DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.04.007

影响星载微波部件微放电阈值的 Furman 模型研究

张 娜,王 瑞,崔万照

(中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室,西安 710000)

摘 要:星载微波部件的微放电效应是影响航天器微波传输系统独特的瓶颈问题之一。以星载微 波部件微放电阈值仿真中广泛使用的 Furman 模型为研究对象,以平行平板传输线为例,研究并获 得了 Furman 模型中本征二次电子、弹性散射电子、非弹性散射电子 3 类电子的模型参量对微放电 阈值的影响规律,并通过对总二次电子发射系数的影响合理解释了微放电阈值的变化规律,为星 载微波部件微放电阈值的精确仿真提供了规律指导。

关键词:微波部件;微放电;二次电子发射;Furman 模型

中图分类号:0462.2;V443 文献标志码:A 文章编号:1674-7135(2022)04-0058-06

Influence of the Furman model on the multipactor threshold of satellite-borne microwave component

ZHANG Na, WANG Rui, CUI Wanzhao

(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology(Xi'an),Xi'an 710000,China)

Abstract: The multipactor effect of satellite-borne microwave components is one of the unique bottleneck problems affecting the microwave transmission system of spacecraft. Aiming at the Furman model which is widely used in the multipactor analysis and simulation, the influence of the model parameters of three types of electrons, including the true secondary electron, the backscattered electron, and the rediffused electron, on the multipactor threshold are studied with the parallel plate as an example. While the variation trends of multipactor threshold with parameter are also explained reasonably. The paper provides guidance for the accurate simulation of multipactor threshold of satellite-borne microwave component. **Key words**; microwave component; multipactor; secondary electron emission; Furman model

0 引言

太空环境下星载微波部件极易引发二次电子 倍增效应,该效应在航天领域又被称为微放电效 应。星载微波部件一旦发生微放电效应,将导致谐 振类设备失谐、噪声电平抬高、输出功率下降、部件 表面侵蚀,亦是引发低气压放电、无源互调等其它 空间微波特殊效应的重要原因,严重的将影响通信 信道乃至整个微波传输系统彻底失效^[1]。

星载微波部件的微放电效应本质是二次电子 发射引发的倍增过程。因此,对于微放电微观过程 的演化分析以及微放电阈值的精准预测均需要二 次电子发射过程的准确描述。在已有的微放电仿 真分析软件中,如法国达索公司收购的 CST 软件、 西班牙瓦伦西亚理工大学开发的 FEST 3D 和 SPARK 3D^[2]、西安空间无线电技术研究所联合西

收稿日期:2022-04-29; 修回日期:2022-05-20

基金项目:国家自然科学基金(编号:62101434,51827809)

引用格式:张娜,王瑞,崔万照. 影响星载微波部件微放电阈值的 Furman 模型研究[J]. 空间电子技术,2022,19(4):58-63. ZHANG N, WANG R, CUI W Z. Influence of the Furman model on the multipactor threshold of satellite-borne microwave component[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(4):58-63.

