文章编号：2095-4980(2026)01-0060-05

波导法兰接触无源互调蒙特卡罗分析

赵小龙[1a,2]，余紫霞[1a,2]，曹　智[*1a,1b]

(1.西安交通大学 a.电子与信息学部微电子学院；b.大型仪器设备共享实验中心，陕西 西安 710049；
2.西安市微纳电子与系统集成重点实验室，陕西 西安 710049)

摘　要：为解决波导法兰连接结构的微接触随机性导致其无源互调(PIM)效应难以预测的问题，研究了波导法兰连接的无源互调和直流接触电阻的波动性。实验表明，多次连接时，波导法兰无源互调和直流接触电阻均具有随机波动特性，且随着直流接触电阻的降低，总体上无源互调电平下降。为揭示直流接触电阻和无源互调波动性的成因，基于电接触无源互调效应的相关理论，建立了波导法兰接触无源互调的蒙特卡罗计算方法，计算结果与实验结果一致，从理论上验证了多次连接时，接触压强随机分布是波导法兰连接无源互调波动性产生的一个主要来源。

关键词：无源互调(PIM)；波导法兰；蒙特卡罗；非线性；接触电阻

中图分类号：TN814　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11805/TKYDA2024309

Monte-Carlo analysis of flange-contact Passive Intermodulation

ZHAO Xiaolong[1a,2]，YU Zixia[1a,2]，CAO Zhi[*1a,1b]

(1a.School of Microelectronics，Faculty of Electronic and Information Engineering；1b.Core Facilities and Experiment Center，Xi'an Jiaotong University，Xi'an Shaanxi 710049，China；2.Key Laboratory of Micro-Nano Electronics and System Integration of Xi'an City，Xi'an Shaanxi 710049，China)

Abstract: To address the difficulty in predicting the Passive Intermodulation(PIM) of waveguide flange connections caused by micro-contact randomness, the fluctuations in both PIM and DC contact resistance at these joints are investigated. Experimental results demonstrate that, upon repeated connections, both PIM and DC contact resistance exhibit stochastic variations; moreover, the PIM level generally decreases as the DC contact resistance diminishes. To uncover the origins of these fluctuations, a Monte Carlo model for PIM at waveguide flanges is developed based on existing theories of PIM in electrical contacts. The numerical results agree well with experimental data, theoretically confirming that the random distribution of contact pressure during successive connections is a primary source of PIM variability in waveguide flange joints.

Keywords: passive intermodulation; waveguide flange; Monte-Carlo; nonlinearity; contact resistance

无源互调(PIM)效应是大功率微波通信系统中无源器件面临的主要可靠性问题之一，近年来逐渐受到企业、研究所和高校的广泛关注[1-6]。从非线性根源看，PIM效应可分为接触非线性PIM[7]和材料非线性PIM[8-9]。由于通信系统中不可避免地使用互连器件，接触非线性PIM往往不可避免，因此研究接触非线性PIM的机理、建模和抑制方法具有重要的应用价值。射频互连结构中通常使用波导法兰[10]、同轴连接器[5]和弹片[11]等，其中波导法兰连接在空间通信系统中广泛使用。欧洲航天局2015年发布了一项关于提高波导法兰PIM性能的研究项目[12]，表明波导法兰连接PIM效应研究具有重要意义。早在20世纪70年代，Cox[10]通过实验观测到，弱力连接时在

收稿日期：2024-06-14；**修回日期：**2024-11-01

***通信作者：**曹　智　email:caozhi@stu.xjtu.edu.cn

引用格式：赵小龙,余紫霞,曹智. 波导法兰接触无源互调蒙特卡罗分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(5):60-64. DOI:10.11805/TKYDA2024309.

Citation format: ZHAO Xiaolong,YU Zixia,CAO Zhi. Monte-Carlo analysis of flange-contact Passive Intermodulation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(5):60-64. DOI:10.11805/TKYDA2024309.

