

文章编号: 2095-4980(2025)01-0006-06

## 基于镍人工表面等离子激元的 W 波段波导终端

张 博, 张 勇\*, 朱华利

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 对镍波导在亚毫米波频段的电磁损耗进行测量, 并设计一款基于镍人工表面等离子激元(SSPPs)的波导终端, 用于多端口波导器件测量和功分器端口隔离。该波导采用简单紧凑的反对称矩形探针结构将电磁能量从波导高效耦合至微带, 随后传输至梳状的SSPPs终端。其中, 微带电路和SSPPs电路制作在一个石英衬底上, 金属电路为电镀的金属镍。利用SSPPs的带阻和金属镍的高频高损耗特性, 实现了电磁能量的衰减和吸收。在W波段(75~110 GHz)对所提出的镍SSPPs波导终端进行实验验证。实验结果表明, 在整个W波段, 该波导终端的回波损耗超过15 dB, 对应的电磁吸收率超过96.8%。

**关键词:** 电磁吸收; 匹配负载; 波导终端; 波导过渡; 人工表面等离子激元(SSPPs)

中图分类号: TN819.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024393

## A W-band waveguide termination based on nickel SSPPs

ZHANG Bo, ZHANG Yong\*, ZHU Huali

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** The electromagnetic losses of nickel waveguides in the submillimeter wave frequency band are measured, and a waveguide terminator based on nickel Spoof Surface Plasmon Polaritons (SSPPs) is designed for multi-port waveguide device measurements and power divider port isolation. The waveguide employs a simple and compact antisymmetric rectangular probe structure to efficiently couple electromagnetic energy from the waveguide to a microstrip, which is then transmitted to a comb-like SSPPs terminator. The microstrip circuit and SSPPs circuit are fabricated on a quartz substrate, with the metal circuit being electroplated metal nickel. Utilizing the band-stop characteristics of SSPPs and the high-frequency high-loss properties of metal nickel, the attenuation and absorption of electromagnetic energy are achieved. The proposed nickel SSPPs waveguide terminator is experimentally validated in the W-band(75~110 GHz). The experimental results indicate that the Return Loss of this waveguide terminator exceeds 15 dB across the entire W-band, with a corresponding electromagnetic absorption rate of over 96.8%.

**Keywords:** electromagnetic absorption; matched load; waveguide termination; waveguide transition; Spoof Surface Plasmon Polaritons(SSPPs)

波导终端是一种单端口的无源元件, 可衰减和吸收输入功率实现波导终端匹配, 广泛用于多端口波导器件的测量<sup>[1]</sup>或集成在波导功分器中<sup>[2]</sup>。目前有多种设计波导终端的方法, 如安装吸收材料<sup>[3-5]</sup>、薄膜电阻器<sup>[6]</sup>, 以及涂镀高损耗材料<sup>[7-8]</sup>等。传统的波导匹配终端利用端接波导外加电磁波吸收材料实现: 一种方法是在波导内部安装楔形吸波材料, 以减少输入反射<sup>[3]</sup>。但由于波导尺寸与工作频率成反比, 将传统方法用于亚毫米波波频段具有挑战性; 此外, 高频段吸波材料的获取以及吸波材料的高精确度切割和组装也是一个问题; 第二种方法是安装多层复合材料或使用垂直于波导终端的电阻吸收器<sup>[4-5]</sup>。但这种方式要么面临高频应用拓展问题<sup>[4]</sup>, 要么难以实现宽带吸收<sup>[5]</sup>; 第三种方法则是使用探针将波导中的功率耦合到微带线上, 然后将电阻终端短路<sup>[6]</sup>。但因电阻通

收稿日期: 2024-08-09; 修回日期: 2024-09-22

基金项目: 国家级重点实验室基金资助项目(61428032204)

