

# 基于幂级数法分析和计算 MIM 引起的无源互调功率电平

王聪敏<sup>1</sup>, 王光明<sup>1</sup>, 张博<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 空军指挥学院, 北京 100089)

**摘要:**针对微波和射频频段通信系统中产生的无源互调干扰,建立了天线中铝-三氧化二铝-铝结所产生的3阶互调分量的数学模型。在计算3阶互调分量的基础上,采用幂级数法计算了5阶互调分量,并比较了不同氧化铝结所产生的互调分量。计算结果和实测结果表明金属氧化结产生的互调电平随输入功率的增加而增大,并且随着氧化结厚度的增加而增大。

**关键词:**无源互调;幂级数法;功率电平

**中图分类号:** TN913 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)01-0037-04

微波和射频频段通信系统中 PIM 干扰主要来自两种无源非线性:接触非线性和材料非线性<sup>[1-2]</sup>。很多导电机理都可看作 PIM 产生源,其中之一就是穿过金属氧化薄层之间的电子隧道效应。

大型反射天线<sup>[3]</sup>使用轻的薄铝面板经过铝制铆钉铆接加固而成,其 MIM 结大多是铝-三氧化二铝-铝结,由于穿过薄绝缘层的电子隧道效应,当两个或两个以上的发射机在不同频率同时使用时,这些非线性元器件受到大功率微波信号照射时,就会产生噪声,即产生互调信号,本文对此进行分析计算。

## 1 金属氧化物的电子隧道效应产生非线性的机理

电子隧道效应理论基于这样的事实<sup>[4]</sup>:在任何金属与绝缘体的交接面上,自由电子波函数  $\Psi_0$  仅延伸到绝缘体内几个埃的深度。在大尺寸绝缘体中,波函数很快衰减为很小的值以至于这个效应不明显。但是,如果绝缘体的厚度小于 50 埃,那么在整个绝缘体内波函数  $\Psi_0$  为一非零值。

本文以 Al - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Al 为例探讨天线中金属间氧化层的电子隧道效应引起的 PIM 机理。如图 1 所示,左边的扩展函数  $\Psi_0$  在幅度和斜率方面均与绝缘体内的指数衰减相匹配,类似地,在其变为零之前与右边金属中的扩展波函数相匹配。由于温度影响很小,现只讨论在一个方向上的隧道电流密度的零温度表示式<sup>[5]</sup>:

$$J = \frac{me}{2\pi h} \left[ eV \int_0^{E_{F_1}-eV} P(E) dE + \int_{E_{F_1}-eV}^{E_{F_1}} (E_{F_1} - E) P(E) dE \right] \quad (1)$$

式中:  $V$  为结间电压;  $E_{F_1}$  为左侧金属中电子的费米能级;  $m$  为电子质量;  $h$  为普朗克常量;  $P(E)$  为隧道效应中电子的横向传输概率:

$$P(E) = \exp \left[ - \int_s \sqrt{\frac{2m}{h^2} [\phi(x) - E]} dx \right] \quad (2)$$

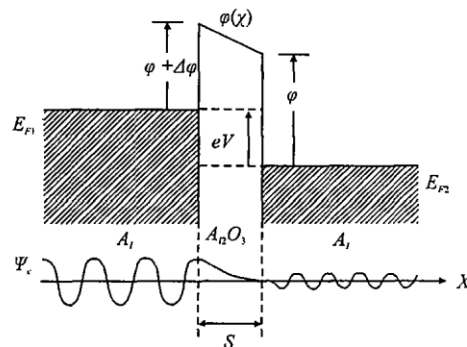


图1 导体间氧化层电子隧道效应示意图

Fig.1 The oxide's electron tunneling between conductor

收稿日期:2007-05-09

基金项目:国家“863”计划资助项目(2002AA837010)