30 dBm的输入功率下，波导法兰连接能够产生–25 dBm的PIM。Arazm等[13]通过同轴连接的测试实验发现接触PIM与金属材质、表面形貌和接触力有关。2005年，Vicente等[14]将粗糙界面电接触理论用于波导法兰连接PIM分析，获得了波导法兰连接的PIM计算方法。2018年，东南大学游检卫等[15]利用时域有限积分法推导了波导法兰连接的PIM计算模型，在Yee网格中加入非线性集总元件模拟波导法兰连接的非线性特性，通过对时域结果进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform，FFT)获取PIM计算模型。该方法为实现微波部件PIM仿真提供一种有价值的数值计算研究思路。但由于在仿真过程中直接将PIM与载波信号叠加在一起，且载波功率远大于PIM，因此该方法计算精确度有限。ZHAO等[16]基于粗糙界面电接触理论，通过对高斯分布进行分段线性化获得了粗糙面接触非线性电流的解析表达式，并通过PIM点源积分的方法获得了波导法兰面接触PIM的解析表达式。这些理论模型揭示了PIM与接触阻抗、外加压力、表面形貌等多种参数的影响关系。文献[16]中假设波导法兰面的压强是均匀的，这样可获得PIM与接触电阻的确定性依赖关系。结果表明接触电阻每下降一个数量级，三阶PIM下降约60 dB，但实际波导法兰面压强分布是非均匀的。Vicente等[17-18]利用压力测试纸显示了波导法兰面的非均匀压强分布。另外，在实验中经常观测到，即使每次波导法兰连接时都保持相同的螺栓力矩，也无法确保波导法兰面的压强均匀分布，表明这种随机性与压强分布的非均匀性是关联的。

为验证波导法兰连接PIM随机性与压强非均匀分布的关系，本文首先通过实验观测多次连接中波导法兰PIM与直流接触电阻的相关性；然后基于接触压强的随机分布特性，利用蒙特卡罗方法进行理论建模分析。结果表明，随机非均匀压强分布能够很好地解释波导法兰多次连接中PIM表现出的波动特性，表明压强分布的变化是PIM电平随机波动的一个主要原因。

1　波导法兰连接PIM与直流接触电阻测试

为能够测量到可观测的PIM，搭建了PIM–接触电阻联合测试系统[16]，见图1，其中内插图为所用波导管照片。波导法兰采用松散连接，即螺栓不加力或加很小的力；2路载波频率为2.62 GHz和2.69 GHz，PIM测量频点为2.55 GHz。当馈入的2路载波功率均为43 dBm时，系统底噪<–120 dBm。采用S波段波导管。每次测试时，先断开待测法兰连接，然后再重新连接，用微欧计测量法兰接触界面的直流接触电阻，利用PIM测试系统测量连接界面的PIM电平。测试流程见图2。测试的100组数据见图3。可见不同次连接时，直流接触电阻和PIM均存在明显的波动特性。

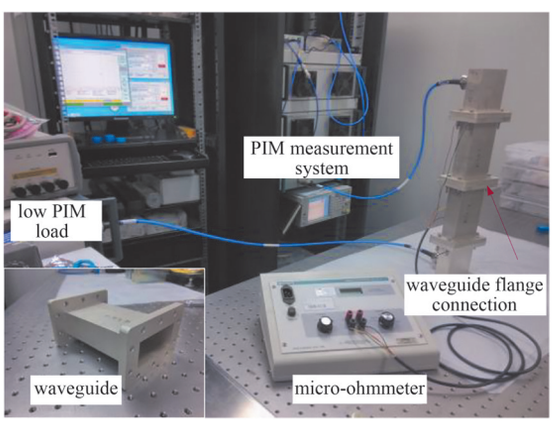

Fig.1 PIM and contact–resistance measurement system for waveguide flange connection. Inset is the photograph of the waveguide.
图1 波导法兰连接PIM–接触电阻联合测试系统

