

基于石英薄膜工艺的D波段固定衰减器 设计及实现*

宗原¹ 杨笔帆¹ 成海峰² 赵亮^{3,4} 郭健^{1**}

(¹东南大学毫米波全国重点实验室, 南京, 210096) (²南京电子器件研究所, 南京, 210016)

(³东南大学网络空间安全学院, 南京, 210096) (⁴南京电子技术研究所, 南京, 210039)

2024-01-31收稿, 2024-05-14收改稿

摘要:薄膜电阻具有较为精确的电阻值,可用于微波固定衰减器设计。然而随着工作频率的升高,薄膜电阻的寄生参数随之增大,影响固定衰减器的衰减精度及回波性能。本文基于传统微波频段薄膜电阻等效电路模型,提出了一种十四元件等效电路模型。采用Ansys HFSS软件对薄膜电阻进行三维电磁场仿真并提取其S参数,通过S参数曲线拟合,最终确定各元件参数值。仿真结果表明,该等效电路模型在0.1~180.0 GHz可有效表征薄膜电阻的电气特性。在此基础上,采用石英薄膜工艺研制了三款不同衰减值的D波段(110~170 GHz)固定衰减器,并通过在片匹配电路补偿键合金丝和薄膜电阻寄生参量的影响。此外,还设计了波导-微带转换电路,将微带模式转换为标准波导模式进行衰减器性能的测量。测试结果表明,在110~170 GHz频带内,3 dB衰减器的衰减典型值为4 dB,回波损耗大于13.3 dB;6 dB衰减器的衰减典型值为5.5 dB,回波损耗大于11.4 dB;9 dB衰减器的衰减典型值为8 dB,回波损耗大于11.4 dB。研制的固定衰减器可将现有固定衰减器的工作频率拓宽至110 GHz以上,用于信号功率调节及改善器件级间回波的影响。

关键词:太赫兹;固定衰减器;石英薄膜工艺;薄膜电阻;等效电路模型

中图分类号:TN715 文献标识码:A 文章编号:1000-3819(2024)04-0295-07

Design and Implementation of D-band Fixed Attenuator Based on Quartz Thin-film Process

ZONG Yuan¹ YANG Bifan¹ CHENG Haifeng² ZHAO Liang^{3,4} GUO Jian¹

(¹ The State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, 210096, CHN)

(² Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, 210016, CHN)

(³ School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, CHN)

(⁴ Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, 210039, CHN)

Abstract: Thin-film resistors have more accurate resistance values and can be used in fixed attenuator designs. However, with the increase of the operating frequency, the parasitic parameters of the thin film resistor increase, which affects the attenuation accuracy and return performance of the fixed attenuators. Based on the traditional microwave band thin-film resistor equivalent circuit model (ECM), a fourteen-element ECM was proposed in this paper. Ansys HFSS software was used to simulate the three-dimensional electromagnetic field of the thin-film resistor and extract its S-parameters, and the parameters of each element were finally determined by S-parameter curve fitting. The simulat-

* 基金项目:国防重点实验室基金项目(612502200302)

** 联系作者:E-mail: jguo@seu.edu.cn

ed results show that the ECM can effectively characterize the electrical properties of the film resistor among 0.1~180.0 GHz. On this basis, three D-band (110~170 GHz) fixed attenuators with different attenuation are developed using quartz thin-film process, and the influence of the parasitic parameters of the bonding wires and thin-film resistors was compensated by the on-chip matching circuit. Additionally, a waveguide/microstrip transition circuit was designed for converting microstrip mode to standard waveguide mode for attenuator performance measurement. The measured results show that in the 110~170 GHz operating band, the typical attenuation of the 3-dB, 6-dB and 9-dB attenuator are 4 dB, 5.5 dB and 8 dB, and the return loss are greater than 13.3 dB, 11.4 dB and 11.4 dB, respectively, which are in good agreement with simulated results. The developed fixed attenuators can extend the operating frequency of existing ones to above 110 GHz, suitable for signal power adjustment and inter-device return loss effects improvement.

