

文章编号: 2095-4980(2021)06-0963-05

太赫兹波导固定衰减器的设计

刘长春¹, 赵建波¹, 张陶陶²

(1.中国电子科技集团公司 第四十研究所, 安徽 蚌埠 233010; 2.中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要: 随着太赫兹技术的迅速发展, 太赫兹系统中使用的波导衰减器也成为研究热点。波导衰减器可以对太赫兹信号实现精确衰减和控制功率传输, 在解决损耗、辐射和干扰等一系列问题中, 具有特殊意义和不可替代的地位。而目前的波导衰减器将衰减片平行于电场放置在矩形波导内, 破坏矩形波导传输线, 容易造成射频泄露。本文基于吸收式波导衰减器工作原理, 提出了一种衰减片垂直于矩形波导电场的波导固定衰减器, 通过将衰减片贴在波导内壁, 保证传输线完整。使用高频电磁仿真软件 HFSS, 通过改变衰减片的形状、位置等参数, 优化回波损耗、衰减精确度等指标, 最终完成 110~170 GHz 波导固定衰减器的研制。在 110~170 GHz 频率范围内, 衰减器的回波损耗小于 -27.5 dB, 在 20 dB 的衰减时, 衰减精确度小于 ± 2 dB。

关键词: 太赫兹; 固定衰减器; 电压驻波比(VSWR); 衰减精确度

中图分类号: TN715

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020609

Design and research of THz waveguide fixed attenuator

LIU Changchun¹, ZHAO Jianbo¹, ZHANG Taotao²

(1.The 40th Institute of China Electronic and Technology Corporation, Bengbu Anhui 233010, China;

2.China Electronics Technology Instruments Co., Ltd, Qingdao Shandong 266555, China)

Abstract: With the rapid development of THz technology, the waveguide attenuator used in THz system has also become a hotspot. The THz waveguide attenuator can accurately attenuate and control the power transmission, which shows special significance and plays an irreplaceable role in solving the problems of loss, radiation and interference. The current waveguide attenuator would destroy the waveguide transmission line and result in the RF leakage because it places the attenuation plate paralleling to the electric field. Based on the principle of the absorbent waveguide attenuator, a waveguide attenuator with the attenuation plate perpendicular to the electric field is proposed. The attenuation plate is attached to the inner wall of the waveguide. The waveguide attenuator is realized and optimized by using the HFSS software and changing the shape, position and other parameters of the attenuation plate. The return loss is less than -27.5 dB in 110~170 GHz, and the attenuator accuracy is less than ± 2 dB in the attenuation of 20 dB.

Keywords: THz; fixed attenuator; Voltage Standing Wave Ratio(VSWR); attenuator accuracy

太赫兹波具有频带宽、波长短、传输速率高、容量大、方向性强、安全性高、穿透性好等特点, 基于这些特性, 太赫兹波在遥感和遥测、雷达、电子侦察、精确制导、星间通信、亚毫米波空间探测与环境监测、太赫兹测试系统、太赫兹安检系统、无损探伤等领域具有独特的优越性和巨大的应用前景, 太赫兹技术已经成为各国研究的热点。随着对太赫兹技术研究的不断深入, 对太赫兹无源器件的需求日益迫切, 对其性能提出了更高的要求。太赫兹无源器件直接影响着整个系统的性能, 因此其研究受到更多的关注^[1]。

太赫兹波导衰减器的主要功能是控制太赫兹信号的电平幅度, 对输入信号实现固定衰减, 主要应用于控制进入系统的输入信号功率, 调节系统的输出信号功率, 模拟通信系统中信号传输通路的损耗, 在航空、航天、电子等各类测量设备及自动测试系统等领域中广泛应用。

