

微波阶梯阻抗变换器低气压电晕放电粒子模拟*

刘雷¹⁾ 李永东^{1)2)†} 王瑞²⁾ 崔万照²⁾ 刘纯亮¹⁾

1) (西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

2) (空间微波技术重点实验室, 西安 710100)

(2012年7月19日收到; 2012年8月14日收到修改稿)

采用3维粒子软件VORPAL对微波阶梯阻抗变换器中的低气压电晕放电过程进行了粒子模拟, 获得了放电过程中带电粒子实空间分布的时间演变图像, 分析并解释了其中低气压电晕放电机理和微放电机理之间的关系. 模拟结果表明: 低气压电晕放电的阈值电压随着气压的增长呈现先减小后增加的变化趋势; 并且随着气压的增长, 微放电作用减弱, 低气压电晕放电作用增强. 通过对银和铜两种器壁材料放电阈值的比较, 获得了两种放电机理之间的临界气压.

关键词: 阶梯阻抗变换器, 低气压电晕放电, 粒子模拟

PACS: 52.40.Db, 79.20.Hx, 84.30.Qi

DOI: 10.7498/aps.62.025201

1 引言

阻抗变换器是微波工程中常见的微波部件之一, 其作用是消除带内不良反射, 解决微波传输线和微波部件之间的匹配问题. 由于残余气体释放或装配、运输过程中的气体泄漏, 微波部件中往往会存在一定气压的背景气体 (主要为空气), 它会造成器件工作时发生低气压电晕放电^[1,2], 从而导致性能变差或者完全失效, 这种现象对于卫星通信和航天应用来说是致命的破坏.

为了保证微波部件正常工作, 近年来人们一直在寻求抑制微波部件中低气压电晕放电的方法. 现有的研究主要采用实验和流体模拟结合的方法^[3-7]; 总结出微波部件中低气压条件下电流击穿物理机理主要有两种, 一种是微放电 (即二次电子倍增击穿), 另一种是低气压电晕放电; 但是没有分析微放电和低气压电晕放电导致微波部件失效问题中各自起主导作用的气压范围. 另外由于流体模拟对物理过程中的粒子密度分布和能量分布进行了简化, 无法得到物理过程中的微观粒子空间演变

图像. 由于低气压电晕放电的放电功率要比微放电的放电功率低得多, 应该尽量避免微波部件中发生低气压电晕放电, 因此分析微放电和低气压电晕放电导致微波部件失效问题中各自起主导作用的气压范围有着深刻的意义.

本文通过建立基于粒子模拟的低气压电晕放电模型, 对微波作用下, 阻抗变换器中的低气压电晕放电过程进行粒子模拟; 获得放电过程的微观粒子空间演变图像; 得到不同几何结构参数条件下低气压电晕放电的阈值曲线, 并分析微放电和低气压电晕放电导致微波部件失效问题中各自起主导作用的气压范围.

2 低气压电晕放电机理

低气压条件下 (小于 100 mbar, 1 bar = 10^5 Pa) 引起微波部件中电流击穿的物理机理有两种, 分别是微放电和低气压电晕放电.

微放电是真空条件下 (或很低气压下, 约 1 mbar) 发生在器壁间的二次电子倍增击穿, 它会对空间微波部件造成损坏^[8]. 在真空或者气压很低条件下, 电子平均自由程远远大于器件尺寸, 如下

* 空间微波技术重点实验室基金 (批准号: 9140C530103110C5301) 和国家自然科学基金 (批准号: 50977076) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: leyond@mail.xjtu.edu.cn

式所示:

$$\lambda = kT / \sqrt{2\pi p d^2} \gg D, \quad (1)$$

λ 是电子平均自由程; k 是玻尔兹曼常数; T 是热力学温度; p 是气体压强; d 是分子直径; D 是器件尺寸. 电子和气体分子之间的碰撞概率小, 在微波场的作用下, 电子在两电极板间来回运动. 如果电子打到电极板时, 电极板二次电子发射系数大于 1, 就会发生二次电子发射. 这时, 如果外加电场反向, 二次电子会在外电场的作用下向另一电极移动. 当电子的渡越时间 (电子在极板间运动的时间) 等于半个微波周期的奇数倍时, 二次电子发射与外加电场发生共振. 电极间隙中的电子迅速增加, 最终导致电极击穿. 在微放电发生的气压范围内, 微放电与气压无关; 与器壁材料有关 [9].

