburg lens at K/K_aband[C]//2022 16th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). Madrid,Spain:IEEE, 2022:1–4. doi:10.23919/ EuCAP53622.2022.9769528.
- [19] LU H D,ZHU S Y,SKAIK T, et al. Sub-terahertz metallic multibeam antenna based on a sliding aperture technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024,72(1):290-299. doi:10.1109/TAP.2023.3323894.
- [20] ZHU S,LU H,SKAIK T,et al. A compact terahertz multibeam antenna based on a multimode waveguide beamforming structure[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2023,14(1):122–125.
- [21] SATO K, MONNAI Y. Two-dimensional terahertz beam steering based on trajectory deflection of leaky-mode[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021,11(6):676-683. doi:10.1109/TTHZ.2021.3108392.
- [22] SATO K, MONNAI Y. Terahertz beam steering based on trajectory deflection in dielectric-free Luneburg lens[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020,10(3):229-236. doi:10.1109/TTHZ.2020.2983915.
- [23] NIE Boyu, LU Hongda, SKAIK T, et al. A 3D-printed subterahertz metallic surface-wave Luneburg lens multibeam antenna[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2023,13(3):297-301. doi:10.1109/TTHZ.2023.3242227.
- [24] CHANG Le,LI Yue,ZHANG Zhijun,et al. Low-sidelobe air-filled slot array fabricated using silicon micromachining technology for millimeter-wave application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(8): 4067–4074. doi: 10.1109/ TAP.2017.2717971.
- [25] GOMEZ-TORRENT A, GARCI'A-VIGUERAS M, LE COQ L, et al. A low-profile and high-gain frequency beam steering subterahertz antenna enabled by silicon micromachining[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(2):672-682. doi:10.1109/TAP.2019.2943328.
- [26] LU Hongda, LIU Zhipeng, ZHANG Yanbo, et al. Partial Maxwell fish-eye lens inspired by the Gutman lens and Eaton lens for wide-angle beam scanning[J]. Optics Express, 2021,29(15):24194-24209. doi:10.1364/OE.426539.
- [27] LU Hongda,LIU Zhipeng,LIU Yong, et al. Compact air-filled Luneburg lens antennas based on almost-parallel plate waveguide loaded with equal-sized metallic posts[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(11): 6829–6838. doi: 10.1109/TAP.2019.2927862.
- [28] PARK Y J, HERSCHLEIN A, WIESBECK W. A photonic bandgap(PBG) structure for guiding and suppressing surface waves in millimeterwave antennas[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001,49(10):1854–1859. doi:10.1109/22.954798.

作者简介:

聂博宇(1997-),男,在读博士研究生,主要研究方向为面向毫米波与太赫兹频段的金属多波束天线理论及 多波束成形网络.email:3120225682@bit.edu.cn.

刘 埇(1977-),男,博士,副教授,博士生导师, 主要研究方向为阵列天线及太赫兹天线理论与集成电路系统.

卢宏达(1987-),男,博士,副教授,博士生导师, 主要研究方向为毫米波与太赫兹技术、5G/6G多波束天 线理论与技术. **朱少园**(2001-),男,硕士,主要研究方向为毫米 波与太赫兹多波束天线与波束成形网络.

吕 昕(1960-),男,博士,教授,博士生导师, 主要研究方向为毫米波与太赫兹电路及太赫兹天线与 系统.