

文章编号: 2095-4980(2023)03-0278-08

基于缝隙波导工装的金属接触 PIM 统计行为研究

张松昌^{1,2a,2b}, 赵小龙^{2a,2b}, 曹智^{2a,2b}, 贺永宁^{*2a,2b}

(1.西安文理学院 信息工程学院, 陕西 西安 710065; 2.西安交通大学 a.电子与信息学部微电子学院;
b.西安市微纳电子与系统集成重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 提出一种基于缝隙波导的可分离且可同时测量接触电阻和无源互调(PIM)的电接触 PIM 测试方法, 并在此基础上研究了金属接触 PIM 的统计行为。通过接触样品的表面形貌和成分表征, 确定了铝合金和镀银铝合金待测件表面存在的氧化膜是产生 PIM 的主要原因; 在几种不同压强下利用四线法多次重复加载后, 测量了接触电阻并获得了其统计规律; 利用设计的缝隙波导工装测试了铝合金和镀银铝合金金属接触界面接触电阻、PIM 和接触压力之间的关系。实验结果表明, 在特定压力下的接触电阻具有统计分布特性, 其 PIM 值也随之具有波动性; 随着接触压力的增大, 接触电阻与 PIM 值总体上呈现下降的趋势, 且波动范围随之减小。

关键词: 接触电阻; 缝隙波导; 统计分布; 无源互调; 微凸体

中图分类号: TN820

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022198

Statistical behavior study of metal contact PIM based on slot waveguide separable tooling

ZHANG Songchang^{1,2a,2b}, ZHAO Xiaolong^{2a,2b}, CAO Zhi^{2a,2b}, HE Yongning^{*2a,2b}

(1.School of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an Shaanxi 710065, China;

2a.School of Microelectronics, Faculty of Electronic and Information Engineering; 2b.The Key Laboratory of Micro-Nano Electronics and System Integration of Xi'an City, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: A method is proposed to measure electrical contact Passive Intermodulation(PIM) based on a slot waveguide, which is separable and can simultaneously measure contact resistance and PIM. On this basis, the statistical behavior of metal contact PIM is investigated. Firstly, it is determined that the existence of oxide film on the surface of Device Under Test(DUT) with aluminum and silver coated aluminum, is the main reason for the producing of PIM, by characterizing the surface topography and analyzing the components. Secondly, the contact resistance(R_c) and its statistical regularities are obtained by repeating loading-unloading at some certain pressure with four-terminal sensing method. Finally, the relationship among contact resistance, PIM and contact pressure of aluminum alloy and silver coated aluminum alloy are measured by special designed slot waveguide measurement system. The experimental results show that, the contact resistance of the contact joint has the statistical characteristic under the certain pressure and its PIM value is also fluctuant. Both the contact resistance and PIM value decrease as the contact pressure increases and their fluctuant ranges decrease.

Keywords: contact resistance; slot waveguide; statistical distribution; Passive Intermodulation; asperities

无源互调(PIM)危害指无源系统或器件由于非线性传输特性产生的互调频谱分量干扰通信系统, 广泛存在于滤波器^[1]、功分器^[2]、天线^[3]等无源部件及电路中^[4]。随着现代无线通信容量剧增, 多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)通信技术的大规模应用以及通信器件和设备高功率、小型化的要求, PIM 危害日益突出, 尤其以通信卫星和地面移动通信基站最为严重^[5-6], 近年来, 手机等通信终端的 PIM/谐波问题也日渐凸显^[7],

收稿日期: 2022-09-25; 修回日期: 2023-01-07

基金项目: 西安市科技局三年行动计划资助项目(2021XDJH17)

*通信作者: 贺永宁 email:yongning@mail.xjtu.edu.cn

引起了包括苹果、华为、三星、OPPO、VIVO等手机终端厂商的关注。PIM问题已成为阻碍通信设备性能提升的关键因素之一，PIM产生机理以及抑制方法研究引起了人们的高度重视。

引起PIM的非线性有2种^[8-9]：材料非线性和接触非线性。材料非线性是由材料固有的特性如铁电或铁磁性引起的^[10]，其本质是电磁场之间的非线性转换关系。对于确定的射频系统，由材料非线性引起的PIM产物的功率通常较为稳定且数值确定，理论研究已较为系统，可以通过抵消算法在一定程度上抑制PIM的影响^[11]，也可以通过掺杂或覆盖非铁电/非铁磁材料抑制PIM。接触非线性主要由存在于接触界面的氧化膜或污渍物的 $I-U$ 非线性特性引起，而金属接触在射频系统中不可避免且大量存在，如波导端口的法兰连接^[12-13]、同轴接头中的同轴插接^[14-15]、腔体滤波器中的螺栓连接^[16]、手机等移动设备中的弹片压接^[17]以及丝网天线中的搭接^[18]等，因此接触引起的PIM受到了广泛关注。