随着背景气体气压的升高, 电子平均自由程减小. 当电子平均自由程小于器件尺寸时, 电子运动过程中会与气体分子发生碰撞. 当电子在微波场中获得的能量达到电离能时, 电子与气体分子发生电离碰撞, 产生新的电子. 这些电子又成为了下一次电离碰撞的源粒子, 使得电子在局部空间迅速增加, 导致局部击穿 [9]. 一般来说, 由于气压和微波场幅值的限制, 这种放电不会在器壁间形成稳定的通道, 因此归结为电晕放电, 它还与气体压强有关.

3 低气压电晕放电物理模型

本文采用美国 Tech-X 公司研制的 VORPAL 粒子模拟软件 [10] 进行模拟, 矩形阻抗变换器低气压

电晕放电模型的几何结构如图 1 所示.

模型几何结构参数如表 1 所示. 器件内壁的金属选取铜 (Cu) 和银 (Ag).

3.1 模拟参数设置

由于电晕放电发生的区域一般是非对称的, 而且 3 维几何结构本身不方便进行 2 维简化, 因此本文采用 3 维模拟. 为了在保证计算精度的前提下, 尽量提高模拟速度, 采用了如表 2 所示的网格剖分.

表 2 中 N_x, N_y, N_z 分别为其在 x, y, z 坐标方向的网格数. 另外为了保证稳定性, 模拟的时间步长必须满足 Courant 稳定性条件:

$$dt < dt(cfl) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{N_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{N_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{N_z}{L_z}\right)^2}} / c, \quad (2)$$

其中 L_x, L_y, L_z 分别为模拟区域在 x, y, z 方向的长度; c 为光速. 模拟的时间步长为 1×10^{-13} s, 充分满足 Courant 稳定性条件; 模拟的总物理时间长度为 90 ns. 另外模拟时选取的微波频率为 3.1 GHz, 该时间步长也远远小于微波周期.

3.2 微波加载

模拟中微波是通过阻抗变换器输入端加载一个频率为 3.1 GHz 的 TE_{10} 模式的激励源来实现的. 模拟时, 波导壁全部视为理想导体; 输出端采用吸收边界.

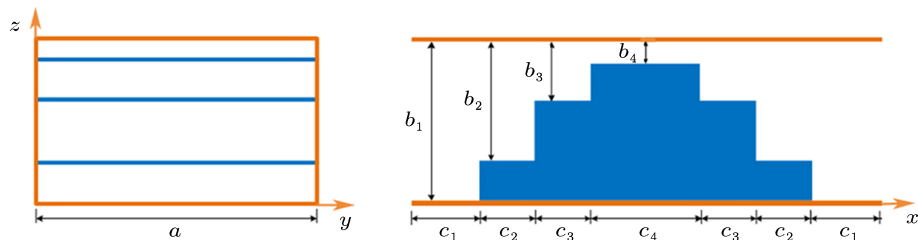


图 1 矩形阻抗变换器模型

表 1 矩形阻抗变换器几何结构参数

结构	a/mm	b/mm	b_1/mm	b_2/mm	b_3/mm	c_1/mm	c_2/mm	c_3/mm	c_4/mm
结构 1	72.14	34.04	13.87	2.45	1.00	30.05	23.67	28.00	64.00
结构 2	72.14	34.04	20.34	8.37	5.00	30.05	30.01	31.43	60.09

表 2 模拟网格部分

结构	N_x	N_y	N_z
结构 1	80	40	270
结构 2	80	40	90

3.3 初始粒子加载

在模拟的初始阶段, 在矩形波导的一侧导体表面附近区域内每个时间步发射 10 个宏粒子作为种子电子, 持续时间为 0.33 ns(一个微波周期), 从而使

种子电子的初始相位在 $0-2\pi$ 间均匀分布.

3.4 粒子边界处理

当计算区域中的粒子打到导体边界时, 粒子可能被边界所吸收, 也可能在表面产生二次电子发射, 二次电子发射系数与电子打在金属板上的方向和动能相关. 采用 Furman 模型^[11]来描述. 铜 (Cu) 和银 (Ag) 材料的二次电子发射的模型参数如表 3 所示.