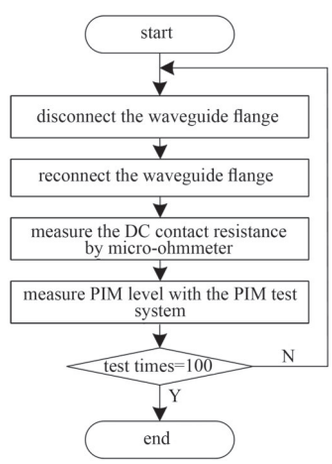

Fig.2 PIM and contact–resistance test flow chart
图2 PIM和接触电阻测试流程

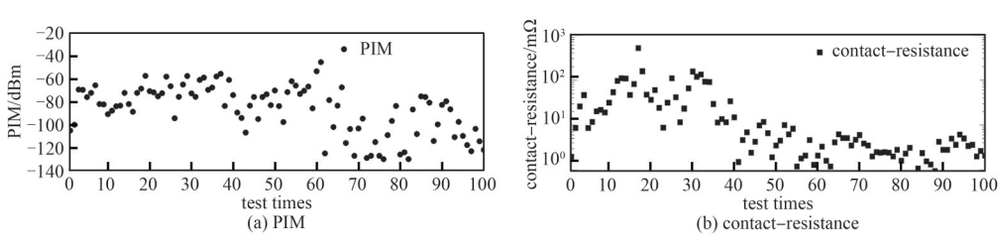

Fig.3 Measurement results of PIM and contact–resistance for multiple waveguide flange connections
图3 多次连接时波导法兰的PIM和接触电阻结果

以直流接触电阻为横坐标，PIM为纵坐标，对图3的100组波导法兰连接PIM和接触电阻测试结果重新制图，见图4。由图可见，相同的接触电阻下，PIM值存在波动；在小的接触电阻下，出现低PIM的概率增加。可见虽然直流接触电阻和PIM都存在波动特性，但依然表现出随着直流接触电阻下降，PIM总体下降的趋势。另外，当接触电阻不是很高时，总体上也具有接触电阻下降一个量级，PIM下降60 dB的趋势，与文献[16]的理论一致。

2 基于蒙特卡罗的波导法兰PIM建模分析

图4中，在某一直流接触电阻取值时，PIM值分布广泛，且随着接触电阻的降低，PIM有降低的趋势。为揭示该现象的机理，利用蒙特卡罗方法进行计算分析。将波导法兰面划分成多个区域，即网格，假设每个网格中的压强、接触电阻非线性分布均匀，而不同网格之间随机分布。如果将第m个网格的单位面积接触电阻记为$R_{c,s,m}$，则波导法兰连接总直流接触电阻R_c为：

$$R_c = \frac{1}{\sum_m \frac{A_m}{R_{c,s,m}}} \tag{1}$$

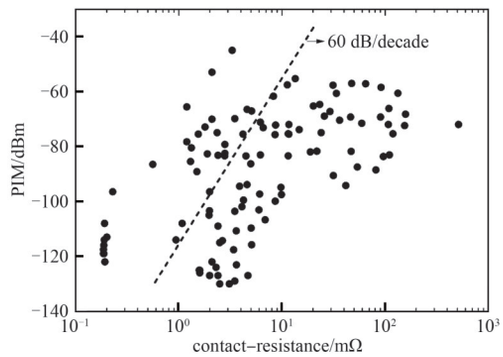

Fig.4 Correlation diagram of PIM and contact−resistance for multiple connections

图4 多次连接PIM与接触电阻的关系

式中A_m为第m个网格的面积。

由于机加工金属表面存在一定程度的粗糙度，波导法兰连接的微观接触可视为粗糙界面微凸体之间的接触，因此波导法兰连接并非完全接触。在接触界面内，金属表面的氧化和玷污会导致部分接触为金属−绝缘物−金属(Metal−Insulator−Metal，MIM)接触，只有局部接触为真正的金属−金属(Metal−Metal，MM)接触结构，在MIM结构中产生的隧穿[19]及热电子发射效应[20]是金属接触PIM的主要非线性源。单个网格的区域内包含若干个MM结构和MIM结构，单个网格的接触电阻$R_{c,s,m}$为网格区域内所有MM结构电阻的并联[14]。