实际金属表面总是粗糙不平的，在微观下可将粗糙表面视为光滑平面上存在许多高度随机分布的微凸体，金属表面间的接触可视为两表面微凸体的接触。由于趋肤效应，在接触结构中，PIM主要来源于趋肤深度内的微凸体接触^[19]。对于固定的接触结构，不论是面接触(法兰面间的接触)、线接触(如同轴内导体间的接触)还是点接触(如手机内弹片接触)，实际引起PIM的接触微凸体数目都是有限的。因此，研究有限数量接触微凸体的接触特性非常必要。当接触面间的压强较小时，接触面间的真实接触微凸体数目也较少。接触电阻是电接触领域中衡量电连接可靠性的一个关键指标，PIM恰恰与金属的电连接状态息息相关^[20]，因此研究低压强下接触电阻的特性和接触电阻与PIM的关系，对于理解PIM的产生机理有重要意义。

本文将3片金属片叠加接触，研究4种不同压力下多次重复测量后的接触电阻统计特性，然后利用专门设计的缝隙波导测试工装系统研究接触电阻、PIM和接触压力之间的关系。

1 测试方法

1.1 接触电阻统计特性测试方法

当金属接触界面上的微凸体数量足够多时，接触界面的接触电阻是确定的。但当接触微凸体数目有限时，由于接触微凸体高度的统计特性，接触电阻存在随机性。为验证接触电阻的统计性，将长宽高分别为63 mm×60 mm×5 mm，质量为50.6 g，粗糙度 R_a 约为10 μm 的铝合金样品叠加接触，分别在4种不同压力下多次重复测量其接触电阻，并研究其统计特性。如图1(a)所示，将2片试验样品沿长边平放并使2样品间距为1 mm后，固定2样品。在2样品上方对齐居中放置第3片铝合金样品，下边2片各引出2根导线，利用四线法通过高精度源表(SMU,B2902,Keysight,美国)测量3片间的接触电阻(如图1(b)所示)，通过多次重复放置上方样品来测量同一压力下的接触电阻。为确保测量准确性，需保证下面2片金属的厚度一致，因此在机械加工时，3片铝合金样品为整体加工，加工完以后再分隔开作为待测件使用。本实验中测量了4种压力下的接触电阻统计分布，分别为0.506 N(上片自重)、2.506 N(上片加200 g砝码)、5.506 N(上片加500 g砝码)和32.656 N(上片加3 215 g铁块)。每个压力测试次数为400次，测试完成后对所测的接触电阻进行统计后画出频数分布折线图。所有实验样品都通过丙酮、酒精、去离子水依次超声清洗5 min，去除表面有机物沾污。