安交通大学和东南大学研发的 MEST 软件^[3]等.二 次电子发射模块均采用了 Vaughan 模型^[4]和 Furman 模型^[5]。通常软件中的 Vaughan 模型通过最大 二次电子发射系数以及对应能量调整二次电子发 射系数(secondary electron yield, SEY)曲线,二次电 子能谱(secondary electron spectrum, SES)由伽马概 率密度分布函数的最可几能量决定,由于可调整参 数较少, Vaughan 模型能够很好的描述二次电子发 射特性的整体规律,但是仍然难以完全拟合实验数 据。Furman 模型按照出射电子的类型建立了本征 二次电子、弹性散射电子及非弹性散射电子的 SEY 和 SES 模型,所描述的二次电子发射特性也更加细 致。由于二次电子发射特性对微放电阈值分析的 重要性,诸多研究者一方面持续对二次电子发射模 型改进,以期获得既简便又更好反映实际微波部件 表面的二次电子发射特性,另一方面不断研究模型 参量对微放电阈值的影响,为现有模拟软件采用的 模型参量调整提供指导。游检卫等^[6]对传统 Vaughan 模型进行了理论扩展,补充了二次发射电 子出射能量和出射角度的计算方法。崔万照等^[7] 采用改进的二次电子能谱模型计算了星载微波部 件的微放电阈值,相对于实验结果误差 0.3 dB。Fil 等^[8]研究了 SEY 对镀银的阻抗变换段微放电阈值 的敏感性,为使仿真结果接近实验结果,指出 SEY 曲线的第一交叉点 E_1 和最大能量点 E_{max} 区间必须 要准确。李韵等^[9]通过 MSAT 软件基于 Furman 模 型得到 SEY 的 E_1 值改变 5 eV, 典型微波部件的微 放电阈值将改变一倍的结论。董烨等^[10] 通过 PIC 仿真发现高/低 SEY 情况下微放电的细致物理图像 不同,高 SEY 饱和时更趋向单边放电。Mirmozafari 等^[11]采用半解析的方法改善了平行平板的微放电 敏感区域图的精度,并且指出 SEY 的最大值决定了 电子渡越时间偏离半周期的程度。翟永贵等[12]通 过统计理论计算的平均 SEY 研究了介质加载平行 平板的微放电敏感区域的演化,指出微放电通常发 生在低倍增区域,饱和发生在高倍增区域。本文作 者研究了 Vaughan 模型中能谱参量对微放电阈值的 影响^[13],当二次电子能谱参量 T 增加时,较高能量 的出射二次电子比例增加,微放电阈值降低。

本文基于 Furman 模型,分析了本征二次电子、 弹性散射电子及非弹性散射电子的模型参量对平 行平板微放电阈值的影响,为正确拟合实验数据实 现微放电阈值的精准仿真提供了参考。

1 Furman 二次电子发射模型

Furman 模型中出射电子被分为本征二次电子、 弹性散射电子及非弹性散射电子。下面分别讨论 3 类电子的 SEY 模型。

本征二次电子 SEY 模型:

$$\hat{\delta}(\theta_{\rm in}) = \hat{\delta}_{\rm ts}(E_{\rm in}, 0) \left[1 + t_1 (1 - \cos^{t_2} \theta_{\rm in})\right] \qquad (1)$$

$$\hat{E}(\theta_{\rm in}) = \hat{E}_{\rm ts}(E_{\rm in}, 0) [1 + t_3(1 - \cos^{t_4}\theta_{\rm in})]$$
 (2)

$$\delta_{\rm ts}(E_{\rm in},\theta_{\rm in}) = \hat{\delta}(\theta_{\rm in}) \frac{sE_{\rm in}/E(\theta_{\rm in})}{s-1 + [E_{\rm in}/\hat{E}(\theta_{\rm in})]^s} \quad (3)$$

其中, E_{in} 为入射电子能量, θ_{in} 为入射电子角度, $\hat{\delta}_{is}$ 和 \hat{E}_{ts} 分别为正入射下本征 SEY 的最大值及对应能量, s为调节参数,满足 $s > 1, t_1, t_2, t_3, t_4$ 为入射角度对 本征二次电子 SEY 影响的调整参数。

弹性散射电子 SEY 模型:

$$\delta_{e}(E_{in},0) = P_{1,e}(\infty) + [P_{1,e} - P_{1,e}(\infty)]$$

$$e^{-(|E_{in} - \hat{E}_{e}|/W)P/P} \qquad (4)$$

$$\delta_{e}(E_{in},\theta_{in}) = \delta_{e}(E_{in},0)[1 + e_{1}(1 - \cos^{e_{2}}\theta_{in})] \qquad (5)$$