采用高斯分布函数的三角形近似过程，对基于Greenwood−Williamson(G−W)模型[21]的金属接触电阻统计计算过程进行解析推导。假设微凸体满足塑性变形，可获得$R_{c,s,m}$对粗糙表面微观参量及其他物理参数的依赖关系[16]：

$$R_{c,s,m} = \frac{15}{16}\left(\frac{\pi^2 R^2}{72\eta c_t}\right)^{1/6} \rho \left(\frac{P}{H}\right)^{-5/6}, \quad 0 \leqslant P \leqslant \frac{8\pi R H \eta}{3\sqrt{c_t}} \tag{2}$$

式中：R为微凸体半径；η为微凸体面密度；P为施加在界面的压强；H为接触材料硬度；ρ为接触材料的电阻率；c_t与微凸体高度标准差相关：

$$c_t = \frac{1}{4(\ln 2\pi)^{1/2}\sigma_t^2} \tag{3}$$

式中σ_t为微凸体高度高斯分布的标准偏差。

由式(2)可得，接触电阻和压强呈比例关系。波导法兰连接接触界面压强的非均匀分布会导致各个网格内的接触电阻存在差异。由于趋肤效应，只有当感应电流流过接触界面时，才能在接触界面激励出非线性电流。对于矩形波导TE_{10}模式，感应电流需穿过波导长边，因而会在长边激励出非线性电流。波导长边的电流幅度J_1可表示为：

$$J_1 = \frac{\beta a}{\pi} A_{10} \sin\frac{\pi x}{a} \tag{4}$$

式中：β为相位常数；a为波导法兰长边尺寸；A_{10}为磁场强度峰值；x为长边上某点的坐标。

将每个位于边缘的网格视作一个PIM偶极子辐射单元，则第i个辐射单元产生的PIM功率为：

$$P_{PIM3,i} = C I_{PIM3,i}^2 \tag{5}$$

式中：C为辐射电阻[22]；$I_{PIM3,i}$为第i个辐射单元的非线性电流。

根据文献[16]，第i个辐射单元的非线性电流$I_{PIM3,i}$为：

$$I_{PIM3,i} = \frac{3L_i}{4\delta^2}\xi g_3\left(\left|Z_i\right| J_1\left(x_i\right)\right)^3 \tag{6}$$

式中：L_i为单个网格的长度：δ为趋肤深度：Z_i=$R_{c,s,i}$；ξ为MIM接触的面积比例；g_3为MIM接触三阶非线性系数。由此，MIM接触界面的非线性源于隧穿、热电子发射等具有非线性电流−电压运输特性的物理机制。

产生的PIM信号功率一半向前传输，在负载端产生传输互调，另一半向后传输，在源端产生反射互调。因此在负载端产生的PIM功率为各个辐射单元产生的辐射场的矢量叠加，可表示为：

$$P_{\mathrm{PIM3}}=\left(\sum_i\sqrt{\frac{1}{2}P_{\mathrm{PIM3},i}}\right)^2 \tag{7}$$

最后，将式(5)~(6)代入式(7)，可得端口PIM功率表达为：

$$P_{\mathrm{PIM3}}=K\left[\sum_i L_i\left(R_{\mathrm{c,s},i}\sin\frac{\pi x_i}{a}\right)^3\right]^2 \tag{8}$$

式中 $K=\left(\frac{3\xi g_3\sqrt{C}}{4\sqrt{2}\,\delta^2}\right)^2\left(\frac{\beta a A_{10}}{\pi}\right)^6$。

式(8)给出了与接触电阻显性相关的端口PIM解析表达式，结合式(2)可建立端口PIM和界面压强的关系。由于法兰连接接触压强非均匀分布，法兰连接的接触电阻幅值呈现一定的波动性，进而引起多次测量下PIM的随机性。