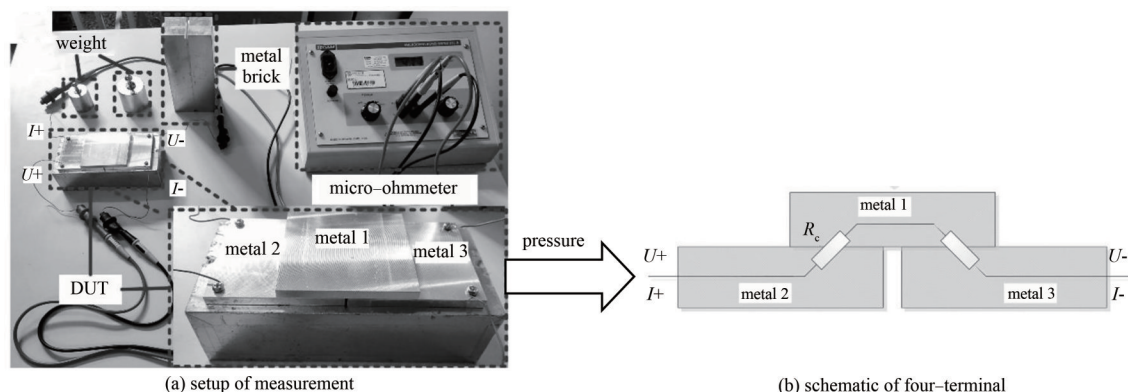


Fig.1 Setup and schematic for R_c measurement

图1 接触电阻测试工作及原理

1.2 金属接触 PIM 测试方法

在 PIM 测试中需将待测件接入 PIM 测试系统中, 但这样会给待测界面的 PIM 分析或诊断带来困难, 因为测试结果不仅与接触界面的状态有关, 还与其他因素如无源器件端口的结构和接触压力等有关。在检测系统本底噪声时, 需将待测件去除, 而在进行测试时, 需再将待测件接入系统, 因此在 2 次装配时, 端口处的 PIM 本底噪声水平无法保证; 且在系统内部测试过程中, 待测件的变化很容易引起其他因素的变化, 进而影响 PIM 产物变化, 为分析带来困难。为研究单因素或可控因素对 PIM 的影响, 需将待测件和测试系统分离, 从而在控制接触界面以及施加到界面上的接触压力的同时, 降低或排除其他因素的影响。基于此, 本文开发了一种基于缝隙波导的近场耦合测试方法。由于近场的场强比远场场强强, 且不需要很大的空间和干净的背景, 因此近场 PIM 测试有很强的抗干扰性且能够获取更高的灵敏度。使用这种测试手段, 可将待测件与测试系统分离, 实现对单一因素或可控因素对 PIM 的影响。最为关键的是, 此测试系统非常易于检测系统本底噪声。在测试中, 只需要将接触界面分离, 即可检测到系统本底噪声, 为 PIM 测试带来了很大的便利, 还可以实现接触界面的接触电阻和 PIM 的在线同时测量。由于测试时待测件在外部, 因此可以设计复杂的装置, 针对单一因素进行细致研究。通过合理设计缝隙的宽度和长度, 即可获得理想的近场 PIM 缝隙波导^[21]。图 2 为 PIM 测试系统的框架图, 由信号源产生的频率分别为 f_1 和 f_2 的 2 路载波经过功率放大器放大后, 通过合路器合路, 然后通过双工器后接入缝隙波导, 最后进入低 PIM 负载。反射的 PIM 信号通过双工器的 ANT 被接收机所接收, 从而输出反射 PIM 信号。图 3 为缝隙波导的测试原理、三维模型和 PIM 测试装置现场图。本实验采用 S 波段的 BJ32 波导, 其内部横截面尺寸为 $72.14 \text{ mm} \times 34.04 \text{ mm}$ 。在波导正中央开一尺寸为 $1 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的宽壁横缝, 在缝隙上方覆盖 1.1 mm 厚的玻璃板, 一方面防止异物掉入波导, 另一方面抑制了远场辐射。通过 CST 仿真获得的磁场最大分布图和实际测试的带有测试样品的缝隙波导工装电特性如图 4 所示。在多次加载上方接触片并测试电特性的过程中, 工装电特性无显著变化。可以看出, 玻璃板上方的磁场强度比波导腔中心处小 10 dB 以上, 电磁波只在缝隙附近, 远场辐射被严重抑制。 S 参数的测试结果表明, 缝隙波导在 $2.50 \sim 2.70 \text{ GHz}$ 频率范围内, 其 $S_{21} < 0.22 \text{ dB}$, $S_{11} < -18 \text{ dB}$, 表明缝隙波导为近场辐射, 测试工装符合设计要求。PIM 测量的接触界面由 3 片金属片提供, 其中下方金属片被限制于介质卡槽内, 金属块沿缝隙的宽度为 20 mm , 上方金属片尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 质量为 2.1 g , 在测量时居中方放置在下方 2 金属片上, 介质卡槽保证上方金属片能自由滑动。下方金属片各引出 2 根导线与微欧计 (R1L-B, Tegam, 美国) 相连, 利用四线法实时测量接触电阻, 缝隙波导一端连接 PIM 测试仪 (PIM2600S, 澳华测控, 中国), 另一端连接低 PIM 负载。如果需要加压力, 则使用自制的压力机控制压力, 实现在不同压力下同时测量接触界面的接触电阻和 PIM 值。本文 PIM 测试中所用载波频率分别为 2.62 GHz 和 2.69 GHz , 3 阶 PIM 频率为 2.55 GHz , 输入载波功率为 43 dBm (20 W)。整个测试过程中, 系统本底噪声均低于 -125 dBm 。

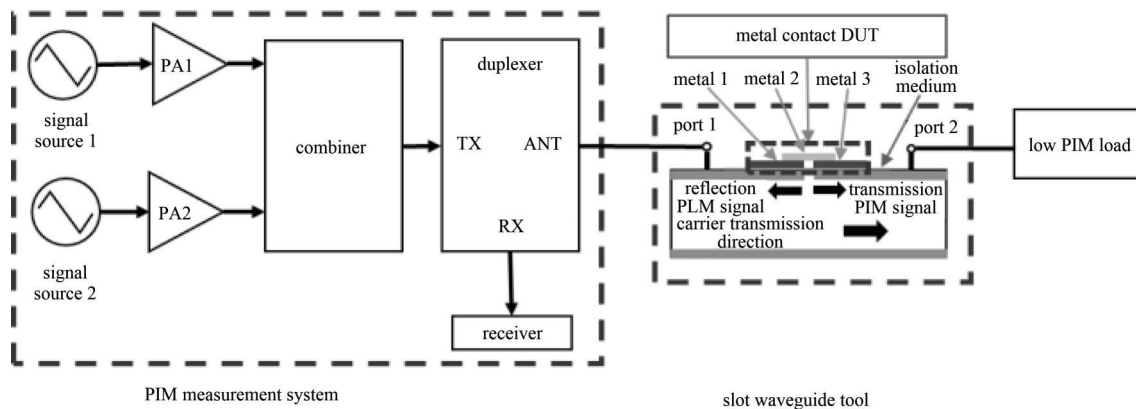


Fig.2 Block diagram of PIM measurement system

图2 测试工装原理框图

2 待测金属表面形貌及成分表征

为准确描述接触压力、接触电阻和 PIM 三者之间的关系, 首先对实验样品进行形貌分析。本实验采用的样品为铝合金样品和镀银铝合金样品, 图 5 为铝合金表面和镀银铝合金表面的激光扫描显微镜 (Laser Scanning Microscope, LSM) 三维形貌和扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 图片。由图 5 可知, 铝合金和镀银铝合金表面都为粗糙表面 (粗糙度分别为 $0.503 \mu\text{m}$ 和 $0.657 \mu\text{m}$)。在高倍显微镜下, 微观尺度下的铝合金表面