其中, $\hat{E}_{e,x}\hat{P}_{1,e,x}P_{1,e}(\infty)$ 、W和 p 为弹性散射电子 SEY 曲线的调整参数, e_1,e_2 为入射电子角度对弹性 散射电子 SEY 影响的调整参数。

非弾性散射电子 SEY 模型:

$$\delta_{r}(E_{in},0) = P_{1,r}(\infty) \cdot [1 - e^{-(E_{in}/E_{r})^{r}}]$$
 (6)
 $\delta_{r}(E_{in},\theta_{in}) = \delta_{r}(E_{in},0)[1 + r_{1}(1 - \cos^{r_{2}}\theta_{in})]$ (7)

其中, $P_{1,r}(\infty)$ 、r、 E_r 为非弹性散射电子 SEY 曲线的 调整参数, r_1 、 r_2 为入射电子角度对非弹性散射电子 SEY 影响的调整参数。

2 Furman 模型参量对微放电阈值的 影响

按照 Furman 模型中电子的分类方法,下面分别 讨论本征二次电子、弹性散射以及非弹性散射模型 参量对微放电阈值的影响规律。在研究 SEY 对微 放电阈值影响规律时,首先保证 SES 参量保持相 同,设定 SES 模型中的调整参量为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \cdots = \varepsilon_{10}$ = 2.5、 $p_1 = p_2 = \cdots = p_{10} = 1.8$ 、 $\sigma_e = 2$ 、q = 0.5。在研 究各类散射电子参量对微放电的影响时,未涉及到 的散射电子参量按照表1给出的参数决定,图1给 出了未改变模型参量时的 SEY 曲线。本文中采用 了多粒子 - 多碰撞的蒙特卡罗微放电阈值方法^[14] 计算微放电阈值,计算时所采用的部件模型是工作 频率1.06 GHz、间隙1mm 的平行平板,平行平板的 微放电阈值采用阈值电压 V_u表示。

表 1 Furman 模型的 SEY 参量取值 Tab. 1 SEY parameter values of Furman model

rubti bili purumeter turues or rummun mouer					
参量	取值	参量	取值	参量	取值
$\hat{\delta}_{ ext{ts}}$	2.22	$\hat{P}_{1,\mathrm{e}}$	0.05	W	60.86
$\hat{E}_{ ext{ts}}$	165	$P_{1,\mathrm{e}}(\boldsymbol{\infty})$	0.02	р	1.0
\$	1.32	$\hat{E}_{ m e}$	0.0	e_1	0.26
t_1	0.66	q	0.5	e_2	2.0
t_2	0.8	r	0.104	$\sigma_{\scriptscriptstyle ext{e}}$	2.0
t_3	0.7	r_1	0.26	$P_{1,\mathbf{r}}(\boldsymbol{\infty})$	0.01
t_4	1.00	r_2	2.0	$E_{ m r}$	0.041







2.1 本征二次电子参量的影响

图 2 给出了正入射条件下本征二次电子发射 系数与入射能量的关系。当 $\theta_{in} = 0$ 时,正入射下的 本征二次电子 $\delta_{ts}(E_{in}, 0)$,其由参量 $s \, \hat{E}_{ts} \pi \, \hat{\delta}_{ts}$ 决定。 $\hat{\delta}_{ts}$ 决定了正入射时本征 SEY 所能够达到的最大值, $\hat{E}_{ts} \pi \, \hat{\delta}_{ts}$ 对应了该最大值所对应的电子能量,s 越小, $\hat{\delta}_{ts}$ 在最大值之前上升的越快,在最大值之后下降的 越慢,反之,s 越大 $\hat{\delta}_{ts}$ 在最大值之前上升的越慢,在 最大值之后下降的越快。





