

文章编号: 1001-2486 (2002) 02-0101-05

## 无箔二极管中引导磁场对电子回流的影响\*

刘 列, 刘永贵, 张亚洲

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 无箔二极管中电子回流是造成绝缘子表面闪络的重要因素, 用 Maxwell 方程和电子运动方程定性分析了电子束回流的可能性, 采用 PIC 方法模拟了无箔二极管中电子束回流的物理过程, 由此提出了对引导磁场和阴阳极结构进行优化设计的建议。

**关键词:** 无箔二极管; 引导磁场; 电子束回流

**中图分类号:** TN128 **文献标识码:** A

## The Influence of Guiding Magnetic Field to the E-Beam Reflux in Foil-less Diode

LIU Lie, LIU Yong-gui, ZHANG Ya-zhou

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The reflux is one of the main factors to cause the dielectric surface flashover. The possibility of producing the reflux is analyzed by the use of Maxwell equations and electron motion equations. Then the PIC method is used to simulate the production process of the e beam electrons reflux in foil-less diode and some simulation results are presented. Finally some suggestions are given for the optimum design of the diode by choosing proper guiding magnetic field and diode structure.

**Key words:** foil-less diode; guiding magnetic field; return electron flow

无箔二极管是一种产生长脉冲和重复频率强流电子束的优化结构<sup>[1~3]</sup>, 利用它容易产生薄的环形电子束, 可传输大的极限电流, 可实现电磁场与束电子之间有效的能量转换。但也面临一些问题: 如电子束的一部分沿磁力线回流打到绝缘体上造成绝缘子表面闪络就是其中之一。因此在无箔二极管的绝缘子设计中, 不仅要考虑高压绝缘<sup>4</sup>还要考虑导引磁场和束电子回流对绝缘子表面闪络的影响。在无箔二极管中电子束的扩张和传输完全依赖于外加磁场控制, 同时, 由于无阳极箔, 增加了阴阳极间的径向电场分量, 阴极杆和阴极发射的电子束必然有横向速度分量, 在一定条件下, 电子束回流不可避免。

### 1 原理

对无箔二极管中束电子回流的可能性, 可根据 Maxwell 方程和电子运动方程定性分析得出, 然后采用广泛应用于微波器件、加速器等研究领域的 PIC 方法, 模拟无箔二极管中电子束回流的形成过程, 重点讨论引导磁场对无箔二极管电子束的形成和电子回流的影响, 这种方法能够真实地反映无箔二极管中电子束流的特性, 为设计性能优良的无箔二极管结构提供可靠的依据。

#### 1.1 定性分析

电子运动方程:

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = -e(E + v \times B) \quad (1)$$

其中  $B$  为导引磁场,  $E = -\nabla V$ 。将方程 (1) 式写成柱坐标形式:

$$F_r = \frac{d}{dt}(mr) - mr\dot{\theta}^2 = e \left( \frac{\partial V}{\partial r} - e(r\dot{\theta}B_z - zB_\theta) \right) \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2001-10-18

基金项目: 国家 863 项目资助

作者简介: 刘列 (1960—) 男, 副教授, 博士生。

$$F_{\theta} = \frac{1}{r} \frac{d}{dt}(mr^2\dot{\theta}) = \frac{e}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} - e(zB_r - rB_z) \quad (3)$$

$$F_z = \frac{d}{dt}(mz) = e \frac{\partial V}{\partial z} - e(rB_{\theta} - r\dot{\theta}B_r) \quad (4)$$

对于那些径向作用力  $F_r$  和角向作用力  $F_{\theta}$  达到平衡的电子, 即  $F_r = 0$ 、 $F_{\theta} = 0$ , 同时考虑到电子在轴对称的情况下,  $\frac{\partial V}{\partial \theta} = 0$ 。由(2)(3)式可得:

$$\frac{\partial V}{\partial r} - (r\dot{\theta}B_z - zB_{\theta}) = 0 \quad (5)$$

$$zB_r - rB_z = 0 \quad (6)$$

将(5)(6)式代入(4)式, 可得

$$F_z = -e(E_z + \frac{E_r}{B_z}B_r) \quad (7)$$

由(7)式可知, 当  $E_z + \frac{E_r}{B_z}B_r > 0$  时,  $F_z < 0$ , 就可能形成电子回流。因为在二极管阴极附近的区域磁场有  $B_r < 0$ 、 $B_z > 0$ , 电场有  $E_r < 0$ 、 $E_z < 0$ , 所以

$$B_z < |B_r| \frac{E_r}{E_z} \quad (8)$$

可见, (8)式即是形成电子回流的条件, 是生成电子回流的主要原因, 从(8)式可以看出, 在二极管阴极附近的区域径向电场  $E_r$  和径向磁场  $B_r$  过大, 都更容易产生电子束回流, 当引导磁场  $B_z$  增大, (8)式不能成立, 可有效抑制电子回流。

