

爆炸式发射二极管的粒子模拟研究

刘大刚, 祝大军, 刘盛纲

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】分析了爆炸式发射的物理机理, 在二维Yee网格模型的基础上推导出了爆炸式发射的发射条件及逃离阴极表面的粒子电荷的计算公式, 讨论了在程序中如何用唯相的方法来描述爆炸式发射的二维粒子模拟实现过程, 并以向内发射同轴二极管为例从其电流电压关系及电子束运动特性方面验证了模拟的正确性。

关键词 爆炸式发射; 二极管; 粒子模拟; 击穿

中图分类号 O462.4 文献标识码 A

Study of Particle-in-Cell Simulation for Explosive Emission Diode

LIU Da-gang, ZHU Da-jun, LIU Sheng-gang

(School of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The physical mechanism of explosive emission was analyzed. The conditions of emission and the formula to calculate the charge that would be drawn away from the cathode surface were deduced based on the Yee model. Especially, discuss how to use the way of phenomenological description to realize particle-in-cell simulation in two-dimensional of explosive emission. Inward-emitting coaxial diode was used as an example to validate the corrections of simulation from current-voltage correlation and characteristic of electron beam movement.

Key words explosive-emission; diode; particle-in-cell simulation; breakdown

由于高速度大容量计算机的飞速发展, 扩大了等离子体粒子模拟的研究和应用范围, 缩短了研究模拟的周期, 从而使得等离子体粒子模拟方法在可控热核聚变、空间物理、自由电子激光和一般等离子体问题的研究中, 得到了广泛的应用。在国外, 已经研制出象MAGIC、KARAT、MAFIA等一些比较成熟的粒子模拟软件, 它们在粒子研究中起到了重要作用。而在国内, 由于起步比较晚, 现在还没有一款与国外相媲美的软件。但是从许多方面因素来考虑, 研究出我国自主知识产权的粒子模拟软件又是势在必行的。本文以二极管为例对粒子模拟的一个重要部分——爆炸式发射模块作一些探讨和研究。

1 爆炸式发射粒子模拟的物理模型

1.1 爆炸式发射粒子模拟的二维Yee网格模型

图1所示是爆炸式发射粒子模拟所用的二维模型, 其中

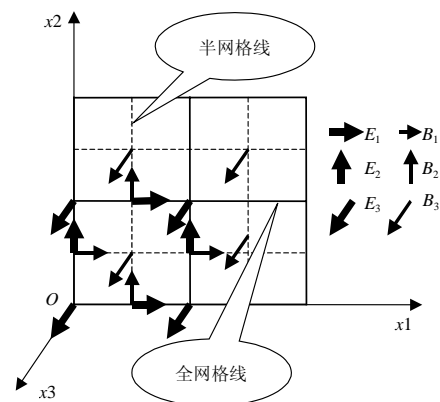


图1 CHIPIC二维模拟模型

收稿日期: 2004-12-23

基金项目: 国家863高技术计划资助项目(2004AA832101)

作者简介: 刘大刚(1973-), 男, 硕士, 助教, 主要从事高功率微波器件粒子模拟方面的研究。

E_1 、 E_2 、 E_3 代表沿三个坐标方向电场矢量, B_1 、 B_2 、 B_3 代表沿三个坐标方向磁场矢量。在这一模型中依据坐标方向的不同将磁场和电场放在全网格点或半网格点上, 这样就实现了每一个磁场矢量都由四个电场矢量环绕, 而每个电场矢量也都由四个磁场矢量环绕的二维Yee网格模型。

1.2 爆炸式发射模拟机理

爆炸式发射模拟的基础是对材料表面等离子体形成所作的一种特殊模拟。它的机理为: 几乎任何材料的表面都呈现有一些微小的突出部, 或者称作“须状物”。当这些须状物暴露在一定高电压下时, 其上的导电场的增强能导致强场发射。随后这些须状物就会因焦耳加热而消散, 同时材料表面将形成等离子体。这些表面的等离子体将在周围电场影响下产生代表性的粒子“发射”, 而这些粒子的类型(从等离子体中提取)将由场的正负决定。