更粗糙，而镀银铝合金表面则存在晶粒和晶界，其表面有少许颗粒，成分分析结果表明其主要为 Ag_2O 颗粒物。

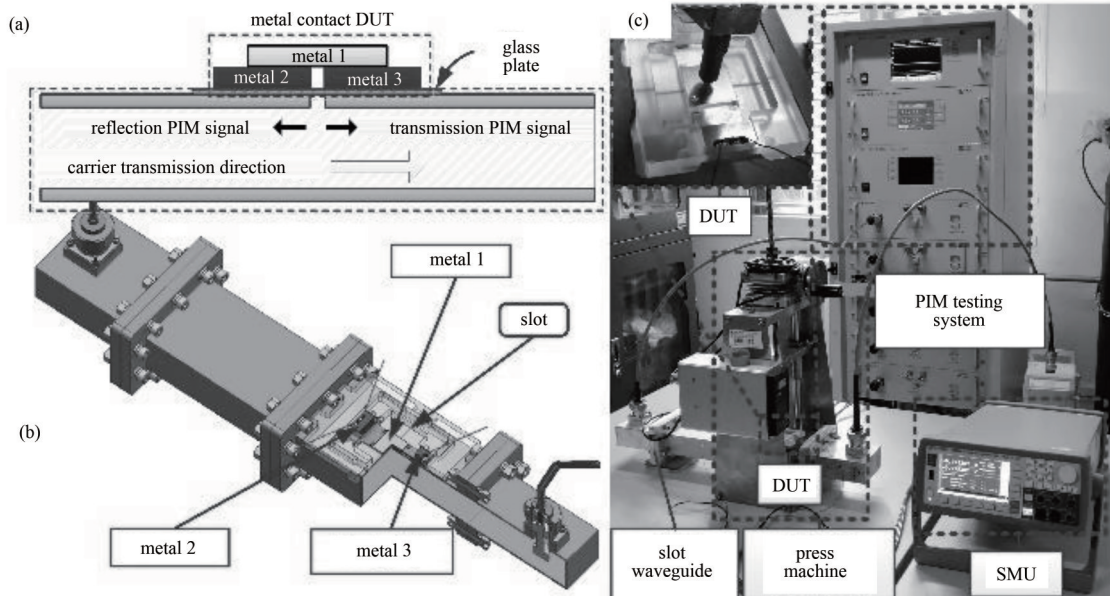
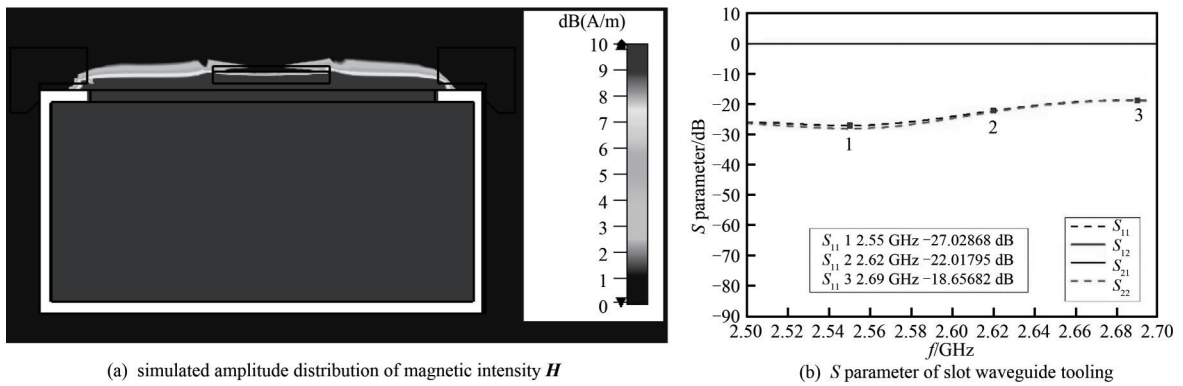


Fig.3 (a) schematic diagram of DUT and slot waveguide; (b) 3D model and (c) the measurement setup