为了对电子束进行引导, 控制电子束的传输和扩张, 不得不在该二极管上加上一引导磁场, 正是由于该磁场的存在, 再加上阴阳极间径向电场的存在, 电子便有可能向预定方向的反方向传输, 形成电子回流, 这个回流电子就有可能轰击绝缘结构, 造成绝缘子表面闪络, 我们从粒子模拟的角度可以验证在一定条件下电子回流的的存在。

## 1.2 PIC方法的引入

PIC (Particle-in-Cell) 粒子模拟方法是研究复杂几何结构中束波非线性相互作用的有效方法, 它采用“巨粒子”代替大量运动状态相近的微观粒子, 运用时域差分 (FDTD) 法求解 Maxwell 方程组及 Lorentz 力方程, 所得到的是各方程的自洽解, 因此, 自然包括了非线性效应, 同时, 各种几何边界离散化之后表现在 Maxwell 方程组的边界条件中, 适合于计算机编程实现, 这使得它在计算机功能日益完善的今天有着广阔的应用。

由于外加了导引磁场, 使得无箔二极管内部的物理过程变为更复杂, 不可能给出精确的解析解, 前面的理论分析也只是定性的, 只能通过数值方法进行求解。利用计算机进行数值模拟可以研究无箔二极管几何形状比较复杂的情况, 可以考虑到诸如阴极杆发射和不均匀有限磁场等各种因素的影响。一般无箔二极管的数值模拟没有考虑阴极杆发射的情况, 当外加导引磁场比较弱时, 应该考虑阴极杆的电子发射。采用考虑了电子束空间电荷效应和束流自磁场等诸多因素并被广泛应用于微波器件、加速器等研究领域的 PIC 方法, 模拟无箔二极管中电子束形成的过程, 能够真实地反映无箔二极管中电子束流的运动特性, 为设计性能优良的无箔二极管结构提供可靠的依据。采用 PIC 方法模拟无箔二极管的模型如图 1 所示。

## 2 电子束形成和电子回流的粒子模拟结果

数学模型是根据初始时刻模拟粒子的运动状态以及所研究区域电磁场的初始值 (比如阴阳极电压 400kV, 不同的导引磁场强度  $B$ , 几何结构的边界条件, 5000 个“巨粒子”数等), 通过求解 Maxwell 方程组得到下一时刻各网格上的电磁场值, 用插值方法求得模拟粒子中心点所在处的电磁场值, 利用 Lorentz 力方程即可得出相应时刻模拟粒子的运动状态, 然后重复上述步骤, 这种不断循环的计算过程

