

文章编号: 1001-4322(2006)10-1699-03

空间电荷效应对阴极微凸起热不稳定性的影响*

孙 钧^{1,2}, 刘国治², 林郁正¹

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘 要: 由于金属微凸起爆炸电子发射的预发射电流密度一般都超过 10^8 A/cm², 因此必须考虑其空间电荷效应的影响。基于金属微凸起爆炸电子发射起始过程模型, 通过理论分析和数值模拟, 给出了考虑预发射电流空间电荷效应的微凸起爆炸发射延迟时间随二极管平均电场的变化关系。与不考虑预发射电流空间电荷效应的结果进行对比表明, 预发射电流的空间电荷效应可以显著增加金属微凸起的爆炸发射延迟时间。

关键词: 微凸起; 爆炸电子发射; 预发射电流; 空间电荷效应

中图分类号: O531; O462 **文献标识码:** A

目前的实验与理论研究均表明: 爆炸电子发射是通过阴极等离子体的形成和扩散过程实现的^[1-4]。金属微凸起模型是描述爆炸电子发射起始过程的主要模型之一, 该模型认为阴极等离子体的形成是阴极表面金属微凸起在预发射电流作用下热不稳定性发展的结果。基于该模型, 文献中已经给出了许多针对爆炸电子发射起始过程的模拟结果, 在部分模拟结果中给出了爆炸发射延迟时间与阴极表面电场的关系^[5-9]。在金属微凸起模型中, 由于空间电荷效应可以显著影响金属微凸起表面的电场和预发射电流的大小, 因而可能会对金属微凸起的热不稳定性发展过程有根本的影响^[10]。本文通过理论分析与数值模拟, 评价了金属微凸起预发射电流空间电荷效应对爆炸电子发射起始过程的影响。

1 金属微凸起模型

在金属微凸起模型中, 预发射电流是金属微凸起的增强热场致发射电流。金属微凸起在预发射电流作用下的能量平衡包括 4 个主要的热过程: 预发射电流的焦耳加热、诺廷汉效应、热传导和辐射散热^[1-3]。理论分析表明^[2-3], 辐射散热过程在分析微凸起的能量平衡过程时可以忽略。在金属场致电子发射过程中, 当电流密度超过 5×10^7 A/cm² 时, 就必须考虑空间电荷效应对发射的影响^[2, 10]。而对爆炸电子发射过程来说, 微凸起的预发射电流密度一般超过 10^8 A/cm²^[2-3]。这就意味着研究爆炸电子发射起始过程的金属微凸起模型时, 必须考虑预发射电流空间电荷效应的影响。但是由于金属微凸起结构及附近电场分布的复杂性, 从理论上对预发射电流的空间电荷效应进行详尽的分析是比较困难的。文献^[1-9]对金属微凸起模型进行理论分析和数值模拟时均忽略了预发射电流的空间电荷效应的影响。为了揭示该影响, 我们首先建立了爆炸电子发射起始过程的 1 维金属微凸起热不稳定性发展过程模型, 然后在此基础上通过模拟, 考察了预发射电流的空间电荷效应对金属微凸起附近电场及其热不稳定性发展过程的影响。

2 微凸起热不稳定性发展过程模拟

本计算是针对无限大平板二极管阴极表面上的一个圆台状微凸起进行^[5, 11]。阴极材料为铜, 微凸起结构如图 1 所示。该模型是阴极表面上最常见的锥状球头微凸起的简化模型, 较圆柱形微凸起模型有更好的物理近似。模拟中所用微点的高度 $L = 10 \mu\text{m}$, 顶端半径 $R = 0.1 \mu\text{m}$, 半锥角 $\theta/2 = 10^\circ$; 其电场增强因子取为 $\beta = 66$ ^[12], 和实验得到的电场增强因子在同一尺度上^[1-4]。设二极管内平均电场为 \bar{F} , 则微凸起附近的电场为 $\beta\bar{F}$ 。由于在模拟计算中, 金属微凸起的温度变化范围较大, 阴极材料的热容、热导率、电阻率和密度等

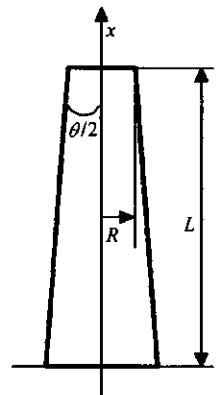


Fig. 1 Microprotrusion sketch
图 1 微凸起结构示意图

* 收稿日期: 2006-03-21; 修订日期: 2006-08-09

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 孙 钧(1978—), 男, 硕士, 从事高功率微波技术与强流电子束物理研究; sunjun@tsinghua.org.cn.