Key words: terahertz; fixed attenuators; quartz thin-film process; thin-film resistors; equivalent circuit model

引 言

太赫兹频段在通信、雷达等领域得到越来越多地应用,也不断推动着太赫兹频段器件技术的发展。衰减器是射频电路中最常用的器件之一,可用于调控信号大小、改善器件回波及电路稳定性,在各种微波测试仪器和射频收发系统中发挥着重要作用^[1-2]。

固定衰减器一般基于砷化镓、氧化铝陶瓷、氧化铍、氮化铝、石英等衬底材料,结合薄膜电阻材料进行设计。随着频率的升高,薄膜电阻材料的寄生参数增加,影响衰减器的高频性能。因此固定衰减器设计需充分考虑薄膜电阻的寄生参数影响,并结合固定衰减器的拓扑结构进行电路联合设计。

在薄膜电阻等效电路模型研究方面,Wang等人^[3]提出了一种新型六元件薄膜电阻模型,该模型基于微带理论,并引入了一个经验性的自电容参数,模型的仿真S参数与测量结果在DC~40 GHz频率范围内表现出非常好的一致性。Li等人^[4]提出了一种基于特征函数方法的两步式参数提取办法,利用传输矩阵提取了电阻五元件等效电路模型参数,与电阻在0.1~40.0 GHz频率范围内的测试结果非常吻合。吴凯伦^[5]对毫米波频段的薄膜电阻进行建模,并通过电磁仿真验证0.1~100.0 GHz的七元件等效电路模型参数拟合效果。可以看出,现有薄膜电阻等效电路模型频率最高只覆盖到100 GHz。实际上,随着工作频率进入毫米波频段,薄膜电阻的趋肤效应及介质损耗愈加明显,导致寄生参数显著增加,这使得传统等效电路模型难以适应太赫兹频段的应用需求。

在高频固定衰减器研究方面,段磊等人^[6]根据传统的四元件电阻等效电路模型分析了高频电阻寄生电容,在氧化铝陶瓷基片上制作了一款3 dB宽带固定衰减器,在DC~20 GHz具有良好的衰减平坦度及端口驻波特性。Liang等人^[7]采用砷化镓工艺设计了衰减量为30 dB内的分布式阻性衰减器,在DC~67 GHz的频率范围内均能表现出良好的平坦度。GigOptix公司研发的砷化镓固定衰减器芯片工作频率覆盖DC~105 GHz^[8]。河北雄安太芯电子科技有限公司采用砷化镓工艺生产的系列固定衰减器芯片工作频率为70~110 GHz,衰减量覆盖2~35 dB^[9]。可以看出,现有固定衰减器的研究及商用产品工作频率均在110 GHz以下。

基于砷化镓基片的固定衰减器流片周期长、研制成本高,而陶瓷基片介电常数高,容易产生高次模,且当基片厚度较薄时容易变形,不利于后期装配及保存。石英材料与前两者相比具有介电常数稳定、介质损耗更低等优点^[10],可以根据需要加工成不同厚度,尤其适合太赫兹频段的器件设计。

为了将固定衰减器的工作频率进一步提高到110 GHz以上,本文针对D波段(110~170 GHz)雷达及通信组件的应用需求,采用电路及三维电磁场仿真工具,基于石英基片薄膜工艺,开展薄膜电阻等效电路模型研究,在此基础上设计了三款不同衰减量的固定衰减器,并进行了测试分析。

1 薄膜电阻建模

图1为薄膜电阻的结构示意图。低频工作时,薄膜电阻的面电阻率和长宽比决定了负载电阻的阻值大小,可由公式 $R=\rho L/W$ 计算得出。其中, ρ

为薄膜电阻的面电阻率, L 和 W 分别为薄膜电阻的长度和宽度。当工作频率进入微波频段,一般采用四元件、五元件等等效电路模型来表征其寄生参数效应。而当工作频率进入太赫兹频段,上述模型无法准确描述薄膜电阻的寄生参数特性。为了得到更准确的等效电路模型,本文首先采用三维电磁场仿真软件 Ansys HFSS 对薄膜电阻的 3D 物理模型结构进行建模、全波仿真,并提取其两端口 S 参数,在此基础上建立和优化相应的等效电路模型,这种方法准确性高且快速有效^[11]。