图3 (a) 测试工装; (b) 测试原理及; (c) 测试现场图

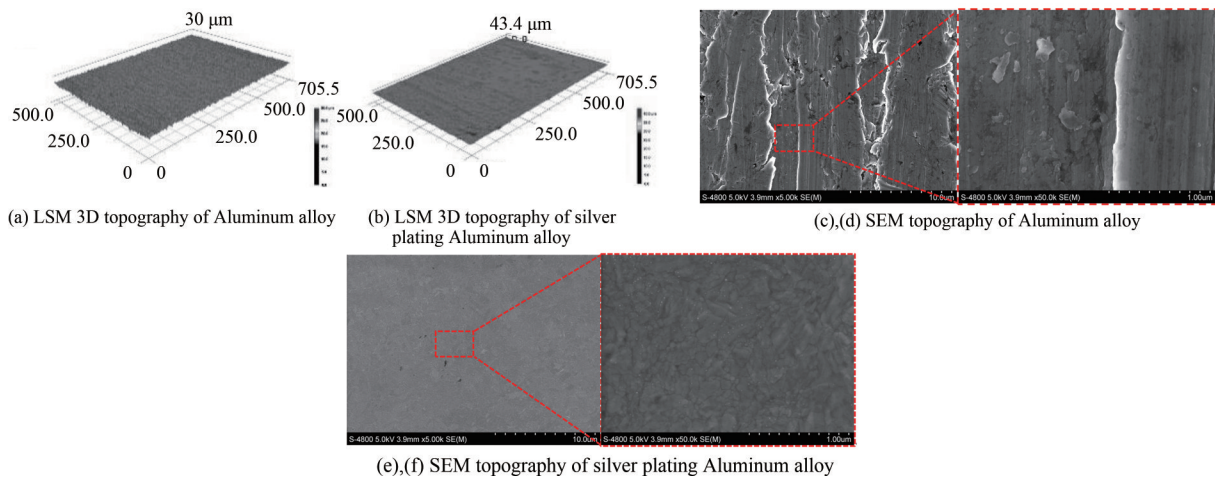


(a) simulated amplitude distribution of magnetic intensity H

(b) S parameter of slot waveguide tooling

Fig.4 Simulated amplitude distribution of magnetic intensity and measured S parameter of slot waveguide tooling

图4 缝隙波导工装仿真磁场分布和实测 S 参数



(a) LSM 3D topography of Aluminum alloy

(b) LSM 3D topography of silver plating Aluminum alloy

(c),(d) SEM topography of Aluminum alloy

(e),(f) SEM topography of silver plating Aluminum alloy

Fig.5 Surface topography of sample under test

图5 实验样品表面形貌

铝合金表面主要存在有机物沾污以及氧化膜^[22]，对镀银铝合金表面进行 X 射线光电子能谱分析(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)，可以获得其表面成分，如表 1 所示。结果表明，原始的镀银铝合金表面存在有机物沾污以及在化学镀过程中存在 Cr 元素。通过丙酮、酒精和去离子水分别超声清洗 5 min 后，样品表面 C 元素成分下降，O 元素成分也略有下降，但 Ag 元素和 Cr 元素成分明显上升。对同一试样在超高真空室中进行 Ar 离子清洗，去除表面氧化层(加速电压 1 000 V，离子束流 10 mA，时间 10 min)，样品表面 C 元素和 Ar 元素成分几乎为零，但依然存在 20% 的 O 元素，由此可见，镀银铝合金表面不仅存在有机物沾污还形成了一层氧化物薄膜。由于沾污物的成分和厚度不确定，在实验过程中会影响实验结果，因此在实际实验中需提前通过清洗去除金属表面的沾污物，并在实验时保持干燥清洁的实验环境。

表 1 铝合金镀银样片清洗前后表面元素占比(%)

Table1 Sample surface element ratio of silver plating aluminum alloy before and after cleaning(%)

surface elements	Ag	C	O	Cr
pristine sample	13.7	34.4	43.4	8.5
organic solvent cleaning	18.3	27.5	42.4	11.9
organic solvent cleaning + plasma cleaning	79.3	0	20.7	0

3 接触电阻实验统计规律

通过上节工装对 3 个相同的铝合金样片在 4 种压强下(分别为 0.14 kPa, 0.54 kPa, 1.48 kPa 和 8.78 kPa)重复放置并测量接触电阻各 400 次，对实验结果进行统计分析。实验结果表明，在给定压力下接触电阻存在统计特性，4 种接触压力下接触电阻的统计频数分布如图 6 所示。通过高斯分布对统计结果进行拟合，提取拟合结果的期望和标准差，进而计算出每个压力下接触电阻统计的半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)，如表 2 所示。结果表明，随着接触压力的增大，接触电阻的最可几值逐渐减小，统计分布图的半高宽也逐渐减小。