利用式(8)即可进行波导法兰PIM的计算。为模拟多次接触的随机过程，采用蒙特卡罗模拟过程，并通过随机生成各个网格的接触电阻近似等效波导法兰界面压强分布不均匀的情况，计算流程见图5。

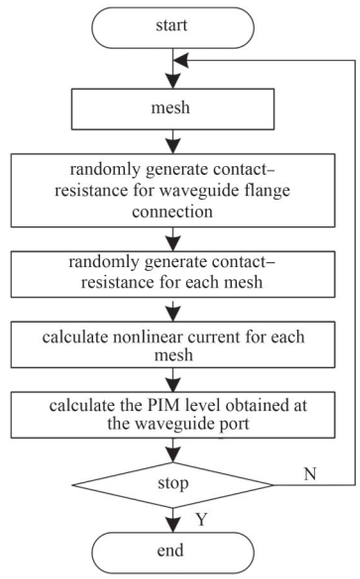

Fig.5 Flow chart of Monte-Carlo simulation
图5 蒙特卡罗计算流程图

通过Matlab对蒙特卡罗计算流程进行编程可获取波导法兰多次连接的PIM计算结果，见图6中空心圆点所示。由图6可得，实验数据点和蒙特卡罗模拟结果吻合良好，表明压强非均匀分布导致的边缘接触区域接触电阻取值波动是引起波导法兰连接PIM出现随机性的一种主要原因。

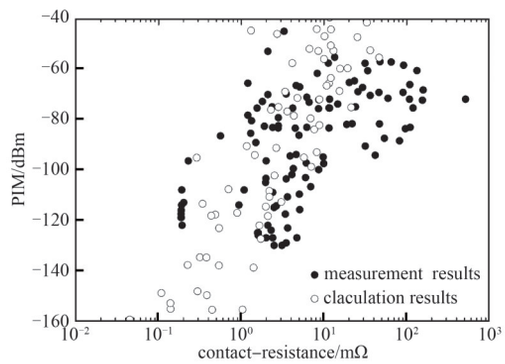

Fig.6 Comparison diagram of the Monte-Carlo calculation results and the measurement results(measurement results are obtained from Fig.4)
图6 蒙特卡罗计算结果与实验值的比较(实验值来自于图4)

3　结论

接触互调通常具有一定的波动性，本文首先观测了弱力连接下接触PIM和直流接触电阻的波动特性，然后利用蒙特卡罗方法建立了压强分布不均匀的接触PIM计算方法。实验表明，多次连接时PIM和直流接触电阻没有一一对应关系，但随着直流接触电阻变小，PIM表现出下降的趋势。利用蒙特卡罗计算，可以较好地解释多次连接时，PIM和直流接触电阻的随机波动特性，揭示了多次连接时波导法兰靠近内壁一侧的接触边缘处的接触压强分布不均匀是PIM随机波动的主要原因之一。

参考文献：

[1] CAI Z H,LIU L,DE PAULIS F,et al. Passive intermodulation measurement:challenges and solutions[J]. Engineering, 2022,14:181-191. DOI:10.1016/j.eng.2022.02.012.

[2] WILKERSON J R,KILGORE I M,GARD K G,et al. Passive intermodulation distortion in antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015,63(2):474-482. DOI:10.1109/TAP.2014.237994.

[3] 崔万照,李军,魏焕. 航天器微波部件无源互调机理分析与检测技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2020. (CUI Wanzhao, LI Jun, WEI Huan, et al. Mechanism analysis and detection technology of passive intermodulation in satellite microwave components[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2020.)

[4] 赵小龙,贺永宁,崔万照. 微带电路无源互调干扰问题综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(3):263-270. (ZHAO Xiaolong,HE Yongning,CUI Wanzhao. Review of passive intermodulation in microstrip circuits[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(3):263-270.) DOI:10.11805/TKYDA2022192.

[5] HENRIE J,CHRISTIANSON A,CHAPPELL W J. Prediction of passive intermodulation from coaxial connectors in microwave networks[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008,56(1):209-216. DOI:10.1109/TMTT.2007.912166.