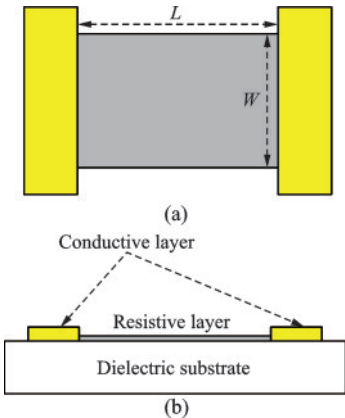


图1 薄膜电阻结构图:(a)俯视图;(b)侧视图
Fig.1 Structure diagrams of thin-film resistor: (a) Overhead view; (b) Side view

常用的毫米波薄膜电阻的材料有 TaN、Ni-Cr 和 Cr-Si 等^[12]。Ni-Cr 具有良好的热稳定性,但容易受到化学腐蚀的影响,也容易发生形变。Cr-Si 具有良好的耐腐蚀性,但机械性能较差。而 TaN 作为广泛使用的电阻材料,具有较小的电阻温度系数和较好的功率吸收性能,故本文采用 TaN 作为薄膜电阻的材料。工艺设计中,方阻设计为 $50\ \Omega/\square$ 。

在 Ansys HFSS 软件中建立的薄膜电阻三维模型如图 2 所示。衬底材料选择介电常数为 3.78 的石英,厚度为 0.127 mm,为在尺寸上匹配特性阻抗为 $50\ \Omega$ 的线宽,方阻尺寸设计为 $0.26\ \text{mm}\times 0.26\ \text{mm}$ 。在 0.1~180.0 GHz 频率范围内对该薄膜电阻进行 S 参数仿真,得到的 S 参数用于后续的等效电路各元件参数拟合确认。

图 3 为本文提出的十四元件等效电路模型。其中, R_1 为本征电阻, L_1 为薄膜电阻的分布电感, C_1 为电极的极间电容, L_2 为电极与薄膜电阻的接触电感, C_2 为电阻片到衬底的电容, R_2 、 L_3 、 C_3 分别为衬底的寄生电阻、寄生电感和寄生电容。本文等效电路模型比四元件、五元件等等效电路模型增加了电极与

薄膜电阻的接触电感和衬底的寄生电感,从而详细表征了高频下的寄生效应,拓宽了模型的应用频率。通过三维电磁场仿真与等效电路模型仿真的 S 参数进行对比拟合,可提取得到各电路元件参数,结果如表 1 所示。

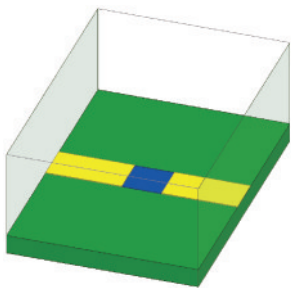


图2 薄膜电阻三维模型
Fig.2 3D model of thin-film resistor

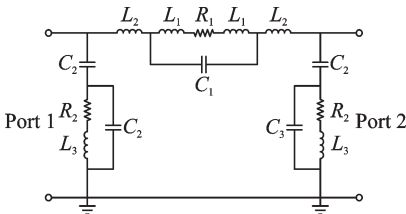


图3 薄膜电阻等效电路模型
Fig.3 Equivalent circuit model of thin-film resistor

表 1 薄膜电阻参数提取结果				
Tab.1 Parameters extracted from thin-film resistor				
Parm.	R_1/Ω	L_1/pH	L_2/pH	C_1/fF
Value	50.2	19.1	61.9	35.4
Parm.	C_2/fF	C_3/fF	R_2/Ω	L_3/pH
Value	13.0	9.0	6.4	35.8

图 4 给出了拟合得到的 S 参数曲线与 Ansys HFSS 仿真的原始曲线对比情况,可以看出,由于充分考虑了薄膜电阻的高频特性以及电极尺寸的影响,等效电路模型与三维电磁场仿真结果在 0.1~180.0 GHz 范围内吻合较好。由图 4 还可以看出,随着频率的升高,薄膜电阻明显偏离其电阻特性,寄生参数主要表现为容性。衬底寄生电阻(R_2)已较为明显,在后续的仿真中也体现为衰减器衰减值高于计算结果。电极间寄生电容(C_1)较大,这也是薄膜电阻呈现容性的主要原因。太赫兹频段薄膜电阻的寄生电容和电感大大增加了固定衰减器的设计难度,必须优化固定衰减器的结构并对其进行参数补偿。