1 太赫兹波导固定衰减器的设计原理

1.1 矩形波导传输线原理

矩形波导常用在高功率系统、毫米波系统中。矩形波导不能传输横向电磁场(TEM)波；其传播模式可分横电(TE)波和横磁(TM)波两大类，且有无限多的模式，每一种模式具有截止特性，只有工作频率高于其截止频率时才能传输。在矩形波导中主模是 TE_{01} 模，波导窄边 b 总是小于宽边 a ，即 $b < a$ ，如图 1、图 2 所示。

$$f_{cTE_{01}} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1)$$

$$\lambda_{cTE_{01}} = 2a \quad (2)$$

式中： $f_{cTE_{01}}$ 为 TE_{01} 模的截止频率； $\lambda_{cTE_{01}}$ 为 TE_{01} 模的截止波长； a 为波导长边长度； μ 为磁导率； ϵ 为填充介质的介电常数。

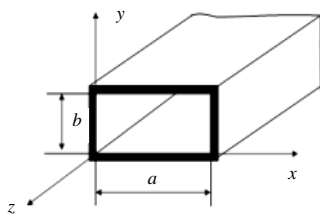


Fig.1 Diagram of rectangular wave guide
图 1 矩形波导示意图

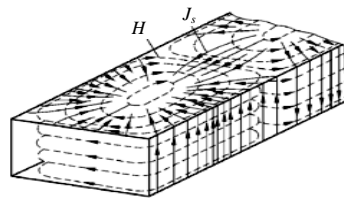


Fig.2 Current density distribution of rectangular wave guide TE_{01}
图 2 矩形波导 TE_{01} 模电流密度分布

1.2 吸收式波导衰减器工作原理

波导衰减器通过电阻消耗功率变为热量的形式实现衰减。对于吸收式波导衰减器，通常在波导中平行于电场方向放置 1 个具有一定衰减量的衰减片，来实现衰减功能。因为有损耗性薄膜或者介质表面有一定的电阻，所以沿其表面的电磁波电场切向分量，将在其上引起传导电流，形成焦耳热损耗并以热能的形式散发掉。只要控制衰减器的衰减量，就可以使信号通过衰减器后被减弱到所需要的电平^[2]。

吸收式波导衰减器可以分为固定式和可变式。衰减片均平行于电场方向放置，其中固定式衰减器的衰减片位置和面积固定不变，而可变式衰减器可以通过传动机构来改变衰减片的位置或面积，最终实现衰减量的改变，如图 3 和图 4 所示。

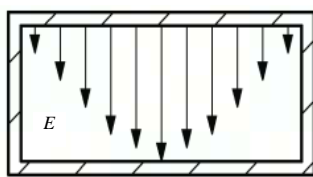


Fig.3 Electric distribution of rectangular wave guide
图 3 矩形波导电场分布

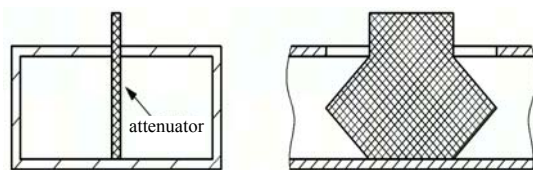


Fig.4 Diagram of rectangular wave guide fixed attenuator
图 4 波导固定衰减器示意图

2 波导固定衰减器的设计与仿真

由于现有的波导固定衰减器将衰减片平行于电场放置在矩形波导内，破坏了矩形波导传输线的完整性，容易造成射频泄露，并影响回波损耗等指标。通过对标准矩形波导和有缝隙的矩形波导进行建模，如图 5 和 6 所示，经过仿真对比可以发现，当矩形波导存在缝隙时，回波损耗恶化严重，如图 7 所示。

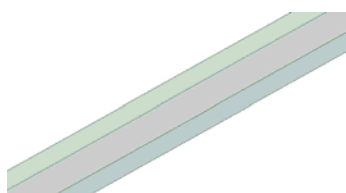


Fig.5 Rectangular wave guide
图 5 标准矩形波导

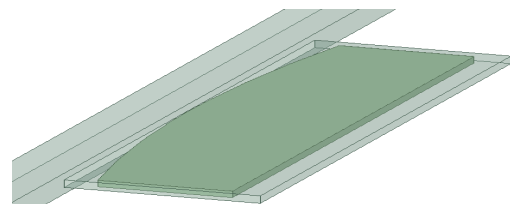


Fig.6 Rectangular wave guide with gap
图 6 有缝隙的矩形波导

因此本文基于吸收式波导衰减器工作原理，提出了一种衰减片垂直于矩形波导电场的波导固定衰减器，即将衰减片贴于波导内壁的宽边上，使衰减片与电场垂直，达到不破坏矩形波导传输线的目的，如图 8 所示。