\*通信作者: 张 勇 email:yongzhang@uestc.edu.cn

常用导电胶粘接固定，容易使终端阻抗失配。除安装额外的吸波材料外，一种新兴的方法是直接在波导表面涂镀损耗材料<sup>[7-8]</sup>。文献[7]采用间隙波导结构降低波导群速度，并在波导表面涂镀低电导率的导电胶，虽然实现了较高的导体损耗，但矩形波导中设置的大量精细结构很难用于亚毫米波频段。文献[8]将具有介电损耗和磁损耗的碳基铁涂料手工涂在波导表面，产生高电磁损耗。但 50~70  $\mu\text{m}$  的涂层厚度对于亚毫米波波导相当大，且厚度也无法精确控制。

不同于上述方法，本文提出一种基于镍人工表面等离子激元(SSPPs)的波导终端。首先，测量了金属镍的波导损耗水平，并估算其电磁参数，弥补金属镍在太赫兹频段的研究空白；其次，设计了新型直列式波导-微带过渡，利用一对反对称探针将波导中的能量高效耦合至平面电路，再利用镍 SSPPs 的高损耗和带阻特性，实现高电磁能量衰减和吸收的波导终端；最后，对镍 SSPPs 波导终端进行实验验证和分析。

## 1 金属镍的波导损耗

在射频电路中，常使用金、银、铜、铝等高电导率金属作为传输线的导体。金属镍是一种导电的铁磁性材料，在微波低频段下的电磁特性有较全面的报道<sup>[9-10]</sup>。当工作频率升高时，镍的相对磁导率下降，在 10 GHz 左右，镍的相对磁导率 $\mu_r$ 下降至接近 1，但在毫米波和太赫兹频段，目前还缺乏关于金属镍的电磁特性的报道<sup>[8]</sup>。

射频传输线的导体损耗主要取决于金属导体的衰减常数，该常数与表面阻抗成正比。表面阻抗 $R_s$ 可表示为：

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \quad (1)$$

式中： $f$ 为工作频率； $\mu$ 为金属磁导率； $\sigma$ 为金属电导率。因此，传输线的导体损耗与 $(\mu/\sigma)^{0.5}$ 成正比。

对于空气填充金属波导，其传输损耗主要由导体损耗贡献。为估计金属镍的电磁损耗水平，先对比测量 WR-4.3 型号(1.092 mm×0.546 mm, 170~260 GHz)的镍(Ni)和铝(Al)波导的传输损耗。2 种波导在相同的条件下加工，加工精确度为 $\pm 3 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度(Ra)为 0.1  $\mu\text{m}$ 。使用矢量网络分析仪和对应频段的扩频模块进行波导损耗测量，2 种波导的传输损耗如图 1 所示。

图 1 中的测量结果表明，在整个波导频带内，WR-4.3 铝波导的平均单位损耗为 0.017 dB/mm，而镍波导的平均损耗为 0.074 dB/mm，镍波导的传输损耗约为铝波导的 4.36 倍。因此，使用金属镍可实现更高的导体损耗和吸收。

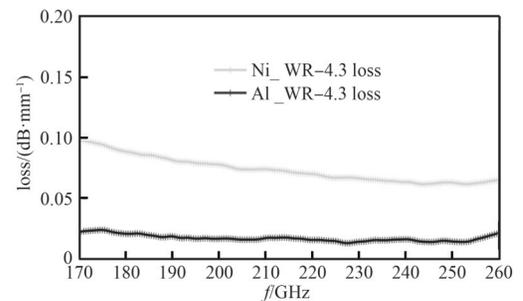


Fig.1 Comparison of transmission loss between nickel waveguide and aluminum waveguide  
图 1 镍波导和铝波导的传输损耗对比

## 2 电路设计

整个电路结构包括矩形波导、波导-微带过渡和 SSPPs 终端。其中，矩形波导提供标准的法兰接口；波导-微带过渡将波导的功率传输至平面传输线；SSPPs 终端则实现电磁能量的衰减和吸收。