表 3 铜 (Cu) 和银 (Ag) 材料的二次电子发射的模型参数

模型参数	$\hat{\delta}_{es}$	$\hat{E}_{es}/\text{eV}$	s	t_1	t_2	t_3	t_4	$\hat{P}_{1,e}$	W/eV	$P_{1,r}(\infty)$
Cu	1.8848	276.8	1.54	0.66	0.8	0.7	1	0.496	60.86	0.2
Ag	1.64	316	1.43	2.786	0.094	2.6412	0.1363	0.5	20	0.3

3.5 阈值判断

通过诊断计算区域内的总的电子数目变化情况, 可以判断器件中是否发生放电. 如果电子数目随时间指数增长, 则说明矩形结构中发生了放电; 当电子数目随时间下降, 则说明矩形结构中没有发生放电. 在本文模拟的 300 个微波周期内, 当在某个等效电压下电子数目随时间基本保持不变, 则把该等效电压值取为放电的阈值电压, 相应的微波输入功率为阈值功率.

3.6 碰撞反应

氮气 (N_2) 作为空气的主要成分, 在空气放电中起主要作用, 对氮气中放电进行研究是进一步研

究空气中放电的基础. 本文选取氮气作为背景气体, 考虑其相关的三种主要碰撞反应类型, 即电离碰撞、激发碰撞和弹性碰撞^[12]. 虽然还可能存在复合碰撞, 由于低气压电晕放电产生的电子和正离子密度小, 相比于电子和中性气体的电离碰撞来说, 电子和正离子的复合碰撞几乎可以忽略.

4 模拟结果

4.1 低气压电晕放电过程分析

通过模拟, 获得了真空和不同气压条件下带电粒子在实空间分布的时间演变图像. 图 2 是真空情况下, 不同时刻电子空间分布图.

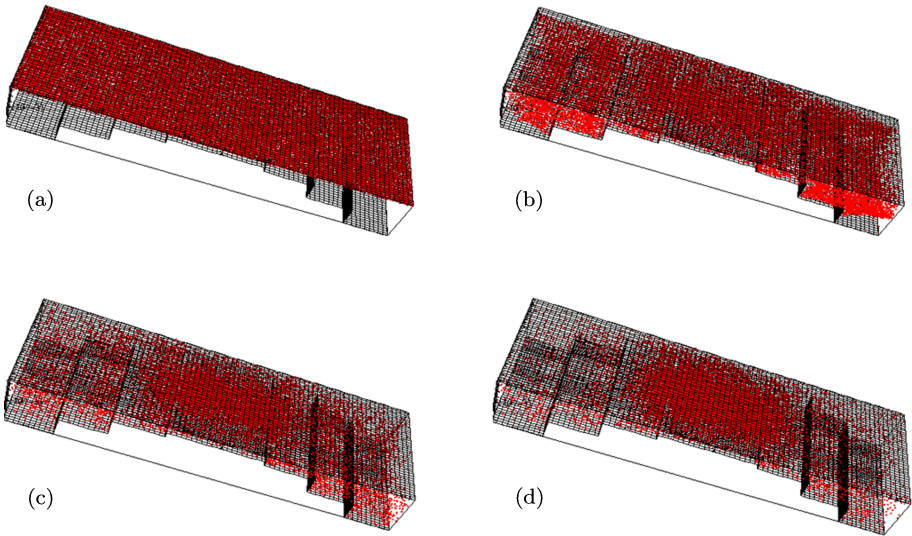


图 2 不同时刻电子空间分布图 (a) 2 ns; (b) 26 ns; (c) 58 ns; (d) 90 ns

图 2(a) 为种子电子实空间分布图, 种子电子加载在阻抗变换器上壁附近. 种子电子受微波场作用在阻抗变换器上下器壁来回运动. 当电子打到器壁时, 二次电子发射系数大于 1, 就会导致二次电子发射, 电子数目倍增 (如图 2(b) 所示). 从图 2(c) 可以看出, 在阻抗变换器中, 大部分电子没法达到放电阈值从而被器壁吸收. 阶梯处两板间距越窄, 电场幅值越大. 因此阻抗变换器最窄阶梯处电场最先达到阈值电场, 所以这个地方最先发生微放电, 如图 2(d) 所示.