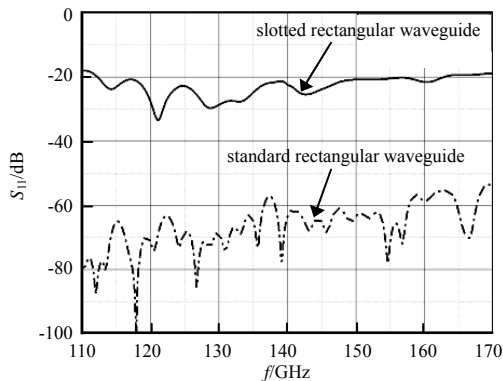


Fig.7 Simulation comparison
图 7 仿真对比

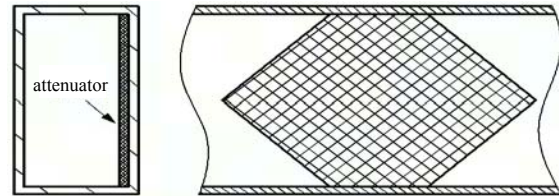


Fig.8 Diagram of rectangular wave guide fixed attenuator
图 8 波导固定衰减器示意图

2.1 衰减器材料选择

2.1.1 基片材料

基片对于衰减器的基本性能、可靠性、成本和产品的成品率等都有很大影响。目前国内外常用的陶瓷基片有 Al_2O_3 、 BeO 、 AlN 、 Si_3N_4 、 SiC 等^[3]。这几种陶瓷基片的基本性能如表 1 所示。由于 Al_2O_3 陶瓷基片的机电性能好，介质损耗低，绝缘电阻高，热膨胀系数小，耐热性能好^[4]，因此选用 Al_2O_3 陶瓷基片作为基片材料。

表 1 几种常用陶瓷基片材料性能

Table1 Properties of several commonly used ceramic materials

performance	99.5% Al_2O_3	BeO	AlN	Si_3N_4	SiC
density/(g/cm^3)	3.90	2.90	3.25	3.18	3.2
coefficient of thermal expansion/($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	7.4	7.5	4.4	3.2	3.8
thermal conductivity/($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	30	250	260	40	270
dielectric constant/MHz	9.7	6.7	8.9	9.4	40
dielec loss/ $\text{Hz}(\times 10^{-4})$	1	4	3-10	-	500
resistivity/($\Omega\cdot\text{m}$)	$>10^{15}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$

2.1.2 电阻材料

衰减器要想在不同的温度条件下正常工作，必须选用电阻温度系数(Temperature Coefficient of Resistance, TCR)小，抗腐蚀、抗潮湿等能力强的薄膜材料制备电阻。常见电阻材料有镍铬材料和氮化钽材料(TaN)，TaN 是由 Ta 和 N_2 反应生成的化合物，呈灰色，熔点很高，化学性能稳定，具有很好的耐酸性。TaN 薄膜一般由磁控溅射设备制备，其电阻率可以通过调节溅射气氛中 N_2 比例来改变^[5-6]。相比于传统的镍铬薄膜，TaN 薄膜能在空气中生成一层致密的氧化层，抵抗水分和大气的进一步侵蚀，因而具有很强的稳定性，TaN 薄膜电阻也不会因为封装的老化或破损导致电阻性能的失效。此外，TaN 薄膜的 TCR 可以做到非常小(可控制在 ± 50 ppm/ $^\circ\text{C}$ 以内)。综上所述，TaN 薄膜材料是制作微波器件电阻的理想选择^[7-9]。

2.2 仿真优化设计

将衰减片放置在波导内必然会影响到其阻抗特性，使反射增大，因此，将波导中衰减材料的两端设计成渐变结构^[10]。在 HFSS 中建立的仿真模型，设置衰减片的材料、电阻值、形状等参数，对回波损耗、衰减精确度指标进行仿真优化。以 20 dB 衰减器为例，仿真模型如图 9 所示。经仿真优化，20 dB 波导固定衰减器的衰减范围为 $-19.2\sim-20.1$ dB，回波损耗 -28.5 dB，如图 10、图 11 所示。