会随着温度的改变而变化。在模拟中,材料参数随温度的变化通过对文献[15]的数据进行插值得到。

2.1 热平衡方程

对图 1 中的微凸起,假设其侧面没有电流发射,而且在微凸起的每一个横截面上,电流均匀分布,则可以得到 1 维的热平衡方程为

$$\rho AC \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial qA}{\partial x} + \rho_c A \left(\frac{jA_L}{A} \right)^2 \tag{1}$$

式中: ρ 是阴极材料的密度; C 和 ρ_c 分别是热容和电阻率; A, A_L 分别是微凸起的截面积和顶端面积; j 为热场致发射电流密度。热流密度为

$$q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{jA_L}{eA} E_F \tag{2}$$

式中: κ 是热导率; E_F 是费米能级; e 为电子电量。

方程的边界条件和初始条件分别为

$$T |_{x=0} = T_0, \quad q |_{x=L} = \frac{j}{e} E_a, \quad T |_{t=0} = T_0 \tag{3}$$

式中: T_0 是阴极表面的温度; E_a 是平均每个发射电子带走的能量。

2.2 热场致发射电流及诺廷汉效应

在微凸起的热不稳定性发展模拟过程中,计算涉及的温度范围较大,预发射电流将由最初的热场致发射电流发展为热场致发射电流。因此,采用统一的金属热场致发射公式^[13]

$$j = e \int_{-W_a}^{\infty} P_W(W, T, F, E_F) dW \tag{4}$$

式中: F 是微凸起表面电场; W 是每个发射电子的法向能量; $-W_a$ 是金属导带底能级; $P_W dW$ 表示单位时间、单位面积上发射出的法向能量在 $W \sim W + dW$ 之间的电子数。

每个电子带走的平均能量可以表示为^[14]

$$E_a = \frac{e}{j} \int_{-W_a}^{\infty} E_t P_E(E_t, T, F, E_F) dE_t \tag{5}$$

式中: E_t 是每个发射电子的总能量; $P_E dE_t$ 表示单位时间、单位面积上发射的能量在 $E_t \sim E_t + dE_t$ 之间的电子数。

由于发射电子的平均能量 E_a 与费米能量 E_F 的不同而引起的对阴极的加热或冷却效应,称为诺廷汉效应,其对微凸起的热过程有重要的影响^[2-4]。

2.3 预发射电流的空间电荷效应

由于金属微凸起附近电场及电流分布的复杂性,在本模拟中,采用理论分析和数值计算相结合方法来分析预发射电流空间电荷效应的影响,计算模型如图 2 所示^[11]。假设预发射电流的电子束为圆锥状,并假设锥角为 $\pi/2$,电流在截面内均匀分布。建立以 A 点为坐标原点的坐标系,假设电子的运动只受外部电场的影响,取原点 A 处的预发射电流的空间电荷场作为预发射电流在微凸起表面的空间电荷场,有

$$F^* = \frac{1}{2\epsilon_0} \int_{z_1}^{z_2} \rho_s (1 - \sqrt{2}/2) dz \tag{6}$$

式中: ρ_s 是空间电荷的密度,可以据微凸起顶端附近的电场分布求出; z_1, z_2 分别是微凸起顶端与二极管阳极的坐标。以 $F = \beta\bar{F} - F^*$ 作为微凸起表面的实际电场代入式(4)和式(5),就可以计算得到考虑了预发射电流的空间电荷效应后的微凸起的热场致发射电流。而如果以 $F = \beta\bar{F}$ 作为微凸起表面的电场,则可以给出不考虑预发射电流空间电荷效应影响的微凸起的热场致发射电流。

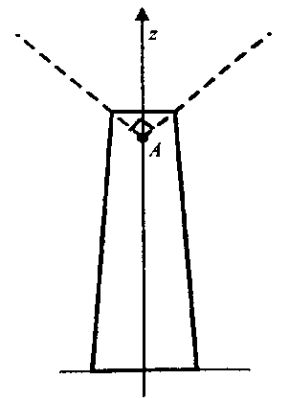


Fig. 2 Model of space charge effect
图 2 空间电荷效应计算示意图

3 计算结果及其分析

假设当微凸起上任意一点的温度达到阴极材料的熔点,爆炸电子发射开始^[2-5,11]。从电压施加时刻到爆炸电子发射起始时刻的时间延迟定义为爆炸发射延迟时间 t_d 。使用有限差分法对能量平衡方程式(1)及相应边

界条件和初始条件式(3)构成的定解问题进行求解,可以得到爆炸发射延迟时间随二极管平均电场的变化关系。

图 3 给出了计算得到的爆炸延迟时间 t_d 随外加二极管平均电场 \bar{F} 的变化关系曲线。从图中可以看出,在相同的二极管平均电场下,考虑预发射电流的空间电荷效应的影响会显著延长金属微凸起的爆炸发射延迟时间。