图 3 为背景气体为 5 mbar N_2 条件下, 电子和氮离子时空分布图.

图 3(a) 是初始加载的种子电子. 由于 N_2 的存

在, 电子在微波场中获得能量后会与 N_2 碰撞电离, 从而引发气体放电, 如图 3(b), (f) 所示, 气体放电导致电子和氮离子同比增加. 在阻抗变换器中, 大部分电子没法达到放电阈值从而被器壁吸收 (如图 3(c), (g) 所示). 阻抗变换器最窄阶梯处电场较强, 产生了明显的电晕放电, 随着时间的推移, 放电会进一步增强, 如图 3(d), (h) 所示.

4.2 放电阈值分析

图 4 是通过系列模拟得到的阈值电压和阈值功率随气压的变化曲线. 阻抗变换器的器壁材料为 Ag.

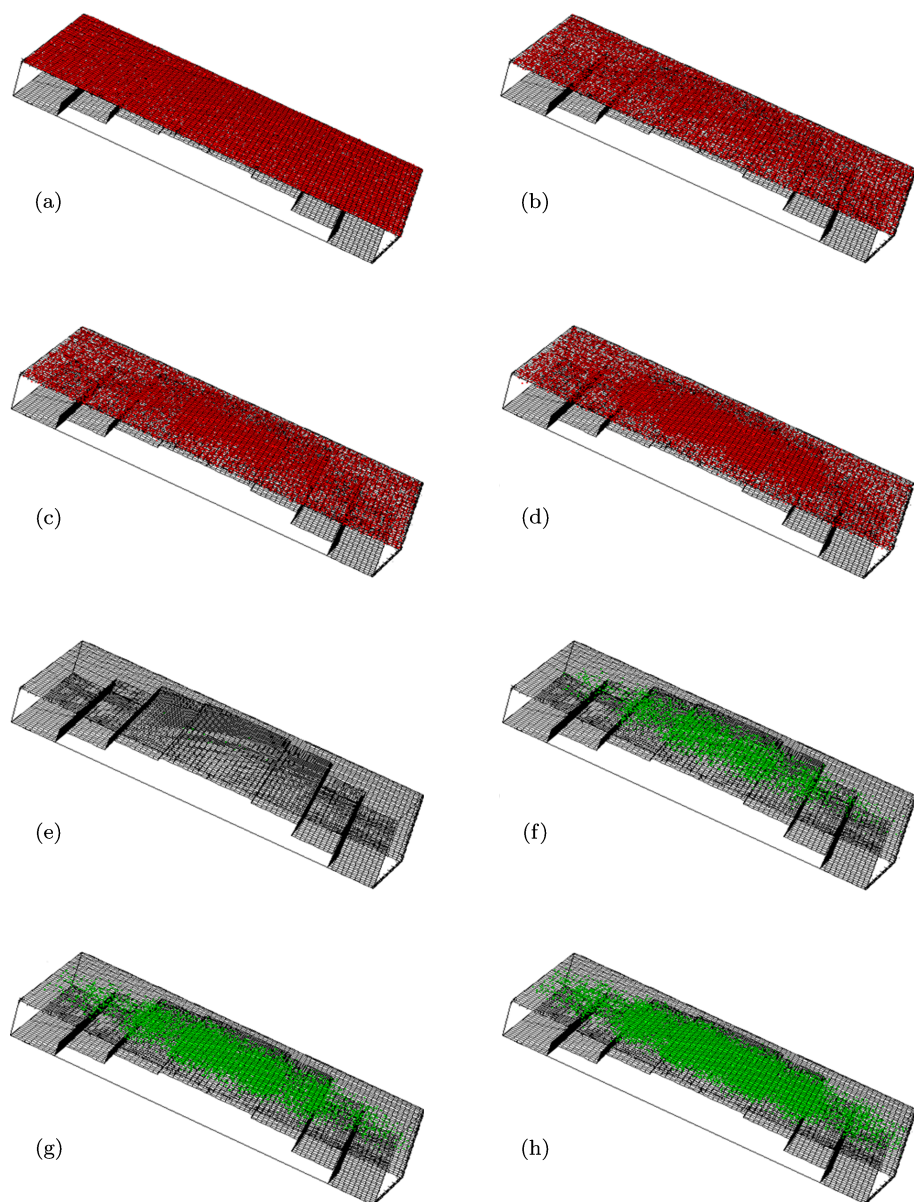


图 3 不同时刻电子 (a)—(d) 和氮离子 (e)—(h) 空间分布图 (a), (e) 2 ns; (b), (f) 26 ns; (c), (g) 58 ns; (d), (h) 90 ns