作者简介:王聪敏(1979-),女,山西临猗人,博士生,主要从事微波电路与系统研究. E-mail: WangCongmin-2003@163.com

王光明(1964-),男,安徽砀山人,教授,博士生导师,主要从事电磁散射与辐射、微波电路与系统研究。

式中: $s$ 为结的厚度; $\phi(x)$ 是作用在氧化层禁区内电子的局部势垒函数。对于图1中的情形,电子从左边到右边的传输概率为

$$P = \exp\left\{-\frac{4}{3} \times \frac{2m}{h} \left(\frac{s}{eV + \Delta\phi}\right) \left[ (E + \phi_0 + eV + \Delta\phi)^{2/3} - (E + \phi_0)^{2/3} \right]\right\} \quad (3)$$

将式(3)带入式(1)中,并作泰勒级数展开,并取到第4阶,得到隧道电流密度的近似表达式<sup>[6]</sup>:

$$J = \frac{me}{2\pi^2 h^3} \exp(-A\bar{\phi}^{1/2}) \left[ \left( \frac{2\bar{\phi}^{1/2}}{A} + \frac{2}{A^2} \right) eV + \frac{A}{48\bar{\phi}^{1/2}} (eV) \right] \quad (4) \quad A = \frac{4\pi s \sqrt{2m}}{h} \quad (5)$$

式中, $\bar{\phi}$ 为两侧界面电势的平均值。

## 2 氧化结产生的3阶互调分析与计算

电子隧道效应研究中采用的氧化结等效电路图如图2所示。图中, $C$ 为结两侧的金属板形成的射频电容, $R_0$ 为结的非线性电阻, $r_s$ 为串联电阻。对于隧道结,直流电压特性可表示为

$$E = G_0 V + \alpha G_0 V^3 \quad (6)$$

式中: $G_0$ 为通常的线性电导; $\alpha$ 为衡量与线性偏离程度的比率。式中没有 $V^2$ 项是因为 $V^2$ 项不产生落入接收通带内的IM频率。当输入信号为等幅二载波情况时,基波频率 $f_1$ 、 $f_2$ 和互调频率 $2f_2 - f_1$ 处输出电流为

$$I(t) = G_0 (V_1 \cos 2\pi f_1 t + V_2 \cos 2\pi f_2 t) + \frac{3}{4} \alpha G_0 V_1 V_2^2 \cos 2\pi (2f_2 - f_1) t = I_0(t) + I_{IM}(t) \quad (7)$$

式中: $I(t)$ 为通过非线性电阻 $R_0$ 的电流; $I_0(t)$ 为频率 $f_1$ 和 $f_2$ 处的原驱动电流; $I_{IM}(t)$ 为互调频率 $2f_2 - f_1$ 处的IM电流。IM电流的峰值用式(8)计算, $V_1$ 和 $V_2$ 分别用式(9)、式(10)计算。

$$I_{IMP} = 3/4 \alpha G_0 V_1 V_2^2 \quad (8) \quad V_1 = X_{C1} [P_T / (r_s + r_l)]^{1/2} \quad (9) \quad V_2 = X_{C2} [P_T / (r_s + r_l)]^{1/2} \quad (10)$$

式(9)、(10)中 $X_{C1}$ 和 $X_{C2}$ 是 $f_1$ 和 $f_2$ 处的容抗。将式(9)、(10)带入式(8),得

$$I_{IMP} = 3/4 \alpha G_0 [P_T / (r_s + r_l)]^{3/2} X_{C1} X_{C2}^2 \quad (11)$$

由测量结果和经验得知<sup>[4]</sup>:通常情况下, $R_0$ 很大, $C$ 非常小, $R_0$ 和 $X_C$ 之间相差3-7个数量级,可以认为基本上所有电流都从电容上流过,也就是说几乎所有的传输功率都消耗在串联电阻 $r_s$ 和负载电阻 $r_l$ 上,因此消耗在 $(r_s + r_l)$ 中的IM功率为

$$P_{IM} = V_{IMP}^2 \cos^2(2\omega_2 - \omega_1) t / (r_s + r_l) = \frac{1}{2} V_{IMP}^2 / (r_s + r_l) \quad (12)$$