1.3 爆炸式发射模拟

在图1所示模型的基础上, 爆炸式发射模拟模型很大程度上忽视了等离子体形成过程中的物理上的细节, 而依靠现象来描述它。然而, 粒子发射其本身是以物理学的“Child”定律为依据的, 特别地, 假定常规电场在等离子体表面等于零。

在用现象来描述等离子体形成的处理中, 设 E_c 是一个特定网格的半网格上的常规定向场, E_t 是特定的击穿场阈值, 规定只有当 $E_c > E_t$ 时击穿才能发生。如果某一网格上击穿发生, 则这个网格就叫做“击穿网格”, 且这个判定过程在发射物体表面的每个网格上连续不断的进行着。在每个击穿网格击穿时记录它击穿时的时间, 这样一来每个网格都有它自己的历史记录而且都被独立的处理。图2所示是一个爆炸式发射二极管模拟结构的横向剖面图, 它的阴极发射表面划分为两个网格 C_1 和 C_2 , E_{C1} 是 C_1 半网格上的常规定向场, E_{C2} 是 C_2 半网格上的常规定向场, t_b 是当前的模拟时间。按上述规则, 首先判断 E_{C1} 是否大于 E_t , 如果 E_{C1} 大于 E_t 那么 C_1 网格就叫做击穿网格, 且在数组里记录下 t_b ; 然后再按上述过程同样处理 C_2 网格。

一旦因击穿而触发, 在一个网格里等离子体的形成假设为不可逆的。然而, 这时网格并不会就立即变得完全有效, 因为物理现象上观察到的阴极表面等离子体的形成是一个渐进的过程, 所以指定了等离子体形成率因子 $f(t-t_b)$ 来描述这一个渐进过程。这样一来, 网格的效力成为根据指定的形成率因子由零开始增长的, 从而使网格上等离子体的形成符合了从物理现象上观察到的阴极表面等离子体形成过程。

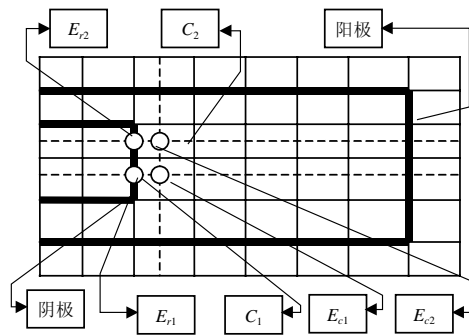


图2 二极管纵向剖面图

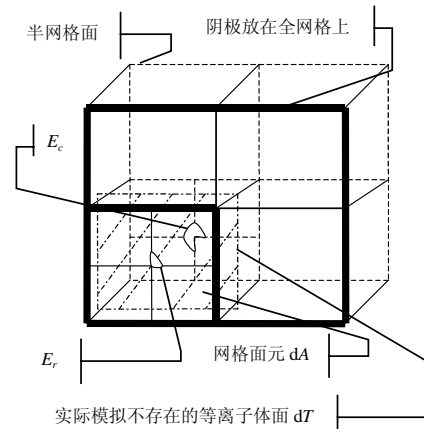


图3 二极管阴极横向剖面图

在处理等离子体的形成过程中, 由于只是用现象来描述这一过程, 所以并没有用粒子实际产生一个表面等离子体。对于那些逃离阴极表面的电荷我们用现象学的模式和高斯定理来计算它, 这样在周围电场的影响下一个击穿的网格就会“发射”带电粒子了。如果场是负的, 则将会发射电子; 如果场是正的, 则将会发射质子(或者是阳离子)。图3所示是图2中二极管阴极的横向剖面图, 根据介质中的高斯公式^[6]:

$$\oint_A D \times dA = \sum q \quad (1)$$

可推导出逃离假想的等离子体面元 dT 的电荷 dq 和网格面元 dA 的比值与半网格上的常规定向场 E_c 、阴极表面剩余场 E_r 、等离子体形成率 $f(t-t_b)$ (注意它是随 t_b 而变的), 表面现有电荷密度 ρ (它表示所有种类的流入和流出的粒子数)之间的关系为:

$$\frac{dq}{dA} = \epsilon_0 f(t-t_b)(E_c - E_r) - \rho \quad (2)$$

如果所指定的 q_m 不为零 (最小粒子所带电荷), 那么式(2)计算出的 dq 还必须满足以下条件:

$$dq = \begin{cases} n \times q_m, n = \text{int}(dq/q_m) \dots |dq| \geq q_m \\ 0 \dots |dq| < q_m \end{cases} \quad (3)$$

式中 dq 如果大于 q_m , 那么 dq 就转换成 q_m 的整数倍; dq 如果小于 q_m , 那么 dq 就等于零。

2 模拟结果比较

以一个同轴二极管作为实例进行了爆炸式发射模拟, 所使用的向内发射同轴型二极管的示意图如图 4 所示。它具有同轴放置、环状结构的阴极和阳极。

2.1 电子束束流特性的模拟比较

实验得出的向内发射同轴二极管的电子束运动特性为^[1]:

- 1) 当电压未能超过阈值时, 将不发射电子;
- 2) 当电压超过阈值并且不是很大时将发射均匀运动的电子束;
- 3) 当电压升高到一定量值后, 电子束在中性等离子体中传输时, 由于受到自身产生磁场的作用, 束电子将偏转一定角度从而导致束截面从均匀过渡到非均匀;
- 4) 当束流达到一定强度, 电子束到达阳极时将缩箍成一点, 形成自箍缩现象;
- 5) 当电压继续升高到一定量级后, 电子束运动会呈现顺电势流状态。为了验证模拟结果与实验结果是否一致, 在不同的二极管间隙电压下作了一系列模拟, 如图 5 所示。