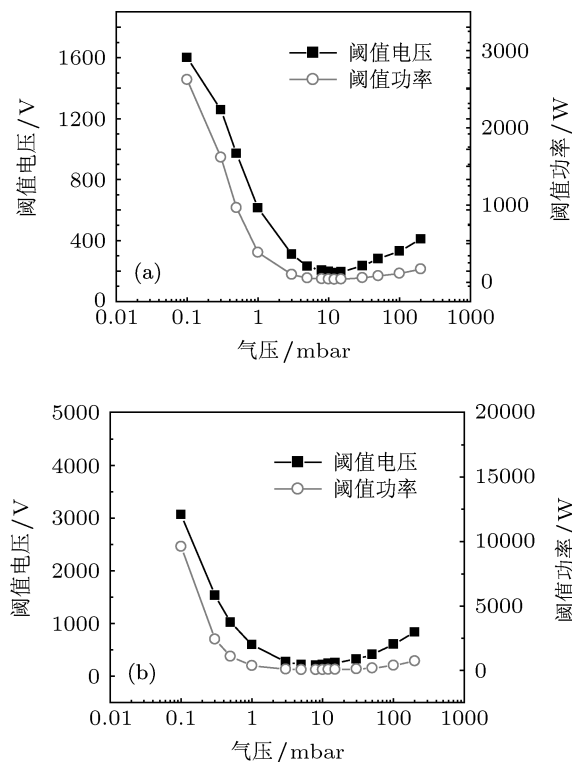


图4 器壁材料为Ag的阻抗变换器阈值电压和阈值功率随气压的变化曲线 (a) 结构1; (b) 结构2

从图4中可以看出,对于结构1和结构2,阈值电压和阈值功率随着气压的增加都呈现先减小后增加的趋势.真空中只存在微放电效应.气压很低时,由于气体放电的出现使得放电阈值减小.随着气压的增加,气体放电越来越占主要作用.碰撞电离是气体放电的前提,制约电子碰撞电离的因素有两个,即总碰撞概率(判断是否发生碰撞)和电离碰撞概率(判断发生的碰撞是不是电离碰撞).总碰撞概率只与背景气体气压有关,而电离碰撞概率既与气压有关,也与外加电场有关.当气压很低时,由于气体分子密度小,总的碰撞概率小,制约放电规模的主要因素是总碰撞概率.当气压增加,气体分子密度增大,总碰撞概率增加,使得放电阈值下降.当气压继续增加,制约气体放电阈值电压的主要因素变成了电离碰撞概率.虽然总碰撞概率大,但平均自由程变小,为了使得电子在碰撞前(一个平均自由程内)在外加电场中获得足够动能以达到电离能,必须进一步增大外电场强度.因此当气压增加时,放电的阈值电压也随之增加.

4.3 微放电低气压电晕放电临界气压分析

为了估算微放电和低气压电晕放电两种因素

之间的临界气压,对器壁材料分别为Ag和Cu的阻抗变换器阈值曲线进行了对比.图5显示的是两种材料阈值电压随气压的变化曲线.

当气压较低时,相同气压条件两种材料阈值电压存在差异,Ag的阈值电压比Cu的高.当气压较高时,相同气压条件两种材料阈值电压相同.在微放电发生的气压范围内,微放电与气压无关,与器壁材料有关.低气压电晕放电与气压有关,与器壁材料无关.由此可以说明气压较低时,存在微放电,气压较高时,只存在低气压电晕放电.随着气压的增加,微放电逐步过渡到低气压电晕放电.图6显示的是器壁材料为Ag和Cu的阻抗变换器阈值电压差值随气压的变化曲线.

随着气压的增长,阈值差值下降,最后变为零.另外下降趋势由缓变快,再变缓;结构1的阈值差值在1 mbar附近变化最快;结构2的阈值差值在0.4 mbar附近变化最快.