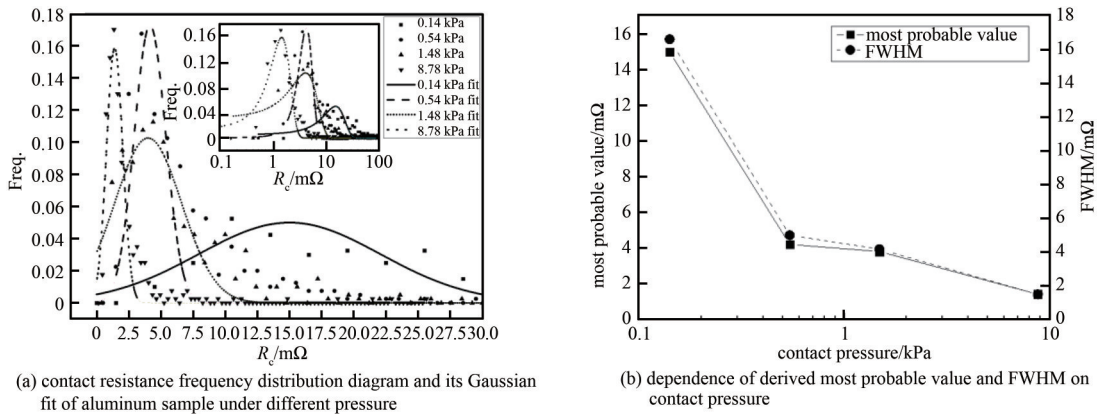


Fig.6 Statistical regularity of contact resistance for aluminum sample

图 6 铝合金样品接触电阻统计规律

表 2 不同接触压力下接触电阻统计特性参数提取

Table2 Derived parameters of R_c statistical character under different contact pressures

contact pressure/kPa	expectation μ	standard deviation σ	FWHM/mΩ
0.14	15.000 0	7.071	16.652
0.54	4.200 0	2.121	4.996
1.48	3.800 0	1.768	4.163
8.78	1.402 5	0.628	1.480

基于 R_c 统计规律，对金属接触 PIM 的统计特性做简单预测。对于接触的 PIM，其 PIM 值的大小由 3 个关键因素确定：趋肤深度内的接触电阻 R_{cs} 、接触界面的电流密度 J_l 以及接触界面氧化膜的非线性系数 a_3 。接触界面的压降可表示为：

$$U = R_{cs} J_l \tag{1}$$

3 阶非线性电流密度可以表示为：

$$J_{nl} = a_3 U^3 \tag{2}$$

式中 a_3 为 $J-U$ 的 3 阶非线性系数。

因此 3 阶 PIM 值可以表示为：

$$PIM_3 = C_1 J_{nl}^3 \tag{3}$$

式中 C_1 为辐射电阻，对于给定的微波结构，其值为一常数。

对于给定的接触结构，当载波功率一定时，其接触界面的电流密度是确定的，其非线性系数在给定的压力下变化不大。因此，在本文的金属接触 PIM 测试场景下，PIM 值与接触电阻的关系为^[12]：

$$PIM_3 \approx C + 60 \lg R_{cs} \tag{4}$$

可以将面接触电阻 R_c 视为趋肤深度内接触电阻 R_{cs} 与趋肤深度外接触电阻 R_{co} 的并联。

即

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{co}} + \frac{1}{R_{cs}} \tag{5}$$

由于趋肤深度内的接触微凸体是整个接触面接触微凸体的一部分，因此认为 R_{cs} 具有和 R_c 一致的统计特性。根据 PIM 与 R_{cs} 关系式，金属接触的 PIM 值受接触电阻统计特性影响，在一定压强下必然存在统计分布特性，与接触电阻的统计行为一致，压强越小，金属接触所产生 PIM 值的最可几值越大，且预测 PIM 值的离散性也增加。

4 PIM 实验结果和分析

利用缝隙波导工装多次重复测量铝合金接触界面和镀银铝合金接触界面的接触电阻和 PIM 值随接触压强的变化，测试结果分别如图 7 和图 8 所示。在压强较小时，接触电阻和 PIM 值波动幅度都较大。随着压强的增大，接触电阻和 PIM 值的波动幅度逐渐减小。对于铝合金，在压力较低时，其 PIM 值较大，可以达到 -65 dBm；当接触压力增大后，其 PIM 值逐渐减小，但多次测量中其 PIM 值仍大于 -110 dBm。这是因为铝合金表面的氧化膜较为致密，在较大的压力下其表面仍有未破裂氧化膜，导致其接触电阻和 PIM 值较大。对于镀银铝合金，虽然银表面因为氧化会出现氧化物，但其氧化膜很薄且非常容易破裂，且镀层银的硬度比基层铝合金硬度小很多，在接触时银更容易发生塑性变形而使氧化膜破裂，因此在初始接触时，其接触电阻较小；当压力增大后，接触电阻迅速下降。对于 PIM，在初始接触时，其 PIM 值比铝合金接触 PIM 小，接近于系统底噪；当压力增大后，其 PIM 值下降幅度较小，始终处于系统本底噪声附近。