将式(11)带入式(12)得

$$P_{IM} = \frac{1}{32} \alpha^2 P_T^3 X_{C1}^2 X_{C2}^4 / R_0^2 (r_s + r_l)^4 \quad (13)$$

式中, $X_{CIM}$ 为结电容在互调频率点的容抗。对 $P_{IM}$ 进行单位换算得下式

$$P_{IM(\text{dbm})} = 10 \log P_{IM} / 10^{-3} \quad (14)$$

采用文献[4]中提供的5组不同的氧化铝结的参数 $f_1 = 230 \text{ MHz}$ , $f_2 = 250 \text{ MHz}$ , $f_l = 270 \text{ MHz}$ , $P_T = 0.5 \text{ W}$ , $r_l = 50 \Omega$ 以及由式(14)计算的3阶互调电平的结果见表1。图3为5组不同的氧化铝结产生的互调电平随输入功率的变化曲线。

表1 氧化结3阶互调计算结果

Tab. 1 The numerical result of oxide's third order PIMP

$C/\mu\text{f}$	$R_0/\text{k}\Omega$	$r_l/\Omega$	$\alpha$	$P_{IM3}/\text{dBm}$
0.021	6.31	4.31	40.42	-220
0.013	10.23	6.33	37.18	-212
0.008	16.54	7.42	34.33	-203
0.002	84.52	15.54	26.09	-178
0.001	100.00	23.91	29.24	-167

当 $f_1 = 230 \text{ MHz}$ , $f_2 = 250 \text{ MHz}$ 时,3阶互调产物为: $2f_1 - f_2$ , $2f_2 - f_1$ , $2f_1 + f_2$ , $2f_2 + f_1$ ,利用式(14)计算这些频率点上的3阶互调产物的电平(输入功率为0.5W),如图4所示。

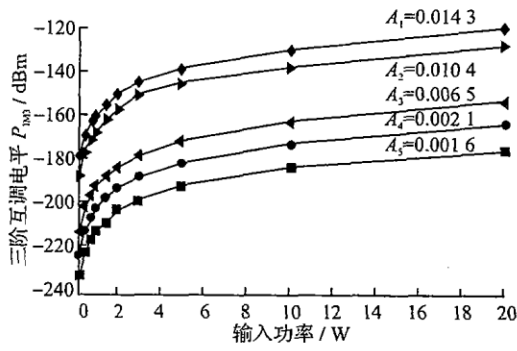


图 3 不同氧化铝结产生的互调电平计算结果

Fig. 3 The IM level calculation result of different alumina

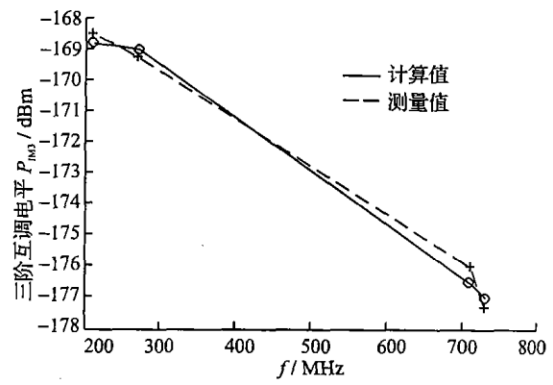


图 4 3 阶互调功率电平计算值和测量值

Fig. 4 The numerical and measure results of the third IM power level

图 3 和图 4 说明这种金属氧化结产生的互调电平随输入功率的增加而增大,并且随着氧化结的厚度增加而增大。比较图 4 中测量值和计算值,说明采用这样的数学模型计算 3 阶互调电平是可行的。