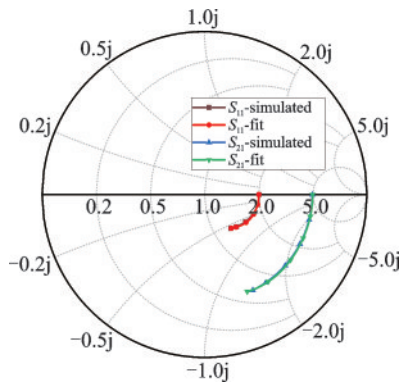


图4 等效电路与仿真结果对比
Fig.4 Comparison of equivalent circuit and simulated results

2 固定衰减器设计

固定衰减器通常由电阻组成,其衰减量由电阻阻值决定。毫米波衰减网络的基本电路结构主要分为T型和 π 型两种。当衰减量相同时,T型结构中的电阻阻值比 π 型结构中的小,因而占用的面积小,故本文的固定衰减器采用T型衰减结构。

2.1 衰减电路设计

设计衰减量分别为3、6、9 dB的固定衰减器,衰减器的主体结构为T型电路。等效电路模型中的分析指出,电极间的寄生电容较大,将明显影响其传输特性,而减小电极尺寸可有效降低电极间电容。因此,本文将传统T型衰减电路中的并联接地电阻转换为两个阻值相等的并联电阻,分别放置于主传输线的两侧,其电阻值是原始电阻值的两倍。经过计算,三款衰减器所需的串联电阻 R_s 和并联接地电阻 R_p 的初值如表2所示。

表2 衰减电阻阻值		
Tab.2 Attenuation resistance		
Attenuation/dB	R_s/Ω	R_p/Ω
3	8.5	283.8
6	16.6	133.8
9	23.6	81.2

通过公式 $R=\rho L/W$ 可以初步计算得出所需电阻的长宽比。由于级间电容的存在,高频下电阻阻值小于低频时的阻值,因此需要增大电阻的长宽比以获得足够的衰减。同时,应该尽可能减小电阻的尺寸,以降低寄生电感和寄生电容的影响。此外,还需要考虑到生产工艺的限制,确保采用的电阻尺寸符合设计规则。综合以上因素,在Ansys HFSS

中建立三款固定衰减器D波段(110~170 GHz)的三维模型。初步仿真调试发现,衰减器在高频出现衰减量不平坦,端口驻波变差的情况。这主要是由薄膜电阻的寄生电容及寄生电感导致的。因此,采用以下方法减小寄生影响:其一是采用金属化孔接地,在工艺允许的范围内尽可能减小孔间距以及孔与金属焊盘的间距以提高接地效果;其二是调整电阻两端的电极尺寸,减小电极间寄生电容对衰减器性能的影响;其三是优化薄膜电阻的尺寸,以拓展使用宽带。图5给出了3 dB衰减器的平面示意图,其具体尺寸参数如表3所示。

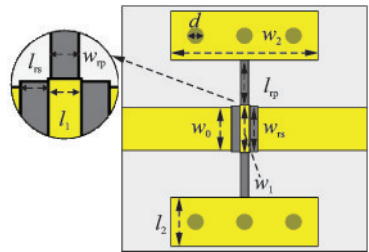
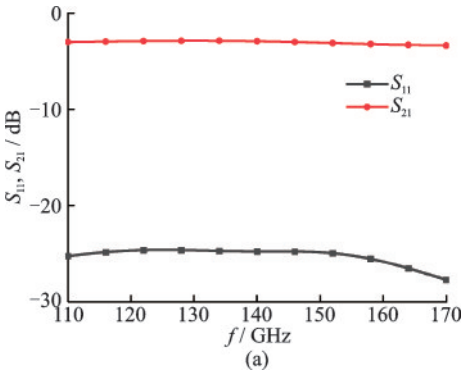