### 2.1 波导-微带过渡结构

为实现对波导中电磁能量的吸收，首先提出一个直列式的波导-微带过渡结构，如图 2(a)~(b)所示。该过渡结构采用一种新型的反对称矩形探针结构，探针的配置类似对跖鳍线，但又像偶极子一样结构紧凑，同时保留了探针结构简单的优点，因此具有结构简单、紧凑和宽带工作的优点。为兼容其他场景的使用，在反对称探针后，增加了两级匹配枝节，可在宽频带范围匹配到标准的 50  $\Omega$ ，详细的工作原理可参考文献[11]。此外，微带线末端增加了微带弯以便于后续设置 SSPPs 终端。基于表 1 中的参数值，整个波导-微带过渡的仿真结果如图 2(c)所示，在 75~110 GHz 全波导频带，其回波损耗大于 25 dB，插入损耗约为 0.2 dB。

表 1 波导-微带过渡的结构参数(单位:mm)

Table1 Structural parameters of the waveguide-to-microstrip transition(unit:mm)

parameter	value	parameter	value	parameter	value
$a$	2.54	$w_0$	0.270	$l_2$	0.456
$b$	1.27	$w_1$	0.100	$l_3$	0.497
$h_c$	0.64	$w_3$	0.172	$d$	0.250
$\vartheta$	37.8°	$l_1$	0.792	$w_c$	0.210

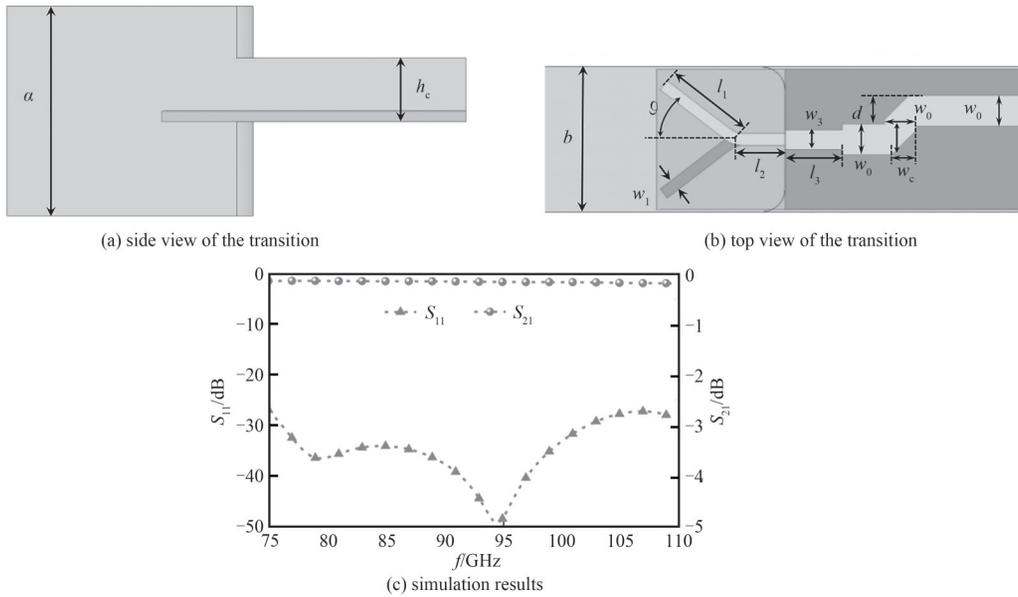


Fig.2 Waveguide-to-microstrip transition and simulation results  
图2 波导-微带过渡结构及其仿真结果

## 2.2 镍 SSPPs 终端

SSPPs 一般由周期性的金属结构和介质衬底构成，其色散特性可通过调节金属枝节的形状和尺寸控制。SSPPs 为低通传输线，存在截止频率上限，当工作频率超过截止频率时，SSPPs 无法导通<sup>[12]</sup>；当工作频率接近截止频率时，其损耗能力急剧上升。本文采用的 SSPPs 单元结构如图 3(a)所示，其中的金属结构包含一段微带主传输线和 1 个垂直的金属枝节，微带宽度  $w_0$  为 0.27 mm，金属枝节的宽度  $w_s$  为 20  $\mu\text{m}$ ，周期  $p_s$  为 40  $\mu\text{m}$ ；介质衬底为 50  $\mu\text{m}$  厚的石英， $\varepsilon_r=3.9$ ， $\tan \delta=0.005$ 。其中，枝节宽度  $w_s$  和间距  $(p_s-w_s)$  越小，传输线的欧姆损耗越大<sup>[13]</sup>。调节金属枝节的长度  $l_s$ ，可改变 SSPPs 传输线的色散特性和截止频率，如图 3(b)所示，图中的横坐标为归一化的相位常数，纵坐标为频率。微带线的频率与相位常数呈线性关系，SSPPs 的金属枝节越短，截止频率越高；当  $l_s=w_0/2$  时，SSPPs 变为微带线，其色散特性与微带线一致。因此可通过调节 SSPPs 枝节的长度选择所需的截止频率。