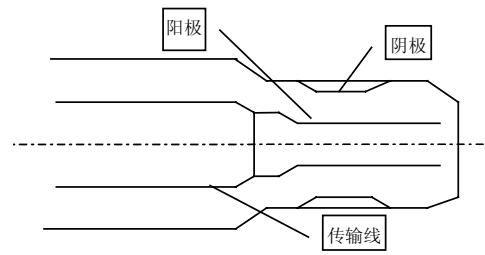


图4 向内发射同轴二极管示意图

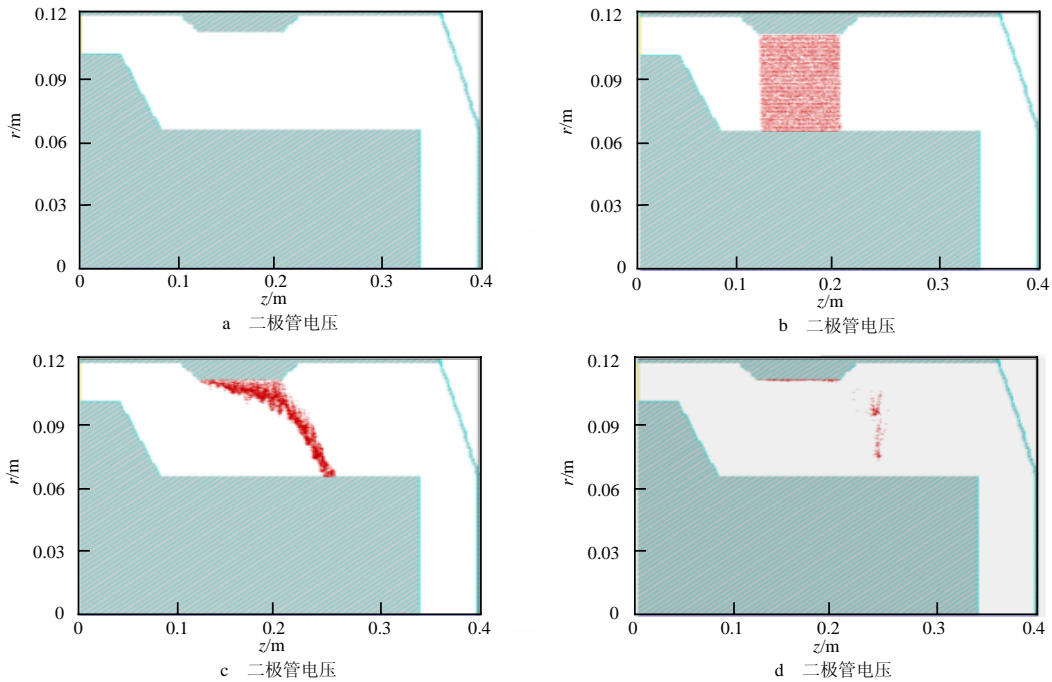


图5 二极管电压电子束运动图

从图 5 中可得到: 1) 当二极管电压 $V_0 = 3.5 \text{ kV}$ 小于阈值电压时, 二极管没有粒子束产生; 2) 当 $V_0 = 35 \text{ kV}$ 时二极管击穿产生均匀粒子束; 3) 当 $V_0 = 30 \text{ MV}$ 时二电子束运动出现自箍束状态; 4) 当 $V_0 = 70 \text{ MV}$ 时电子

束运动出现顺电势流状态。以上电子束随电压的升高,从无发射到均匀到自箍束最后过渡到顺电势流状态的过程正好符合试验分析得到的向内发射同轴二极管随电压升高束流的变化特性。

2.2 模拟与理论的伏安特性比较

据间隙电压的不同可将向内发射同轴二极管分为3种不同的情况来讨论^[1]:

1) 二极管间隙电压 V_0 大于阈值电压 V_{thr} 小于500 kV时,是非相对论情况。2) 二极管间隙电压大于500 kV小于5 MV时,是相对论情况。3) 二极管间隙电压 V_0 大于等于5 MV时,是强相对论情况。

表1所示给出了三种情形下模拟得到的阴阳极间电流与馈入电压之间的关系。从1中的伏安特性可看出当电压超过阈值电压后阴阳极间电压和电流是成正比的,这正好符合二极管伏安特性。

表1 馈入电压与模拟电压关系表

馈入电压 V_t /kV	模拟阴阳极电压 I_{ac} /kA	馈入电压 V_t /kV	模拟阴阳极电压 I_{ac} /kA	馈入电压 V_t /kV	模拟阴阳极电压 I_{ac} /kA
0	0	1 000	85	6 000	392
1	0	2 000	155	8 000	505
2	0	3 000	215	10 000	625
3	0	4 000	276	12 000	715
5	0.26	4 500	300	14 000	825
15	1.38	4 600	306	16 000	935
20	1.84	4 700	312	17 000	980
25	2.30	4 800	318	20 000	1 130

3 结束语

在二维等离子体粒子模拟的网格结构上,建立了爆炸式发射的物理模型。从网格的角度分析了爆炸式模拟的具体实现方法并结合2.5维粒子模拟软件CHIPIC编制了爆炸式发射模块。以向内发射同轴二极管为例,从其电子束运动特性和伏安特性两方面验证了模拟的正确性。

参考文献

- [1] 邵浩, 刘国治, 宋志敏, 等. 向内发射同轴型二极管电流电压关系二维修正[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(5): 632-636
- [2] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [3] Yuri M. Sibbett W. On anode effects in explosive emission diodes[J]. Journal of applied physics, 2003, 94(2): 5 776-5 781
- [4] Calame J P, Gray H F, Shaw J L. Analysis and design of microwave amplifiers employing field-emitter arrays[J]. Appl. Phys, 1993, 73(3): 1 485-1 504
- [5] Busta H H, Pogemiller J E, Chan W, et al. Experimental and theoretical determinations of gate-to-emitter stray capacitances of field emitters[J]. Vac. Sci. Technol, 1993, B11(2): 445-448
- [6] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波. 第3版[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 58-61

编辑 孙晓丹