图5 固定衰减器平面示意图
Fig.5 Schematic of fixed attenuator

表3 3 dB衰减器尺寸参数					
Tab.3 Parameters of 3-dB attenuator					
Parm.	w_s/mm	l_s/mm	w_p/mm	l_p/mm	w_0/mm
Value	0.28	0.05	0.05	0.278	0.26
Parm.	w_1/mm	w_2/mm	l_1/mm	l_2/mm	d/mm
Value	0.29	0.9	0.06	0.3	0.1

由于三款衰减器选用的电阻各不相同,产生的寄生参量也不同,因而所需中间电极的尺寸也有差异。三款衰减器的衰减电路仿真结果如图6所示。由仿真结果可看到,在110~170 GHz频带内,3 dB衰减器的衰减量为2.84~3.34 dB,回波损耗优于24.6 dB;6 dB衰减器的衰减量为4.38~5.31 dB,回波损耗优于17.6 dB;9 dB衰减器的衰减量为6.43~7.89 dB,回波损耗优于14.4 dB。



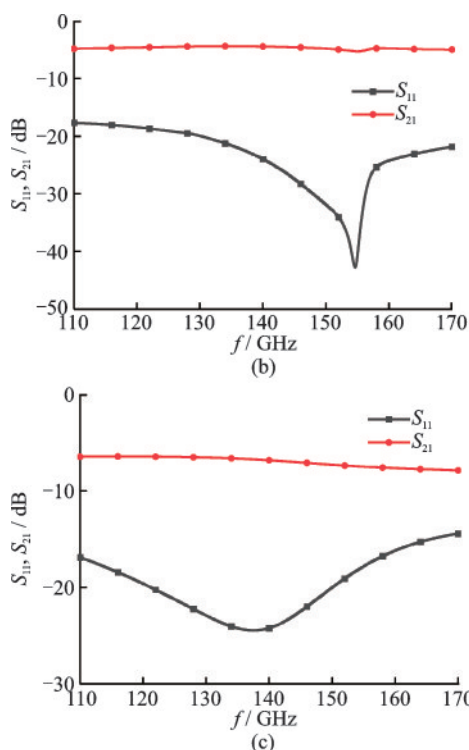


图6 衰减器仿真结果: (a) 3 dB; (b) 6 dB; (c) 9 dB
Fig.6 Simulated results of the attenuators: (a) 3-dB;
(b) 6-dB; (c) 9-dB

2.2 键合金丝电感片上匹配电路设计

金丝键合技术主要是将基片与外部电路相连,便于基片的测试和使用。在高频条件下,键合金丝会受到寄生参数的影响,产生寄生电感。图7给出了金丝键合在HFSS软件的三维电磁场仿真模型及仿真结果。模型采用两片厚度均为0.127 mm的石英衬底,通过三根键合金丝连接两片衬底上的50 Ω 微带线。键合金丝的直径为25 μm ,高度为25 μm 。由仿真结果可以看出,在110~170 GHz频带内,直接采用金丝键合的回波损耗为-19~-13 dB,会显著恶化器件性能。当衰减器与焊盘较小的芯片相连时,键合金丝的直径需进一步缩小至18 μm ,且键合金丝数量减少到1至2根,这会导致回波性能进一步恶化。

键合金丝在高频条件下产生的寄生电感会导致传输性能严重恶化,因此设计在片补偿结构来抵消寄生电感的影响。保持一侧石英衬底结构不变,在靠近键合金丝的一端加入阶跃阻抗线,并优化阶跃阻抗线的线长和线宽,三维模型图和优化结果如图8所示。结果表明,经过补偿后,在110~170 GHz频带内,金丝键合的回波损耗均大于22 dB,大大减小了金丝键合寄生效应的影响。