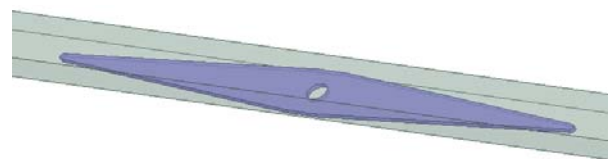


Fig.9 Simulation model of rectangular wave guide fixed attenuator
图 9 波导固定衰减器仿真模型

2.3 结构设计与加工

由于铜镀金后可以减小传输损耗^[11]，为了减小传输损耗对衰减精确度指标产生的影响，波导固定衰减器的

腔体采用黄铜镀金的方案，并且波导腔体采用分体式加工方案，便于装配衰减片，如图 12 所示。

以厚度为 0.254 mm 的氧化铝陶瓷作为基片，采用薄膜电路工艺加工衰减片，经仿真优化，20 dB 衰减片的长度为 20 mm，宽度为 1.6 mm，衰减片如图 13 所示。

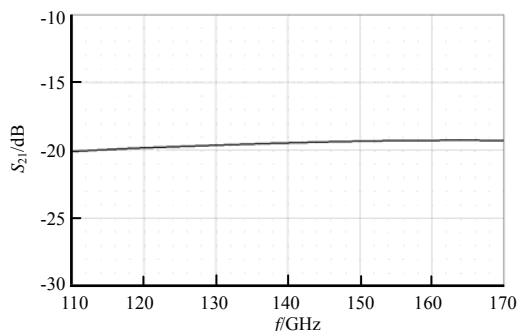


Fig.10 Simulation curve of S_{21}
图 10 衰减量仿真曲线

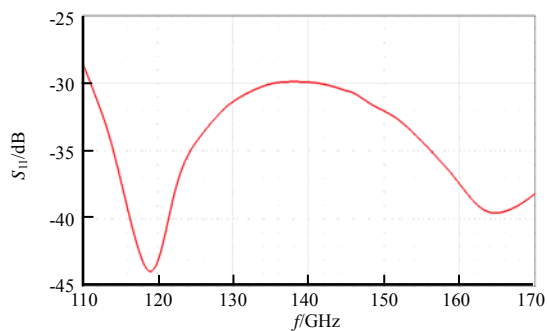


Fig.11 Simulation curve of SWR
图 11 驻波比仿真曲线

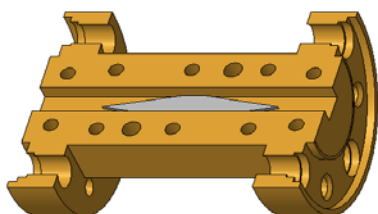


Fig.12 Wave guide fixed attenuator
图 12 波导固定衰减器示意图



Fig.13 Attenuation slice
图 13 衰减片实物图

3 实际测试结果

通过对 20 dB 的波导固定衰减器进行仿真优化，并加工装配试制，最终采用中电科仪器仪表有限公司生产的太赫兹矢量网络分析仪进行测试，如图 14 所示。测试结果如图 15 所示，从图中可以看出，在 110~170 GHz 频率范围内，衰减器的回波损耗小于 -27.5 dB，衰减精确度可以达到 (20 ± 2) dB。