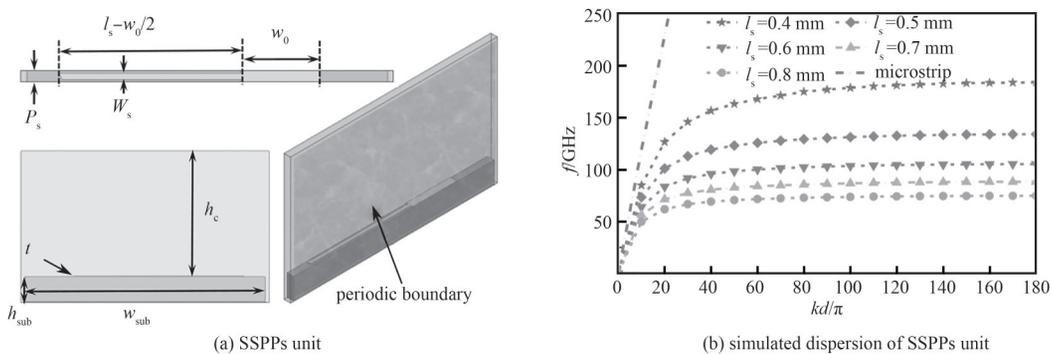


Fig.3 SSPPs unit and the simulated dispersion  
图3 SSPPs 单元结构及其仿真的色散特性

根据以上分析，不同长度的 SSPPs 金属枝节对应于不同的截止频率，通过调节 SSPPs 的枝节长度，可使该终端工作在接近 SSPPs 最高截止频率的频段，从而实现较高的导体损耗。此外，还需要足够多的金属枝节以产生较大的电磁衰减；枝节数量太少，不仅会导致衰减量不足，还会造成微带-SSPPs 过渡阻抗失配。因此本文将 SSPPs 终端设置为渐变的梳状结构，金属枝节为 40 个，如图 4(a)所示。一方面可将能量从微带低反射地过渡到 SSPPs；另一方面，金属枝节逐渐变长，电磁波传输到 SSPPs 末端时因频率截止而反射，SSPPs 结构可对反射的能量进行二次衰减，提高了电磁吸收率。随后，对该 SSPPs 终端进行三维电磁仿真，当从微带线一端馈电时，对比不同导体下的输入反射系数，如图 4(b)所示，采用回波损耗代表终端的衰减量。当导体为理想导体时，仅存在

介质损耗，带内平均损耗为 1.74 dB。当电导率下降时，SSPPs 终端的金属导体损耗增加，输入反射减小；当导体为铝(电导率为  $3.8 \times 10^7$  S/m)时， $S_{11}$  仅约 -12 dB。假设表面粗糙度等因素的影响忽略不计，且镍的特性随频率变化不敏感，根据式(1)，镍的电导率与相对磁导率之比( $\sigma/\mu_r$ )为铝的  $1/(4.36)^2$  倍，即  $\sigma/\mu_r \approx 3.8 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1} / (4.36)^2 \approx 2 \times 10^6 \text{ S/m}$ 。当导体为镍时，基于以上参数的镍终端的  $S_{11}$  低于 -20 dB。