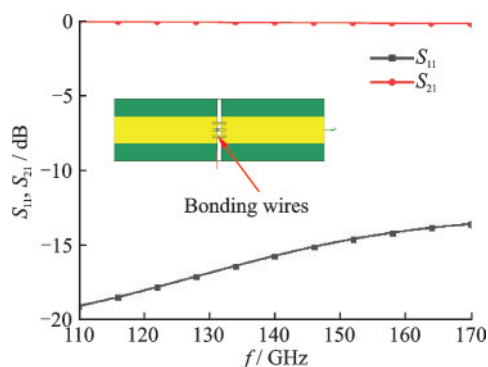


图7 金丝键合模型及仿真结果
Fig.7 Model and simulated results of wire bonding

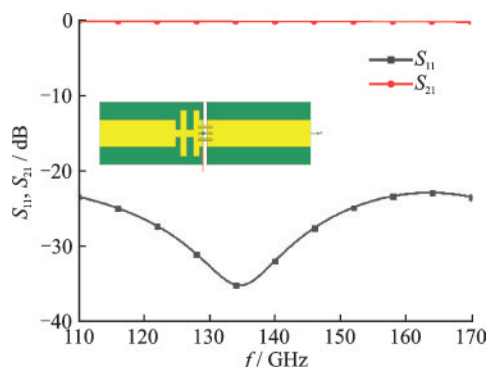


图8 键合金丝电感匹配后的模型及仿真结果
Fig.8 Model and simulated results after bonding wire inductor matching

2.3 波导-微带转换探针设计

为方便对衰减器性能进行测试,采用E面探针波导-微带转换将微带准TEM模转化为波导TE₁₀模,并制作衰减器测试夹具。在Ansys HFSS中设计和仿真了一款D波段波导-微带转换探针,其模型及仿真结果如图9所示。可以看出,该探针在110~170 GHz频带内回波损耗均优于22 dB,插入损耗小于0.1 dB,表现出优秀的传输性能。

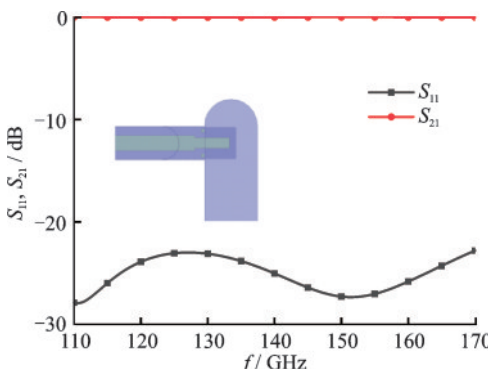


图9 波导-微带转换探针模型及仿真结果
Fig.9 Model and simulated results of waveguide-to-microstrip transition

2.4 测试夹具整体电路仿真

为模拟测试夹具性能,在 HFSS 软件中搭建 D 波段固定衰减器的测试夹具三维仿真模型,如图 10 所示,在 110~170 GHz 频带内,3 dB 衰减器的衰减量为 2.88~3.60 dB,回波损耗优于 17.35 dB;6 dB 衰减器的衰减量为 5.26~7.31 dB,回波损耗优于 15.09 dB;9 dB 衰减器的衰减量为 6.81~10.22 dB,回波损耗优于 13.97 dB。可以看出,衰减器、键合金丝以及转换探针的级联使得回波性能出现一定下降。频率高端的回波性能与频段低端基本相当,但衰减值却明显增加,这主要是由于高频下等效电路模型中并联支路的寄生电阻的损耗明显增加。这也提示在设计太赫兹频段宽带衰减器时,应尽量采

用损耗角小的基片材料,或者尽量降低并联支路的寄生电容及寄生电感,从而降低并联支路的色散效应。

3 衰减器加工与测试

在厚度为 0.127 mm 的石英衬底上制作了固定衰减器和波导—微带转换探针的电路部分,实际制作出的衰减器平面尺寸为 1.5 mm×1.5 mm。将衰减器和探针安装在金属腔体中以屏蔽外部干扰,两端信号接口均采用 WR6 标准波导。固定衰减器实物内部结构照片如图 11 所示。