图 3 给出了本征二次电子参量对微放电阈值 的影响。从图中可以看出,随着参量 $s \ n \hat{E}_{is}$ 增大, $\hat{\delta}_{is}$ 减小,微放电阈值增大。本征二次电子参量 s决 定了本征二次电子发射系数的曲线形状,当 \hat{E}_{is} 和 $\hat{\delta}_{is}$ 确定时,除在 \hat{E}_{is} 能量点对应的 SEY 相同以外,相同 E_{in} 下,s 越大,SEY 越小,s 越小,SEY 越大,因而随着 s 增大,微放电阈值增大。参量 $\hat{\delta}_{is}$ 决定了正入射时 SEY 所能够达到的最大值, $\hat{\delta}_{is}$ 越大,SEY 越大,因而 微放电阈值越小。 \hat{E}_{is} 对应了正入射时 SEY 达到最 大值时所对应的电子能量,当 $s \ n \hat{\delta}_{is}$ 相同时, \hat{E}_{is} 越 大,SEY 上升到最大值时越缓慢,因而电子能量较 小时,SEY 越小,电子能量较大时,SEY 越大,由于 发生微放电时,碰撞电子的能量多集中在低能量区 间,在此区间内 \hat{E}_{is} 越大,SEY 越小,因而微放电阈值 越高。



图 3 正入射时本征二次电子参量对微放电阈值的影响 Fig. 3 The relationship between the parameters of the true electron secondary of vertical incidence and the multipactor threshold

图4给出了斜入射的二次电子参量对微放电阈 值的影响规律。由式(1)和式(2)可以看出, $\hat{\delta}_{is}$ 和 \hat{E}_{is} 分别是关于 t_1 和 t_2 、 t_3 和 t_4 增函数,由式(3)得到 δ_{is} 是关于 $\hat{\delta}_{is}$ 的增函数,因此,图4中随着 t_1 和 t_2 增 加,微放电阈值减小。 \hat{E}_{is} 决定了本征SEY最大值对 应的入射能量点,当其增大时,微放电阈值将升高, 与图4中趋势一致。后续弹性背散射 e_1 和 e_2 、非弹 性背散射斜入射参数 r_1 和 r_2 ,与 t_1 和 t_2 对本征SEY 的影响趋势是一致的,可参照后面正入射时 δ_e 和 δ_r 对微放电的影响进行分析,将不再赘述。



图 4 斜入射时本征二次电子参量对微放电阈值的影响 Fig. 4 The relationship between the parameters of the true electron secondary of oblique incidence and the multipactor threshold

2.2 弹性散射电子参量的影响

图 5 给出了正入射条件下弹性散射电子发射 系数与入射能量的关系。从图中看出, $\hat{P}_{1,e}$ 和 $P_{1,e}$ (∞)分别决定了较低和较高 E_{in} 下 δ_e 所能达到的两 个极值。参量 \hat{E}_e 代表了 δ_e 达到 $\hat{P}_{1,e}$ 时的电子能量, $\hat{E}_e = 0$ 时, δ_e 随着 E_{in} 增大单调减小,而 $\hat{E}_e \neq 0$ 时, δ_e 随着 E_{in} 呈现先增后减($\hat{P}_{1,e} > P_{1,e}(\infty)$)或者先减后 增($\hat{P}_{1,e} < P_{1,e}(\infty)$)的趋势。W 和 p 决定了达到 $\hat{P}_{1,e}$ 和 $P_{1,e}(\infty)$ 两个极值的速度快慢,W 和 p 越大, 以 \hat{E}_e 为峰尖的峰宽度越宽,相同 E_{in} 下 SEY 越大。