### 3 氧化结产生的 5 阶互调分析与计算

当考虑氧化结产生的 5 阶互调的时候,前面的分析方法不再适用<sup>[7-8]</sup>。这里,我们采用幂级数法用 3 阶互调产物的计算结果来计算 5 阶互调产物<sup>[9-10]</sup>。在任意载波输入的时候,幂级数表示的非线性器件的输出为

$$V = \sum_{L=0}^{\infty} \left( \frac{a_{N+2L}(N+2L)!}{2^{N+2L-1}} \sum_{q_1, q_2, \dots, q_M} \prod_{i=1}^M \frac{E^{1 a_i + 2q_i}}{(q_i + |a_i|)! q_i!} \right) \quad (15)$$

根据式(15),氧化结的 3 阶互调产物和 5 阶互调产物的幅度分别为

$$V_{IM_3} = \sum_{L=0}^{\infty} \left( \frac{a_{3+2L}(3+2L)!}{2^{2+2L}} \sum_{q_1, q_2} \frac{E_1^{2+2q_1} E_2^{1+2q_2}}{(q_1+2)! q_1! (q_2+1)! q_2!} \right) \quad (16)$$

$$V_{IM_5} = \sum_{L=0}^{\infty} \left( \frac{a_{5+2L}(5+2L)!}{2^{4+2L}} \sum_{q_1, q_2} \frac{E_1^{3+2q_1} E_2^{2+2q_2}}{(q_1+3)! q_1! (q_2+2)! q_2!} \right) \quad (17)$$

$$\text{式(16)中,取 } E_1 = E_2, L = 3, \text{ 则: } E_{IM_3} = 0.75a_3E^3 + 3.125a_5E^5 + 11.4844a_7E^7 + 41.39a_9E^9 \quad (18)$$

$$\text{式(17)中,取 } E_1 = E_2, L = 2, \text{ 则: } E_{IM_5} = 0.625a_5E^5 + 2.7344a_7E^7 + 2.9948a_9E^9 \quad (19)$$

采用图 3 中  $A = 0.0143$  的氧化结在输入功率为:0.5 W、1.0 W、1.5 W、2.0 W 时的 3 阶互调电平求解式(18)中的  $a_3$ 、 $a_5$ 、 $a_7$ 、 $a_9$ ,然后将结果带入式(19)中,计算结果如表 2 和图 5 所示。比较图 5 中计算值和测量值,可以看出计算结果的正确性。图 6 为 5 组不同的氧化铝结产生的 5 阶互调电平随输入功率的变化曲线。

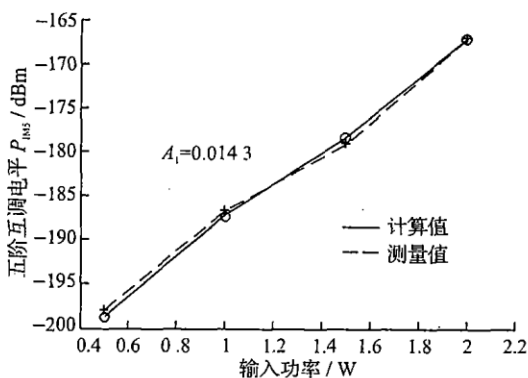


图 5 氧化结 5 阶互调产物计算值和测量值

Fig. 5 The numerical and measure results of oxide fifth order PIMP

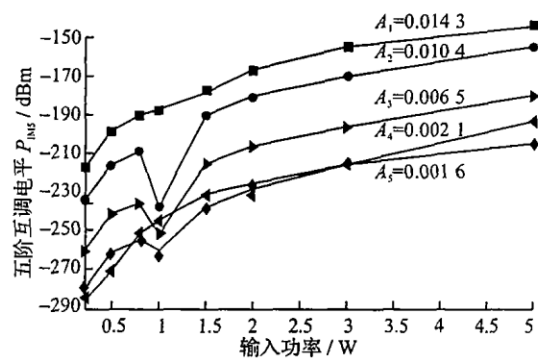


图 6 5 组氧化结的 5 阶互调计算结果

Fig. 6 The numerical result of different oxide's fifth order PIMP

从图3和图6中的结果可以看出,5阶互调和3阶互调具有相似的变化规律。但是,5阶互调的结果存在个别畸变点,在输入功率1.0W时,对于不同的 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 有比较大的误差。由幂级数的公式可知,当省略掉7次以上的谐波影响时,要产生一定的误差。另外,在计算互调时,只考虑了两个载波产生的互调产物,没有考虑一个载波和一个3阶互调产物产生的5阶互调产物与两个载波产生的5阶互调产物在频率上是重合的影响,也使计算上出现了误差。