当气压较低时,由于不同的器壁材料存在不同的二次电子发射系数,导致器壁材料为Ag和Cu的阻抗变换器微放电作用存在差异,并且这种差异随

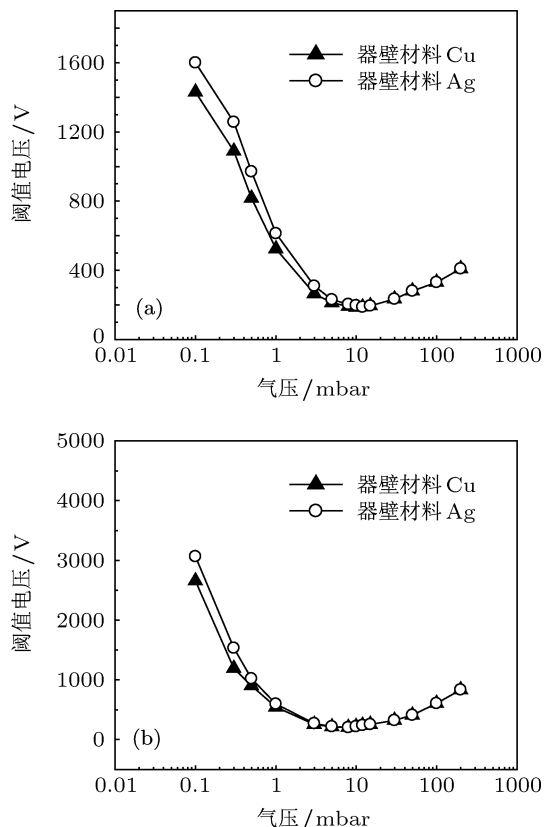


图5 器壁材料为Ag和Cu的阻抗变换器阈值电压随气压的变换曲线 (a) 结构1; (b) 结构2

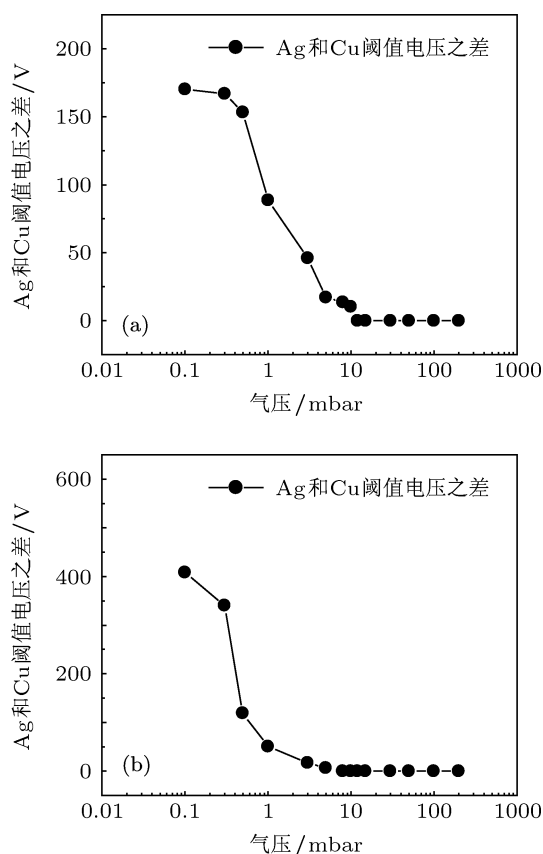


图6 器壁材料为 Ag 和 Cu 的阻抗变换器阈值电压差值随气压的变换曲线 (a) 结构 1; (b) 结构 2

气压变化缓慢. 这说明低气压电晕放电作用小, 以微放电作用为主. 随着气压的增大, Cu 和 Ag 的阈值电压偏差减小, 并且阈值电压迅速减小. 这说明微放电作用变小, 低气压电晕放电作用增强. 当气压增加到一定值时, 器壁材料为 Ag 和 Cu 的阻抗变

换器阈值电压差值变为 0, 说明微放电作用可忽略, 主要表现为低气压电晕放电. 因此, 随着气压的增加, 阻抗变换器中的电流击穿机理由微放电向低气压电晕放电过渡. 另外, 阈值差值的快速下降说明微放电向低气压电晕放电的快速过渡. 因此选取阈值差值下降最快处的气压值作为微放电和低气压电晕放电之间的临界气压值. 结构 1 和结构 2 的临界气压值分别为 1 mbar 和 0.4 mbar.