图 6 给出了弹性散射电子参量对微放电阈值 的影响关系。由于 $\hat{P}_{1,e}$ 和 $P_{1,e}(\infty)$ 分别决定了较低 和较高 E_{in} 下 δ_e 所能达到的两个极值,因此,在其它 参数保持相同的前提下, $\hat{P}_{1,e}$ 和 $P_{1,e}(\infty)$ 增大, δ_e 增 大,总的 SEY 增大,微放电阈值降低。W 和 p 越大, 以 \hat{E}_e 为峰尖的峰宽度越宽,相同 E_{in} 下 SEY 越大, 微放电阈值越低。参量 \hat{E}_e 代表了 δ_e 达到 $\hat{P}_{1,e}$ 时的 电子能量,在 $\hat{E}_e = 0$ 时, δ_e 随着 E_{in} 增大单调减小,而 $\hat{E}_e \neq 0$ 时, δ_e 随 E_{in} 的变化关系不再单调变化。以 $\hat{P}_{1,e}$ > $P_{1,e}(\infty)$ 为例,在 \hat{E}_e 较小时,随着 \hat{E}_e 的增大,低能 区的 SEY,特别是 E_1 附近(20 eV 附近),呈现了 SEY 逐渐增大的趋势,因而微放电阈值减小,当 \hat{E}_e 较大 时,在 $E_p = \hat{E}_e$ 附近 SEY 相对较大,而低能区的 SEY 反而较低,由于低能区的 SEY 对微放电影响更大,因 此,随着 \hat{E}_e 的增大,微放电阈值反而升高。



图 5 正入射时弹性散射电子参量对 δ_{e} 的影响

Fig. 5 The relationship between the parameters of the backscattered electron and δ_{e} at vertical incidence





2.3 非弹性散射电子参量的影响

图 7 给出了正入射条件下非弹性散射电子发射 系数与入射能量的关系,图 8 给出了 Furman 模型中 影响 δ_r 的参量对微放电的影响规律。 $P_{1,r}(\infty)$ 是正 入射时非弹性散射 SEY 的最大值, $P_{1,r}(\infty)$ 越大, SEY 越大, 微放电阈值电压越小。同时, 从图中可 以看出, 当 $P_{1,r}(\infty)$ 较小时, 参数 E_r 和 r 的变化对 微放电阈值的影响越小。r 决定了非弹性背散射 SEY 达到最大值的速度越快, r 越大, 到达最大非弹 性 SEY 的速度越快, r 越小, E_{in} 较低的电子所占比 例越大。因此, 微放电阈值相对较高, 当 r 超过一定 数值, SEY 的差异仅在数 eV 之间, 此时微放电的阈 值受到 r 的影响就变得很弱了。 E_r 同样影响了非弹 性散射 SEY 到达最大值的快慢, 与 r 相反, E_r 越大, 达到最大非弹性 SEY 的速度越慢, 在未达到最大非 弹性散射 SEY 之前, 相同 E_{in} 下, E_r 越小, SEY 越大, 因而微放电阈值越低。此外, 决定非弹性背散射 SEY 的影响相对更大。



图7 正入射时非弹性散射电子参量对 δ_r 的影响





3 结论

微放电阈值分析软件中广泛采用 Furman 模型

描述电子与材料的相互作用过程。本文分析了Furman 模型中二次电子发射参量对微放电阈值的影响 关系,以双平板结构为例,分别获得了本征二次电 子参量、弹性散射电子参量、非弹性散射电子参量 下的微放电阈值规律,并且通过模型参量对SEY的 影响解释了微放电阈值的变化规律,为星载微波部 件的微放电准确分析提供了规律指导。后续可进 一步研究实验数据拟合Furman 模型参量的规律。

参考文献:

- [1] 王新波,白鹤,李韵,等. 星载微波部件介质微放电理论
 研究现状及发展趋势[J]. 空间电子技术,2019,16(6):
 1-9.
- [2] VICENTE C. Multipactor and corona discharge: Theoretical fundamentals and analysis with CST and SPARK3D software tools [C]//2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity, 2017:1-48.
- [3] 崔万照,李韵,张洪太,等. 航天器微波部件微放电分析 及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2019.
- [4] VAUGHAN J R M. A new formula for secondary emission yield[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1989, 36(9):1963-1967.
- [5] FURMAN M A, PIVI M T F. Erratum: Probabilistic model for the simulation of secondary electron emission [J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2013,16(6):069901.
- [6] 游检卫,张剑锋,李韵,等. Vaughan 二次电子发射模型 的深入研究与拓展[J].强激光与粒子束,2013,25 (11):3035-3039.
- [7] CUI W Z,ZHANG H, LI Y, et al. An improved secondary electrons energy spectrum model and its application in multipactor discharge [J]. Chinese Physics B, 2018, 27 (3):038401.
- [8] FIL N, BELHAJ M, HILLAIRET J, et al. Multipactor threshold sensitivity to total electron emission yield in parallelplate waveguide and TEEY models accuracy[J]. 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2016: 1-4.
- [9] LI Y, CUI W Z, WANG H G. Simulation investigation of multipactor in metal components for space application with an improved secondary emission model [J]. Physics of Plasmas, 2015, 22(5):053108.
- [10] 董烨,刘庆想,庞健,等.材料二次电子产额对腔体双边二次电子倍增的影响[J].物理学报,2018,67
 (3):037901.

- [11] MIRMOZAFARI M, BEHDAD N, BOOSKE J H. Calculating multipactor susceptibility chart using a semi-analytic approach with improved accuracy[J]. Physics of Plasmas, 2020,27(11):113510.
- [12] ZHAI Y G, WANG H G, LI Y D, et al. A combined susceptibility diagram including the average secondary emission yield on the dielectric surface [J]. IEEE Mi-

crowave and Wireless Components Letters, 2021, 31 (2):137-140.

- [13] 张娜,崔万照,王瑞,等. Vaughan 模型二次电子能谱对 空间微波部件微放电效应的影响分析[J]. 空间电子技 术,2021,18(2):23-26.
- [14] 张娜. 表面形貌和气体吸附对金属二次电子发射特性的影响研究[D]. 西安:西安交通大学,2019, 89-93.
- 作者简介:张娜(1984-),陕西汉中人,博士,高级工程师。主要研究方向为空间微波特殊效应。E-mail:zhangna_xjtu@163.com 通讯作者:崔万照(1975-),山东高密人,博士,研究员。中国空间技术研究院首席研究员、航天科技集团公司卫星通信方向学 术技术带头人、陕西省高层次人才特殊支持计划专家、入选国防高层次人才、国务院政府特殊津贴获得者、南京航空 航天大学兼职博导、西安交通大学、天津大学、四川大学、浙江大学兼职教授,发表学术论文 200 余篇,出版专著/译著 多部。主要研究方向为空间微波技术。E-mail:cuiwanzhao@126.com

欢迎订阅《空间电子技术》

《空间电子技术》创刊于1971年,由中国航天科技集团有限公司西安空间无线电技术研究所主办,国内 公开发行,双月刊。

本刊内容涵盖卫星通信、微波遥感、天线及其展开技术、卫星测控、数据传输与处理、电磁环境与可靠 性、计算机应用、航天工艺及材料、空间站与载人航天、深空探测等空间电子学领域及其交叉学科。凡在理 论与应用实践上具有创新的,代表我国最新空间电子学科技研究水平的学术论文、有科学依据和可靠数据 的技术报告、阶段性成果报告以及属于前沿学科并对学科发展有指导意义的展望评论性文稿均可投稿。

本刊被中国核心期刊遴选数据库、中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)、中国期刊全文数据库 (CJFD)、中文科技期刊数据库(CSTJ)全文收录,已被"万方数据"、"中国知网"即《中国学术期刊(光盘版)》 以及《中文科技期刊数据库》(维普)、超星网络等平台全网搜索。本刊国内外公开发行。

《空间电子技术》为双月刊,A4开本,彩色印刷,定价:每期12.00元、全年72.00元。 联系电话:029-85613384,传真:029-85613222,E-mail:kjdzjs504@163.com。 通信地址:西安市东长安街504号《空间电子技术》编辑部,邮编:710000。