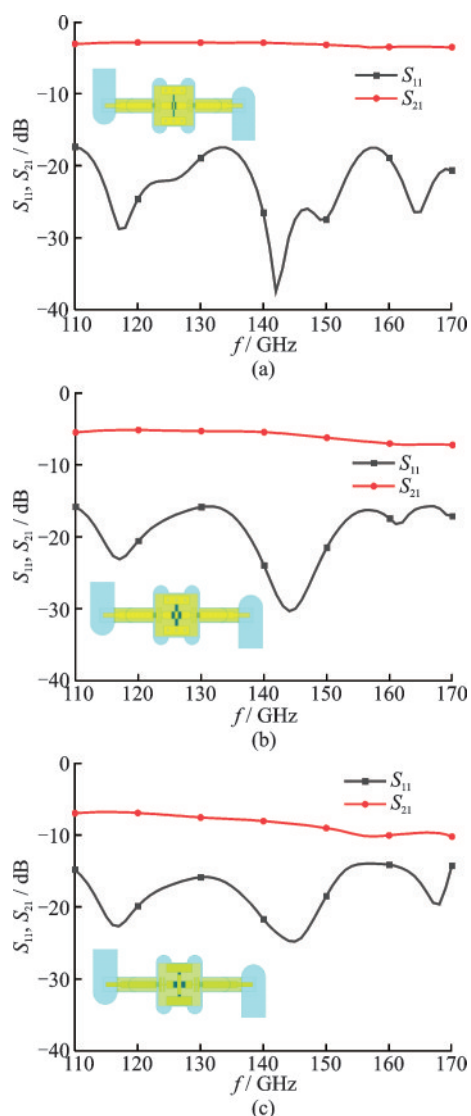


图 10 衰减器整体模型及仿真结果: (a) 3 dB; (b) 6 dB; (c) 9 dB

Fig.10 Overall model and simulated results of the attenuators: (a) 3-dB; (b) 6-dB; (c) 9-dB

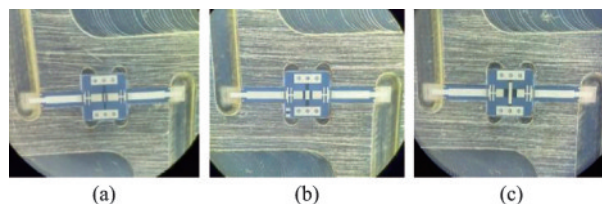


图 11 衰减器实物内部照片: (a) 3 dB; (b) 6 dB; (c) 9 dB
Fig.11 Inside photos of the attenuators: (a) 3-dB; (b) 6-dB; (c) 9-dB

图 12 给出了固定衰减器的测试场景照片。网络分析仪采用 Keysight N5227B, 经中电科思仪的 82407B 扩频模块扩展频率到 D 波段。

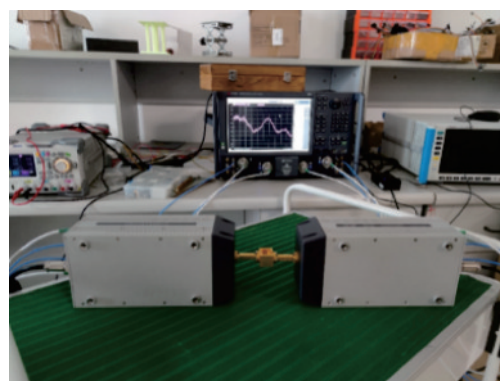


图 12 衰减器测试场景
Fig.12 Measurement platform of attenuators

衰减器的测试与仿真结果对比如图 13 所示,在 110~170 GHz 频带内,3 dB 衰减器衰减典型值为 4 dB,回波损耗大于 13.3 dB;6 dB 衰减器衰减典型值为 5.5 dB,回波损耗大于 11.4 dB;9 dB 衰减器衰减典型值为 8 dB,回波损耗大于 11.4 dB。考虑到实际加工、基片装配和测试带来的误差,所设计的衰减器的测试结果与仿真结果吻合较好。