5 结 论

本文采用粒子模拟软件 VORPAL 对微波作用下矩形波导阶梯阻抗变换器中的低气压电晕放电过程进行了模拟. 根据模拟结果, 对导致微波部件电流击穿的微放电机理和低气压电晕放电机理进行了分析, 并获得了矩形波导阶梯阻抗变换器低气压电晕放电的阈值电压与气压的关系. 模拟结果表明: 随着背景气体 N_2 气压的增加, 阈值电压先减小后增加; 并且随着气压的增加, 微放电作用逐步减弱, 低气压电晕放电作用逐步起主导作用; 对于所模拟的 1 mm 间隙结构和 5 mm 间隙结构, 微放电向低气压电晕放电过渡的临界气压值分别为 1.0 mbar 和 0.4 mbar; 低气压电晕放电阈值电压要比微放电的阈值电压低近 1 个数量级. 在设计微波部件时, 应该尽量避免微波部件中发生低气压电晕放电, 因此, 在工程设计中, 应尽量保证微波部件工作在临界气压值以下. 后续工作将进一步对空气中的低气压电晕放电过程进行粒子模拟.

- [1] Oraizi H 1996 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **44** 389
- [2] Rasch J, Anderson D, Lisak M, Semenov V E, Puech J 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 055210
- [3] Frigui K, Baillargeat D, Verdeyme S, Bila S, Catherinot A, Puech J, Pacaud D 2008 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **56** 3072
- [4] Sorolla E, Mattes M 2010 *Microwave Rev* **16** 41
- [5] Ortega T P, Monge J, Marini S, Sanz J, Sorolla E, Mattes M, Vicente M, Gil J, Boria V E, Gimeno B 2010 *IEEE Microwave Compon. Lett.* **20** 214
- [6] Wang R, Zhang N, Li Y, Cui W Z 2011 *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)* Ningbo, China, September 9, 2011 p4517
- [7] Frigui K, Baillargeat D, Verdeyme S, Bila S, Catherinot A, Puech J, Pacaud D, Herren J J 2008 *2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* Limoges, France, June 15, 2008 p735
- [8] Rodney J, Vaughan M 1988 *IEEE Trans. Electron Devices* **35** 1172
- [9] Udiljak R 2007 *Multipactor in Low Pressure Gas and in Nonuniform RF Field Structures* (Sweden: Chalmers University of Technology)
- [10] Nieter C, Cary J R 2004 *J. Comput. Phys.* **196** 448
- [11] Furman M A, Pivi M 2002 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **5** 124404
- [12] Raju G G 2006 *Gaseous Electronics-Theory and Practice* (1st Ed) (Florida: CRC Press) p230

Particle-in-cell simulation of corona discharge in low pressure in stepped impedance transformer*

Liu Lei¹⁾ Li Yong-Dong^{1)2)†} Wang Rui²⁾ Cui Wan-Zhao²⁾ Liu Chun-Liang¹⁾

1) (Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Science and Technology on Space Microwave Laboratory, Xi'an 710100, China)

(Received 19 July 2012; revised manuscript received 14 August 2012)

Abstract

The corona discharge process in low pressure N_2 in stepped impedance transformer (SIT) is simulated using 3-D particle-in-cell (PIC) software (VORPAL). The evolution of the charged particle spatial distribution during the discharge is obtained. The two main discharge mechanisms, i.e., multipactor and corona discharge, are analyzed. From the simulation results, it can be found that the threshold voltage of breakdown of the SIT first decreases and then increases. In addition, with the increase of the pressure, the multipactor effect weakens while the corona discharge effect strengthens. Through the comparison of the threshold voltages between two kinds of wall materials, i.e., Ag and Cu, the critical pressures between the two discharge mechanisms are achieved.

Keywords: stepped impedance transformer, corona discharge, particle-in-cell simulation

PACS: 52.40.Db, 79.20.Hx, 84.30.Qi

DOI: 10.7498/aps.62.025201

* Project supported by the National Key Laboratory Foundation of China (Grant No. 9140C530103110C5301), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50977076).

† Corresponding author. E-mail: leyond@mail.xjtu.edu.cn