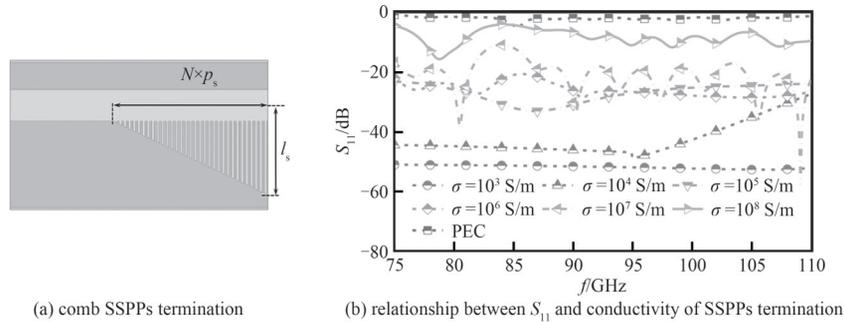


Fig.4 SSPPs termination and its parameters research

图4 SSPPs终端及其参数研究

随后，将波导-微带过渡与 SSPPs 结合，得到最终的整体模型，如图 5(a)所示，石英衬底的正反面金属电路皆为镍。假设镍的相对磁导率为 1，电导率为  $2 \times 10^6$  S/m，仿真得到的电磁吸收率和电场分布如图 5(b)所示。可以看出，电场在 SSPPs 终端被消耗，几乎没有额外的场反射导致谐振。在整个 W 波段，吸收率超过 93%，在大部分频点，吸波收率超过 98%，实现了良好的波导匹配和衰减。此外，通过将结构尺寸进行比例缩放，可在更高频段实现该波导终端。

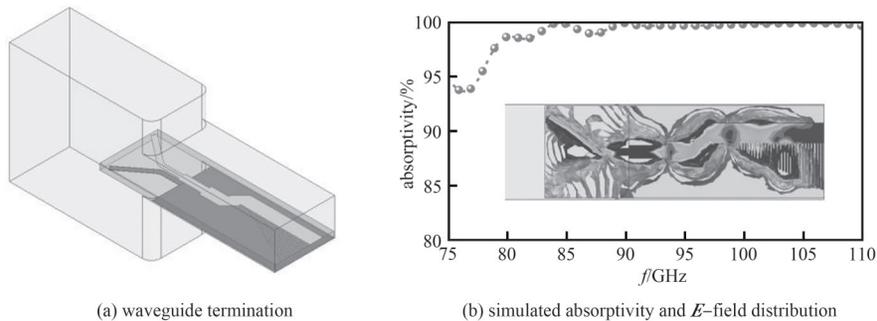


Fig.5 Waveguide termination and the simulated absorptivity

图5 波导终端及其仿真的吸收率

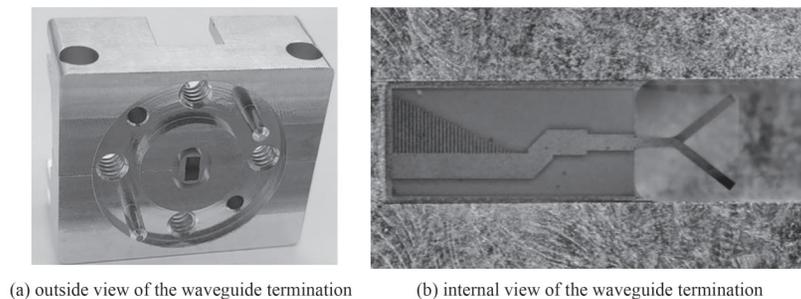


Fig.6 Photo of the waveguide termination

图6 波导终端实物

### 3 实验结果

为验证该设计，采用波导分块和金属铣削技术制造了波导外壳，加工精确度为  $\pm 10 \mu\text{m}$ ，材质为硬铝。采用薄膜工艺制造了镀镍的 SSPPs 电路，组装的镍 SSPPs 波导终端的实物如图 6 所示。使用 ROHDE & SCHWARZ ZVA-67 矢量网络分析仪和 W 波段变频模块进行测量，测量结果如图 7 所示。在 75~110 GHz 的范围，该波导终端的  $S_{11}$  小于 -15 dB，实现了超过 96.8% 的电磁吸收率。采用本文测算的镍的电磁参数，仿真与实测结果在低频段一致性较好，均达到了 20 dB 的吸收效果；在高频段的实测结果有所恶化，主要原因在于：一是加工误差导致制