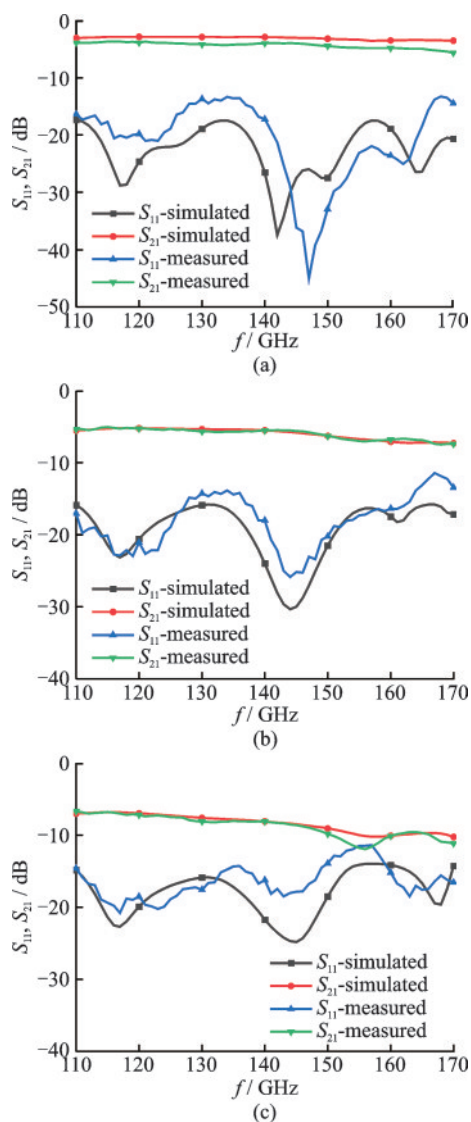


图13 衰减器仿真测试结果对比:(a) 3 dB;(b) 6 dB;(c) 9 dB
Fig.13 Comparison of simulated and measured results of the attenuators: (a) 3 dB; (b) 6 dB; (c) 9 dB

4 结 论

本文提出了一种太赫兹频段薄膜电阻等效电路模型,该模型在180 GHz以下与三维电磁场仿真结果吻合较好。采用该模型指导设计了三款D波段石英基片固定衰减器,获得了较好的实测结果。该衰减器可弥补现有研究及商用器件的不足,有效应用于D波段收发组件的设计中。薄膜电阻的建模及衰减器的设计方法可借鉴应用到更高频段的器件设计中。

参 考 文 献

- [1] 朱光州,张世义,王俊强,等.一种基于 π 型氮化铝薄膜电阻的MEMS衰减器[J].微电子学,2021,51(5): 739-745.
- [2] 王聪玲,钟清华,龙立铨,等.MMIC芯片衰减器的设计与检测[J].电子元件与材料,2019,38(3): 86-90.
- [3] Wang Z, Deen J, Rahal A. Accurate modelling of thin-film resistor up to 40 GHz[C]. 32nd European Solid-state Device Research Conference. Firenze, Italy: IEEE, 2002: 307-310.
- [4] Li Y, Wei Z. A high-frequency scalable model for thin-film resistor on GaN substrate[C]. IEEE International Conference on Communication Technology. Hangzhou: IEEE, 2015: 589-592.
- [5] 吴凯伦. GaN HEMT 功率放大器建模[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.
- [6] 段磊,于长江. 宽带微波片式固定衰减器的研究[J]. 电子技术与软件工程, 2021(17): 62-64.
- [7] Liang W, Xu H, Guo W. Design of distributed resistive attenuator for the on-wafer transmission coefficient verification[C]. 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Nanjing: IEEE, 2021: 1-3.
- [8] GigOptix. EWA65xxZZ-903-00r1[EB/OL]. [2024-01-15]. <https://datasheet.octopart.com/EWA6502ZZ-GigOptix-datasheet-11797449.pdf>.
- [9] 河北雄安太芯电子科技有限公司. TCC1902T~TCC1935T [EB/OL]. [2024-01-15]. <https://www.txtech.com/PrevProductContentPage/716984>.
- [10] 张楠,王平,何凯晨,等.基于JC-Z05石英的薄膜电路基板工艺适用性研究[J].宇航材料工艺,2023,53(2): 49-54.
- [11] 薛川,梁聪,张晓东,等.一种高频无源元件的EM建模分析技术[J].电子科技,2011,24(1): 59-64.
- [12] 李倩,汪蔚,杨拥军,等.MEMS微波/毫米波TaN薄膜负载电阻的设计与实现[J].微纳电子技术,2017,54(5): 336-341.



宗 原(ZONG Yuan) 女,1999年生,东南大学在读硕士研究生,主要研究领域为毫米波、太赫兹电路设计。