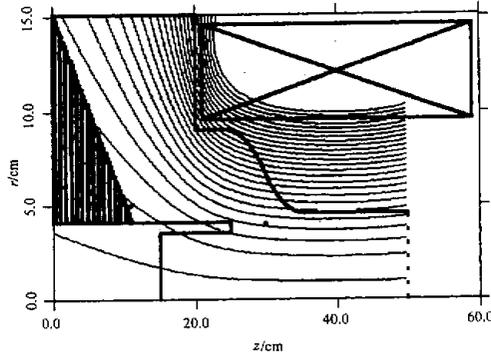


图 1 无箔二极管的模型

Fig.1 Schematic of the foil - less diode

构成了模拟粒子的基本框架。根据需要可在任意时刻对粒子模拟的结果进行诊断，为了保证模拟计算的准确性，时刻检验系统能量守恒保持的精度。

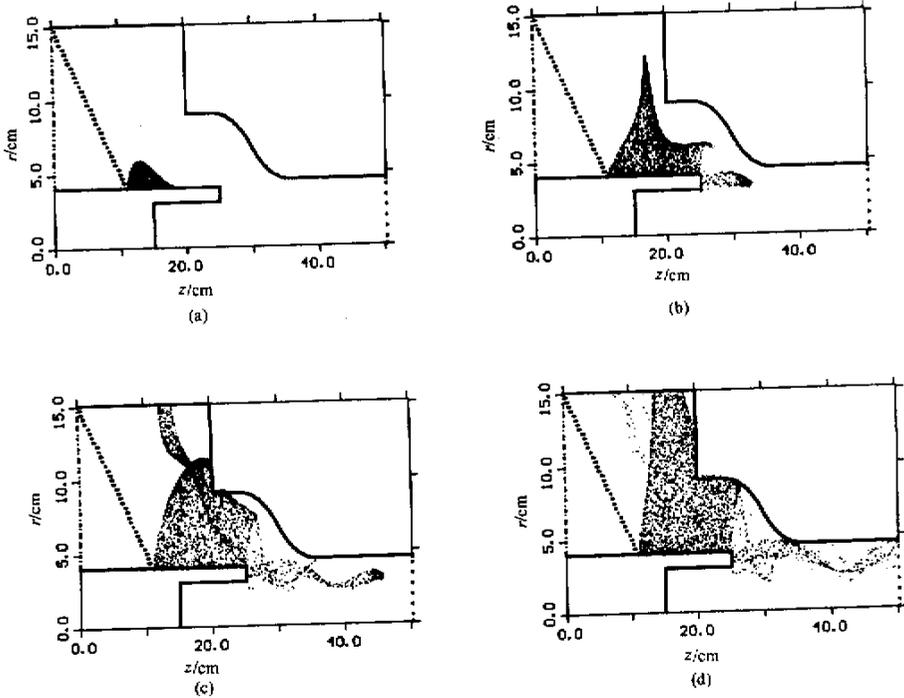


图 2 电子束发射随时间的变化

Fig.2 Electron beam emitted by cathode at different time

图 2 为电子束形成过程，图 2 (a) ~ 图 2 (d) 分别代表  $t = 1.0\text{ns}$ ,  $1.5\text{ns}$ ,  $2.0\text{ns}$ ,  $3.0\text{ns}$  时的电子束状态。从图中我们可以看到，当外加引导磁场 ( $B = 0.14\text{T}$ ) 比较弱时，电子束先从阴极杆的三结合点 (绝缘子、阴极、真空区的结合部，称三结合点) 发射，因为这点场强最强<sup>[4]</sup>，它穿过磁力线运动达到阳极造成二极管闭合，所以弱引导磁场下是不能形成稳定的强流电子束的。从图 2 (b) (c) 中我们还观察到在电子束形成过程中伴随有空间电荷效应，因为有空间电荷的堆积，束流密度也不均匀。图 2 (d) 表示基本上不能形成稳定的纵向强流电子束输出。