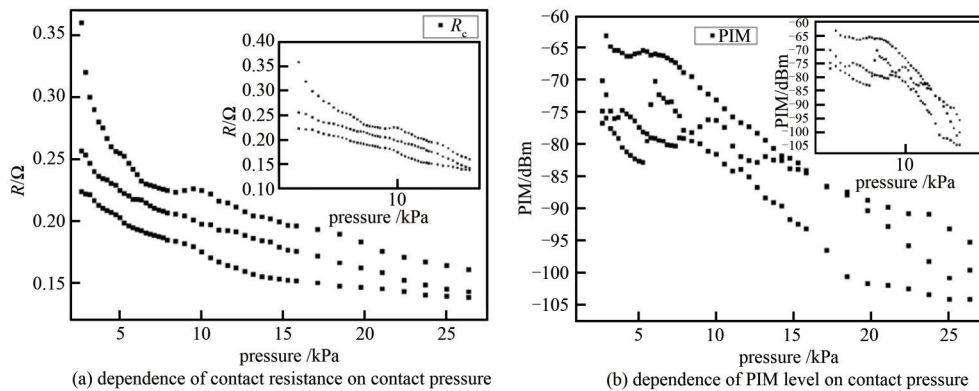


Fig.7 Dependence of contact resistance and PIM level on contact pressure for Aluminum alloy

图 7 铝合金金属接触电阻、PIM 与接触压力关系

对于单次测试，接触面间的距离 d 随接触压力的增大而减小，接触电阻 R_c 随 d 的减小而减小，因此接触电阻随接触压力增大而减小。根据式(1)，接触电阻减小，必然会导致 PIM 值降低。实际上，由于影响 PIM 的微凸体数量有限，再加上接触界面平整度的影响、沿缝隙方向场分布不均匀、界面氧化膜不均匀导致非线性不均匀以及接触过程中界面随接触压力变化有利于弛豫过程等原因，PIM 值在随压力增大而总体降低的过程中有较大的波动幅度。

总之，接触电阻是整个接触面上所有接触微凸体的并联，因此接触电阻描述的是接触面上整体的接触状态。对于给定的接触结构，当载波功率确定时，其 PIM 值主要依据趋肤深度内的接触电阻值确定。理论分析和实验

结果都表明,接触电阻的最可几值和波动范围随接触压力的减小而增大, PIM 值的波动范围也随接触压力的减小而增大。

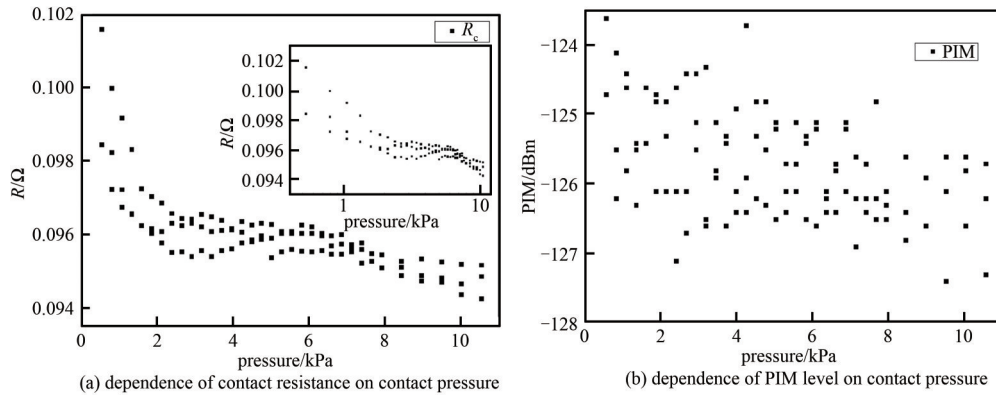


Fig.8 Dependence of contact resistance and PIM level on contact pressure for silver plating aluminum alloy

图8 铝合金镀银金属接触电阻、PIM与接触压力关系

5 结论

本文提出了一种基于缝隙波导的可分离且可同时测量接触电阻和PIM的测试方法,并系统地研究了金属接触界面接触电阻、PIM和接触压力的关系。提出的缝隙波导工装实现了快速、可分离、易校准、可同时在线测量多个物理量以及便于控制等特点。实验结果表明,在固定接触压力下,金属接触电阻存在统计特性,其最可几值和半高宽随接触压力的增大而减小。随着接触压力的增大,单次测量时接触电阻和PIM值总体上逐渐下降,但PIM存在波动性,多次测量的结果显示,随着接触压力增大,接触电阻和PIM值的波动范围逐渐减小。

参考文献:

- [1] CHO I K, KIM J T, JEONG M Y, et al. Analysis and optimization of passive intermodulation in microwave coaxial cavity filters[J]. ETRI Journal, 2003, 5(2): 133–139. doi:10.4218/etrij.03.0102.0214.
- [2] JARGON J A, EGROOT D C, REED K L. NIST passive intermodulation measurement comparison for wireless base station equipment[C]// 52nd ARFTG Conference Digest. Rohnert Park, CA, USA: IEEE, 1998, 34: 128–139. doi:10.1109/ARFTG.1998.327325.
- [3] BOLLI P, SELLERI S, PELOSI G. Passive intermodulation on large reflector antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2002, 44(5): 13–20. doi:10.1109/MAP.2002.1077773.
- [4] SHITVOV A P, ZELENCHUK D E, SCHUCHINSKY A G, et al. Passive intermodulation in printed lines: effects of trace dimensions and substrate[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2009, 3(2): 260–268. doi:10.1049/iet-map:20070314.
- [5] SHAYEGANI A, SALMON J, SINGH R. Multicarrier PIM behavior and testing in communications satellites[C]// 32nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference. San Diego, CA: AIAA, 2014: 4249. doi:10.2514/6.2014-4249.
- [6] CHOU S J, CHOU H T, KUO L R. Potential causes of PIM problems in the LTE outdoor base station multi-band antennas[C]// 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Okinawa, Japan: IEEE, 2016: 1080–1081.
- [7] YANG S, CHEN X, MI R, et al. Characterization of harmonic generation by spring contacts in mobile devices[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(5): 1313–1320. doi:10.1109/TEMC.2022.3174876.
- [8] LUI P L. Passive intermodulation interference in communication systems[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1990, 2(3): 109–118. doi:10.1049/ecej:19900029.
- [9] 叶鸣, 贺永宁, 孙勤奋, 等. 大功率条件下的无源互调干扰问题综述[J]. 空间电子技术, 2013(1): 75–83. (YE Ming, HE Yongning, SUN Qinfen, et al. Review of passive intermodulation interference problem under high power signals[J]. Space Electronic Technology, 2013(1): 75–83.)
- [10] CHEN X, HE Y N. Reconfigurable passive intermodulation behavior on nickel-coated cell array[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(4): 1027–1034. doi:10.1109/TEMC.2017.2654818.
- [11] SADJINA S, MOTZ C, PAIREDER T, et al. A survey of self-interference in LTE-advanced and 5G new radio wireless transceivers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(3): 1118–1131. doi:10.1109/TMTT.2019.2951166.

- [12] ZHAO X, HE Y, YE M, et al. Analytic passive intermodulation model for flange connection based on metallic contact nonlinearity approximation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(7):2279–2287. doi:10.1109/TMTT.2017.2668402.
- [13] 李瑜华, 景莉莉, 张明涛, 等. 大功率馈源类产品低PIM结构设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(4):633–638. (LI Yuhua, JING Lili, ZHANG Mingtao, et al. Low PIM structural design for high-power feed product[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(4):633–638.) doi:10.11805/TKYDA2017235.
- [14] JIN Q Y, GAO J C, FLOWERS G T, et al. Modeling of passive intermodulation with electrical contacts in coaxial connectors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(9):4007–4016. doi:10.1109/TMTT.2018.2838147.
- [15] CHEN X, WANG L, POMMERENKE D, et al. Passive intermodulation on coaxial connector under electro-thermal-mechanical multiphysics[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 70(1):169–177. doi:10.1109/TMTT.2021.3103981.
- [16] VICENTE C, HARTNAGEL H L. Passive intermodulation at junctions[C]// International Microwave Symposium. Honolulu, HI, USA:[s.n.], 2007.
- [17] YANG S. Passive harmonic generation at spring contacts[D]. Missouri, USA: Missouri University of Science and Technology, 2019.
- [18] LI T J, ZHANG K, JIANG J, et al. Passive intermodulation analysis of single contact junctions of wire mesh[J]. Journal of Computational Electronics, 2018, 17(1):101–109. doi:10.1007/s10825-017-1092-6.
- [19] RUSSER J, RAMACHANDRAN A, CANGELLARIS A, et al. Phenomenological modeling of Passive Intermodulation(PIM) due to electron tunneling at metallic contacts[C]// 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. San Francisco, CA USA:IEEE, 2006:1129–1132. doi:10.1109/MWSYM.2006.249389.
- [20] JACKSON R L, CRANDALL E R, BOZACK M J. Rough surface electrical contact resistance considering scale dependent properties and quantum effects[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(19):195101–1–8. doi:10.1063/1.4921110.
- [21] 高凡. 基于近场耦合的无源互调测试方法的研究[D]. 西安:西安交通大学, 2017:20–30. (GAO Fan. Research on Passive Intermodulation test method based on near-field coupling theory[D]. Xi'an, China:Xi'an Jiaotong University, 2017:20–30.)
- [22] 李军, 赵小龙, 高凡, 等. 利用电热耦合效应的金属单点接触结构无源互调研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(9):76–81. (LI Jun, ZHAO Xiaolong, GAO Fan, et al. Passive Intermodulation of metal point contact structure based on electrothermal coupling effect[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(9):76–81).

作者简介:

张松昌(1983–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电接触、射频系统可靠性. email: zsoncg@126.com.

赵小龙(1989–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为射频无源器件互调干扰研究和宽禁带半导体核辐射探测器件.

曹智(1993–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为微波无源器件的无源互调问题及互调测试.

贺永宁(1971–), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微波毫米波新结构器件及其探测系统应用.