[6] 魏焕,白鹤,胡天存,等. 移动通信微波部件无源互调干扰综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(3):257-262,277. (WEI Huan, BAI He, HU Tiancun, et al. Review of passive intermodulation interference of mobile communication microwave components[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(3):257-262,277.) DOI:10.11805/TKYDA2022174.

[7] ZHANG Kai, LI Tuanjie, JIANG Jie. Passive intermodulation of contact nonlinearity on microwave connectors[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,60(2):513-519. DOI:10.1109/TEMC.2017.2725278.

[8] JIN Qiuyan,FENG Quanyuan. Frequency and power dependence of passive intermodulation in connectors with contact-material nonlinear modeling[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021,31(2):207-210. DOI:10.1109/LMWC.2020. 3038861.

[9] JIN Qiuyan,FENG Quanyuan. Passive intermodulation distortion in connectors with nonlinear interaction in electrical contacts and magnetic materials[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(2): 1119-1131. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3123334.

[10] COX R. Measurements of waveguide component and joint mixing products in 6-GHz frequency diversity systems[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1970,18(1):33-37. DOI:10.1109/TCOM.1970.1090317.

[11] YANG S. Passive harmonic generation at spring contacts[D]. Missouri:Missouri University of Science and Technology, 2019.

[12] European Space Agency. Waveguide flanges with enhanced passive intermodulation performance[EB/OL].[2024-04-01]. https://connectivity. esa. int/funding/waveguide-flanges-enhanced-passive-intermodulation-performance-artes-51-5c276-expro-plus.

[13] ARAZM F,BENSON F A. Nonlinearities in metal contacts at microwave frequencies[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1980,EMC-22(3):142-149. DOI:10.1109/TEMC.1980.303873.

[14] VICENTE C, HARTNAGEL H L. Passive-intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005,53(8):2515-2525. DOI:10.1109/TMTT.2005.852771.

[15] YOU Jianwei,ZHANG Jianfeng,GU Weihui,et al. Numerical analysis of passive intermodulation arisen from nonlinear contacts in HPMW devices[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1470-1480. DOI: 10.1109/TEMC. 2017.2761024.

[16] ZHAO Xiaolong,HE Yongning,YE Ming,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.

[17] VICENTE C,WOLK D,HARTNAGEL H L,et al. Experimental analysis of passive intermodulation at waveguide flange bolted connections[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007,55(5):1018-1028. DOI:10.1109/TMTT.2007. 895400.

[18] VICENTE C,HARTNAGEL H L. Passive intermodulation at junctions[C]// Workshop:High Power Issues of Microwave Filter, International Microwave Symposium. Honolulu: Universidad Polit é cnica de Valencia, 2007:1-4.

[19] DAYAN A,HUANG Yi,GUSTAFSSON M,et al. Passive intermodulation in metal-to-metal contacts caused by tunneling current[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024,72(8):4892-4899. DOI:10.1109/TMTT.2024.3363885.

[20] ZHANG Songchang,ZHAO Xiaolong,YE Ming,et al. Theoretical and experimental study on electrical contact resistance of metal bolt joints[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(7): 1301-1309. DOI: 10.1109/TCPMT.2019.2920854..

[21] GREENWOOD J A,WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1966,295(1442):300-319. DOI:10.1098/rspa.1966.0242.

[22] 江俊勤. 电偶极子天线的平均能流密度和辐射电阻[J]. 广东第二师范学院学报, 2013,33(3):41-44. (JIANG Junqin. Average energy flow density and radiation resistance of electric dipole antenna[J]. Journal of Guangdong University of Education, 2013, 33(3):41-44.) DOI:10.3969/j.issn.2095-3798.2013.03.007.

作者简介:

赵小龙(1989-),男,博士,副教授,主要研究方向为微波元器件及其非线性干扰问题.email: zhaoxiaolong@xjtu.edu.cn.

余紫霞(2001-),女,硕士,主要研究方向为宽禁带半导体核辐射探测器件.

曹 智(1993-),男,博士,工程师,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.