4 结 论

本文在金属微凸起模型的基础上,对爆炸电子发射起始过程进行了模拟,分别给出了考虑预发射电流空间电荷效应与不考虑空间电荷效应的爆炸发射延迟时间与二极管平均电场的关系。研究表明在研究爆炸电子发射起始的金属微凸起模型时,预发射电流的空间电荷效应是客观存在的,其影响不可忽略。忽略预发射电流的空间电荷效应将严重低估金属微凸起的爆炸电子发射的延迟时间。

参考文献:

- [1] Miller R B. An introduction to the physics of intense charged particle beams[M]. New York: Plenum Press, 1982.
- [2] Mesyats G A, Proskurovsky D I. Pulsed electrical discharge in vacuum[M]. Berlin/New York: Springer, 1989.
- [3] Mesyats G A. Explosive electron emission[M]. Ekaterinburg: URO-Press, 1998.
- [4] Latham R V. High voltage vacuum insulation-basic concepts and technological practice[M]. London/New York: Academic Press, 1995.
- [5] Rossetti P, Paganucci F, Andrenucci M. Numerical model of thermoelectric phenomena leading to cathode-spot ignition[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2002, **30**:1561-1567.
- [6] Fursey G N. Field emission and vacuum breakdown[J]. *IEEE Trans Elect Insul*, 1985, **20**:659-670.
- [7] Litvinov E A, Mesyats G A, Shubin A F. Calculation of the thermal field emission preceding the explosion of microemitters caused by field-emission pulses[J]. *Sov Phys J*, 1970, **13**:537-540.
- [8] Litvinov E A, Shubin A F. Cathodic initiation of breakdown in vacuum under a constant voltage[J]. *Sov Phys J*, 1974, **17**:1549-1552.
- [9] Litvinov E A. Theory of the explosive electron emission[J]. *IEEE Trans Elect Insul*, 1985, **20**:683-689.
- [10] Barbour J P, Dolan W W, Trolan J K, et al. Space-charge effects in field emission[J]. *Phys Rev*, 1953, **92**(1):45-51.
- [11] Sun J, Liu G Z. Numerical modeling of thermal response of thermofield electron emission leading to explosive electron emission[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2005, **33**(5):1487-1490.
- [12] 孙钧, 刘国治, 林郁正, 等. 阴极金属微凸起电场增强因子数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(8):1183-1186. (Sun J, Liu G Z, Lin Y Z, et al. Numerical simulation of electric field enhancement factor of metallic microprotrusion. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(8):1183-1186)
- [13] Murphy E L, Good J R H. Thermionic emission, field emission, and the transition region[J]. *Phys Rev*, 1956, **102**(6):1464-1473.
- [14] Paulini J. Thermo-field emission and the Nottingham effect[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1993, **26**:1310-1315.
- [15] Buch A. Pure metals properties-a scientific-technical handbook[M]. ASM International and Freund Publishing House Ltd, 1999.

Influence of space charge effect on thermal instability of cathode microprotrusion

SUN Jun^{1,2}, LIU Guo-zhi², LIN Yu-zheng¹

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69, Xi'an 710024, China)

Abstract: Due to the high density of the prebreakdown current of explosive electron emission, the space charge effect should be considered in the simulation of the initial thermal instability of explosive electron emission. Based on the metallic microprotrusion model of explosive electron emission, a model dealing with the space charge effect is presented. The simulation results show that the space charge effect could greatly lengthen the delay time of explosive electron emission. According to the simulation, the thermal instability process is strongly affected by the space charge effect of prebreakdown current. The space charge effect of prebreakdown current should not be neglected in the analysis of microprotrusion model of explosive electron emission.

Key words: Microprotrusion; Explosive electron emission; Prebreakdown current; Space charge effect

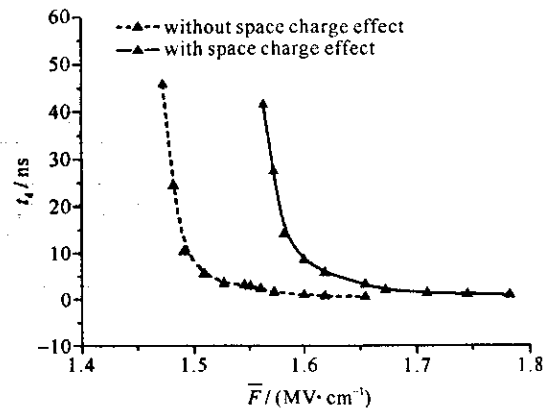


Fig. 3 Delay time vs average diode electric field

图 3 爆炸发射延迟时间随二极管平均电场的变化