作的镍 SSPPs 的表面形貌较差, 且存在一定的组装误差; 二是仿真所用的镍的电磁参数有误差, 该参数为近似值, 忽略了表面粗糙度和频率一致性的影响。

表 2 为波导终端的技术对比。相比传统填充吸波材料和阻性材料的方法, 本文所提的镍 SSPPs 波导终端技术可直接用于波导器件, 无需进行二次切割, 粘接牢固, 组装精确度和适用的工作频率更高。该终端可直接集成在多端口的毫米波及太赫兹波导元件中, 如波导耦合器和功分器等, 还可单独作为波导负载用于太赫兹测试测量领域。

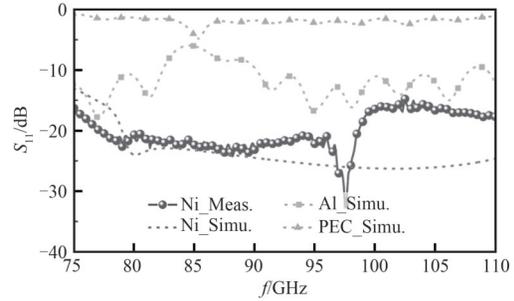


Fig.7 Simulation and measurement results of waveguide termination  
图 7 波导终端的仿真和测试结果

表 2 波导终端的技术对比

Table 2 Technical comparison of waveguide terminations

reference	frequency/GHz	FBW/%	port	RL/dB	absorptivity/%	type
[3]	17-22	25.6	ASIW	20	99.0	eccosorb GDS
[4]	75-100	28.6	RWG	10	90.0	TaN film
[7]	26-40	42.4	RWG	20	99.0	CA & Pin
[8]	85-115	30.0	RWG	12	93.7	CAF
TW	260-375	36.2	RWG	17	98.0	Ni-SSPPs

FBW: Fractional Bandwidth, RL: Return Loss, ASIW: Air-filled Substrate Integrated Waveguide, RWG: Rectangular Waveguide, CA: Conductive Adhesive, CAF: Carbon-loaded Absorbing Foam, TW: This Work, Ni: Nickel

## 4 结论

本文验证了镍波导在太赫兹频段的损耗特性, 并设计了一个基于镍 SSPPs 的波导终端。借助波导探针将功率耦合至 SSPPs 终端, 利用镍 SSPPs 的高损耗的阻带特性, 实现波导终端的完美吸收。该终端采用成熟的数控铣削、薄膜电镀和电路组装技术制备, 可用于超过 500 GHz 的波导电路中, 尤其适合毫米波及太赫兹频段的应用。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Bo, ZHU Huali, CHEN Yang, et al. Broadband resonance-free septum circular polarizer operating above 200 GHz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(5): 4461-4469. doi:10.1109/TAP.2023.3243847.
- [2] 张华, 邵登云, 曾升. V 波段高隔离宽带波导功分器设计[J]. 微波学报, 2018, 34(2): 30-34, 85. (ZHANG Hua, SHAO Dengyun, ZENG Sheng. Design of wideband waveguide power divider with high isolation in V band[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(2): 30-34, 85.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.201802005.
- [3] MARAH I, GHIOTTO A, PHAM J M, et al. AFSIW termination with full-and partial-height absorbing material loading[C]// 2019 the 49th European Microwave Conference (EuMC). Paris, France: IEEE, 2019: 686-689. doi:10.23919/EuMC.2019.8910911.
- [4] ZHANG Dang, ZHANG Yong, HUANG Jian, et al. An isolated waveguide divider for W-band power combined amplifier[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2023, 33(5): 535-538. doi:10.1109/LMWT.2023.3234373.
- [5] ZINKIEWICZ G, CHEVALIER A, LAURENT P, et al. Toward ultracompact multi-materials rectangular waveguide terminations[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(1): 12-21. doi:10.1109/TMTT.2022.3188318.
- [6] XU Zhengbin, XU Jie, CUI Yinjie, et al. A novel rectangular waveguide T-junction for power combining application[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(8): 529-531. doi:10.1109/LMWC.2015.2440775.
- [7] SHU Minjie, GUO Cheng, SHANG Xiaobang, et al. A Ka-band wideband matched load based on lossy waveguide structures[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(11): 1045-1048. doi:10.1109/LMWC.2020.3022665.
- [8] VILENSKIY A R, ZHANG Y Q, IVASHINA M V. Methods for attenuating and terminating waves in ridge gap waveguide at W-band: carbon-loaded foam, carbonyl iron paint, and nickel plating[C]// 2021 the 51st European Microwave Conference (EuMC). London, United Kingdom: IEEE, 2022: 217-220. doi:10.23919/EuMC50147.2022.9784367.
- [9] LUCYSZYN S. Microwave characterization of nickel[J]. PIERS Online, 2008, 4(6): 686-690.
- [10] STAROSTENKO S N, ROZANOV K N, SHIRYAEV A O, et al. Permeability of nickel determined from microwave constitutive parameters of composites filled with nickel powders[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-5. doi:10.1109/TMAG.2018.2852366.