表2 5阶互调产物计算结果

Tab. 2 The numerical result of the fifth order PIMP

输入功率/W	0.5	1.0	1.5	2.0
3阶互调电平 $P_{IM3}/\text{dBm}$	-168.7	-159.7	-154.4	-150.6
5阶互调电平 $P_{IM5}/\text{dBm}$	-198.6	-187.2	-178.3	-166.8

## 参考文献:

- [1] Ben Jemma N. Apparatus and Methods For Electrical Contact Resistance Study of Cleaned and Corroded Materials[J]. Means Sci and Technol, 1990,1(2):282-286.
- [2] Pietro Bolli. Passive Intermodulation on Large Reflector Antennas[J]. IEEE and Propagation Magazine, 2002,44(5):13-19.
- [3] Higa W. Spurious Signals Generated by Electron Tunneling on Large Reflector Antennas[J]. Proceedings of the IEEE, 1975, 63(2):306-313.
- [4] Bond C. Intermodulation Generation by Electron Tunneling Aluminum Oxide Films[J]. Proceedings of IEEE, 1979,67(2):1643-1645.
- [5] Duke C B. Tunneling in Solids[M]. New York: Academic, 1969.
- [6] Guenzer C S. Comments on Spurious Signals Generated by Electron Tunneling on Large Reflector Antennas[J]. Proceeding of the IEEE, 1976,64(3):283-285.
- [7] 梁建刚. 微波无源互调与功放线性化技术研究[D]. 西安:空军工程大学, 2004.  
LIANG Jiangan. Research on Microwave Passive Intermodulation and Linearization Technique for Poweramplifier[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2004. (in Chinese)
- [8] 王海宁. 高功率微波条件下的无源互调问题综述[J]. 微波学报, 2005,21(4):1-5  
WANG Haining. Review of Passive Intermodulation in HPM Condition[J]. Journal of Microwave, 2005,21(4):1-5. (in Chinese)
- [9] 张世全,葛德彪. 基于傅立叶级数法的互调产物一般特性分析[J]. 电波科学学报, 2005,20(2):265-268.  
ZHANG Shiquan, GE Debiao. The Analysis of General Nature of Intermodulation Products Based on Fourier Series Method [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005,20(2):265-268. (in Chinese)
- [10] 张世全. 微波频段金属接触非线性引起的无源互调功率电平的分析 and 预测[J]. 微波学报, 2002,18(4):26-30.  
ZHANG Shiquan. The Analysis and Prediction of the Power Level of PIM Due to Metallic Contact Nonlinearity at Microwave Frequencies[J]. Journal of Microwave, 2002,18(4):26-30. (in Chinese)

(编辑:田新华)

## The Analysis and Calculation of the Power Level of PIM Due to MIM Based on Power Series

WANG Cong-min<sup>1</sup>, WANG Guang-ming<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>

(1. The Missile Institute, air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China; 2. Air Force Command College, Beijing 100089, China)

**Abstract:** For passive inter-modulation interference of microwave and RF communication system, the non-linear principal mechanisms due to electron tunnelling of metal oxide are analysed and discussed firstly. Mathematical model of the third order PIMP of AI-A1203-Aiin antenna is constructed. Based on the results of the third order PIMP, the fifth order PIMP is calculated by using power series, and the comparison among the PIMPs produced by different alumina is done. Numerical and measure results indicate that oxide's PIMP power level increases with the increase of input power, and increases with the increase of oxide's thickness.

**Key words:** passive inter-modulation (PIM); power series; power level