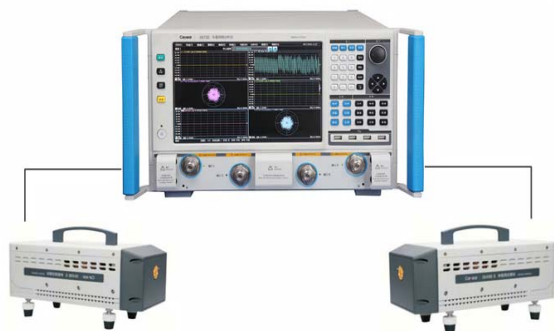


Fig.14 Vector network analyzer of THz
图 14 太赫兹矢量网络分析仪

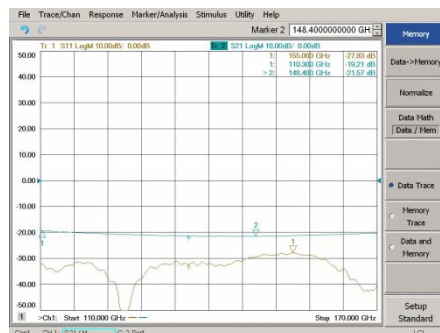


Fig.15 Testing curve of S_{21} and S_{11}
图 15 实际测试曲线

4 结论

本文基于吸收式波导衰减器工作原理和矩形波导传输原理，设计了一种衰减片垂直于电场的波导固定衰减器，使矩形波导传输线保持完整，减小对射频泄露、回波损耗等指标的影响。以 110~170 GHz 频段的波导固定衰减器为例，采用衰减片垂直于电场的方案，同时采用 Al_2O_3 陶瓷片作为基片，采用 TaN 作为薄膜电阻材料，设计了 20 dB 衰减量的波导固定衰减器。经过加工试制和测试，所设计波导固定衰减器的驻波比和衰减精确度较好，能够满足生产调试过程的使用要求。以上研究成果为更高频率的太赫兹波导固定衰减器的研制提供了技术基础。

参考文献：

- [1] 周扬帆. 高性能太赫兹无源器件研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (ZHOU Yangfan. Study on high performance terahertz passive device[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [2] 魏西. 高精度宽带衰减器的设计[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (WEI Xi. The design of high precision broadband attenuator[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2017.)
- [3] 张兆生,卢振亚,陈志武. 电子封装用陶瓷基片材料的研究进展[J]. 材料导报, 2008,22(11):16–20. (ZHANG Zhaosheng, LU Zhenya, CHEN Zhiwu. Research progress in ceramic substrate material for electronic packaging[J]. Materials Review, 2008,22(11):16–20.)
- [4] MORTEN B, De-CICCO G. A thick-film resonant sensor for humidity measurements[J]. Sensors and Actuators A, 1993 (38): 337–342.
- [5] 向阳. TaN 微波功率薄膜电阻器制备及性能研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (XIANG Yang. Study on the preparation and performance of TaN microwave power thin film resistors[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [6] JIANG H C, WANG C J, ZHANG W L, et al. Composition control and its electric properties of TaN_x thin films[J]. Modern Physics Letters B, 2010,24(9):905–910.
- [7] WANG C M, HESIEH J H, LAM U T. Electrical properties of TaN–Cu nano composite thin films[J]. Thin Solid Films, 2004: 469–470.
- [8] CUONG N D. Characterization of tantalum nitride thin films deposited on SiO₂/Si substrates using dc magnetron sputtering for thin film resistors[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2006,153(2):164–167.
- [9] CIONG N D, KIM D J. Effect of annealing temperature on structural and electrical properties of tantalum nitride thin film resistors deposited on SiO₂/Si substrates by dc sputtering technique[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2006(24): 682–685.
- [10] 赵紫正,童玲,田雨. 高功率微波矩形波导衰减器的设计与实验[J]. 电子测量与仪器学报, 2010,24(9):842–847. (ZHAO Zizheng, TONG Ling, TIAN Yu. Design and experiment for high-power microwave attenuator of rectangular waveguide[J]. Journal Of Electronic Measurement And Instrument, 2010,24(9):842–847.)
- [11] 唐烨,冯进军. 无氧铜和铁镍钴合金太赫兹波导传输损耗[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(6):825–828. (TANG Ye, FENG Jinjun. Transmission loss in terahertz waveguides made of copper and iron–nickel alloy[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(6):825–828.)

作者简介：

刘长春(1985–), 男, 工程师, 主要研究方向为微波毫米波测试部件, 包括 THz 波导固定衰减器、波导可调衰减器、波导开关等.email:lchweiyi@163.com.

赵建波(1987–), 男, 工程师, 主要研究方向为太赫兹波导连接器、可调衰减器等.

张陶陶(1989–), 男, 高级工程师, 主要研究方向为同轴开关、波导开关等.