- [11] ZHANG Bo,ZHU Huali,ZHANG Yong. Wideband in-line waveguide-to-microstrip transition with antisymmetric rectangular probes[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2024,34(6):591-594. doi:10.1109/LMWT.2024.3392922.
- [12] YE Longfang,CHEN Zhongkai,ZHANG Yong,et al. High performance multiple passband substrate integrated plasmonic filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs, 2023,70(4):1445-1449. doi:10.1109/TCSII.2022.3223920.
- [13] CABELLO-SÁNCHEZ J,DRAKINSKIY V,STAKE J,et al. A corrugated planar-goubau-line termination for terahertz waves[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2023,33(6):643-646. doi:10.1109/LMWT.2023.3239984.

#### 作者简介：

张 博(1995-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波理论、太赫兹固态电路 .email: 2834874954@qq.com.

朱华利(1995-), 男, 博士, 主要研究方向为微波毫米波电路、固态太赫兹技术.

张 勇(1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微波毫米波电路、固态太赫兹技术.

(上接第5页)

- [9] ZHANG Y,ZHAO D X,REYNAERT P. A flip-chip packaging design with waveguide output on single-layer alumina board for E-band applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(4): 1255-1264. doi: 10.1109/TMTT.2016.2536602.
- [10] LEONG K M K H,WILLIAM R D, RADISIC V,et al. A 340~380 GHz integrated CB-CPW-to-waveguide transition for sub millimeter-wave MMIC packaging[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009,19(6):413-415. doi:10.1109/LMWC.2009.2020043.
- [11] ALJAROSHA A,ZAMAN A U,MAASKANT R. A wideband contactless and bondwire-free MMIC to waveguide transition[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017,27(5):437-439. doi:10.1109/LMWC.2017.2690846.
- [12] 凌清岚,姚常飞,张炎. 330 GHz 集成化 T/R 组件的设计与实现[J]. 微波学报, 2024,40(3):79-84. (LING Qinglan,YAO Changfei,ZHANG Yan. Design and implementation of 330 GHz integrated T/R module[J]. Journal of Microwaves, 2024,40(3): 79-84.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.202403015.
- [13] 廖国君,姜兴,孙逢圆,等. 基于特征模理论分析的超宽带小型化准八木天线设计[J]. 微波学报, 2024,40(2):8-13. (LIAO Guojun,JIANG Xing,SUN Fengyuan,et al. Design of ultra-wideband miniaturized Quasi-Yagi antenna based on characteristic mode theory[J]. Journal of Microwaves, 2024,40(2):8-13.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.202402002.

#### 作者简介：

罗蒸鸿(2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹收发系统、太赫兹无源器件、高频封装 .email:3220221559@bit.edu.cn.

周梓乔(1997-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向太赫兹无源器件、太赫兹 MMIC 封装和太赫兹集成接收系统.

高 港(1997-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹收发系统、太赫兹无源器件、电磁带隙结构和太赫兹芯片封装.

于伟华(1978-), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为毫米波/太赫兹波芯片与集成系统.

周 明(1974-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为毫米波/太赫兹电路与系统集成技术、毫米波/太赫兹领域电路与系统设计与应用.