图3给出了  $t = 1.0\text{ns}$  时不同引导磁场强度下电子束轨迹和电流强度，从图中看出导引磁场对无箔二极管电子束的形成和电子回流有重要影响。

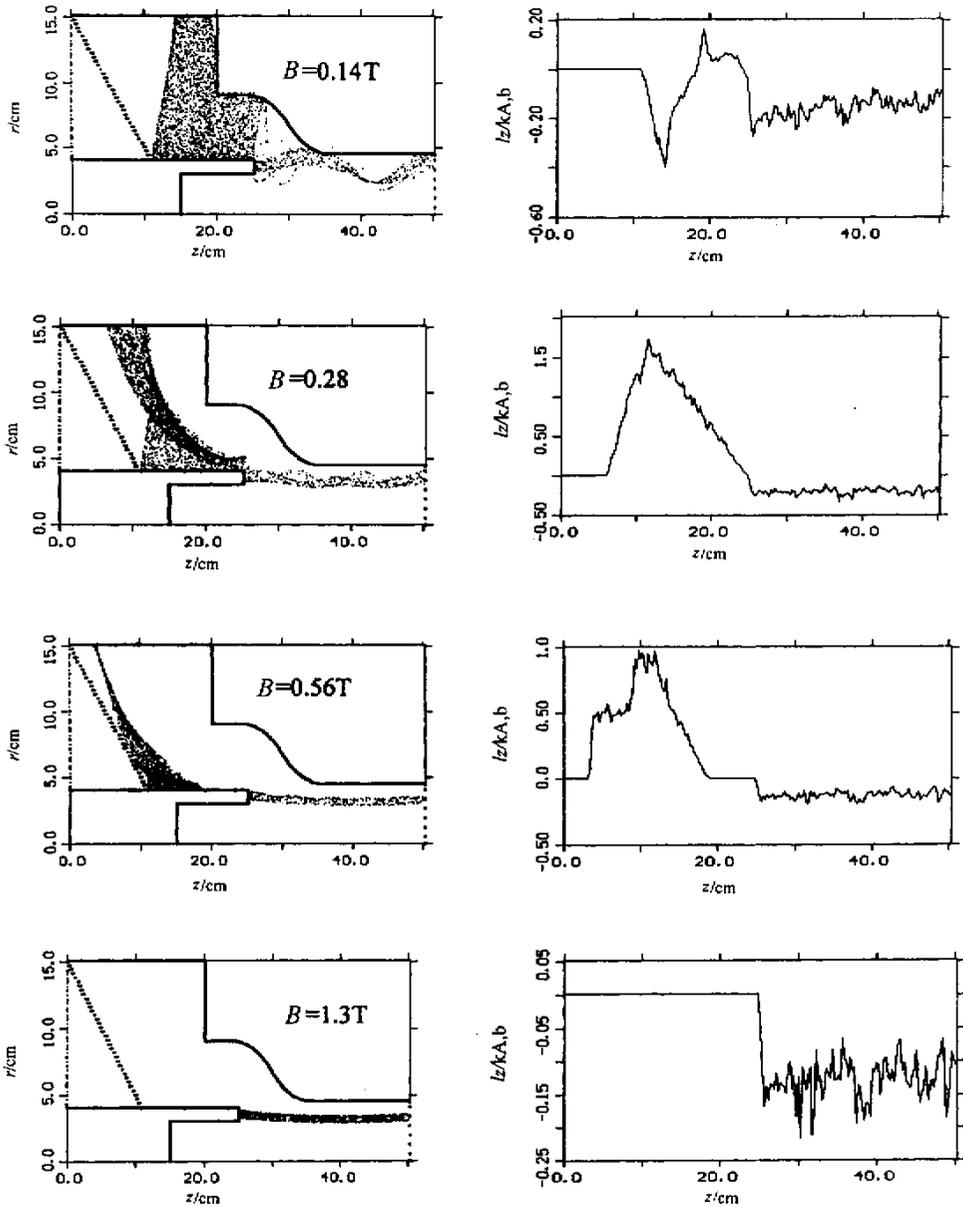


图3 不同引导磁场强度下电子束轨迹(左)和电流强度(右)

Fig.3 Electron beam (left) and its current (right) with different guiding magnetic filed

比较不同引导磁场强度下电子束轨迹，当外加引导磁场比较弱时，虽然电子束不直接轰击绝缘结构表面，但会造成二极管闭合。当外加引导磁场增强但仍满足电子回流的条件时，造成的二极管回流电子束直接轰击绝缘子结构表面，造成绝缘子表面闪络。继续增强外加引导磁场使其不满足电子回流的条件时，可得到二极管电子束稳定的纵向传输。由于阴极杆的发射，可以获得比较高的束流强度，但束流品质却降低了，我们可以通过增加引导磁场强度、降低阴极杆侧面的径向电场强度、选择阴极和阴极杆各部分的材料并对它们的表面进行适当的处理来抑制阴极杆的发射。强的引导磁场不仅抑制阴极杆电子束的发射，阴极杆上的电子被束缚在阴极杆表面，更主要的是抑制了电子束回流。当然，

引导磁场不可能很强，对系统来讲它应该有一个最佳值<sup>[5]</sup>。

### 3 结论

(1) 无箔二极管是一种产生长脉冲和重复频率强流电子束的优化结构，电子束的扩张和传输完全依赖于外加引导磁场控制，当外加引导磁场比较弱时，由于阴极杆的发射，不仅会造成二极管闭合，还会造成电子回流。虽然可以获得较高的束流强度，但束流品质却降低了，我们可以通过增加引导磁场强度和降低阴极杆侧面的径向电场强度来抑制阴极杆的发射，然而这只是解决电子回流问题的方法之一，还应从另外几方面考虑：1) 对阴阳极结构进行优化设计；2) 对阴极形状进行优化设计；3) 对阴极和阴极杆的各部分的材料进行细致的选择，并对它们的表面进行适当的处理等等，这些工作有待进一步研究。

(2) 采用 PIC 粒子模拟方法是一种比较有效的方法，为设计性能优良的无箔二极管结构提供可靠的依据。

### 参考文献：

- [1] 米勒 R B. 强流带电粒子束物理学导论 [M]. 北京：原子能出版社，1990.
- [2] Jones M E, et al. Analytical and Numerical Studies of Foilless Diodes [J]. J Appl Phys. 1981, 52 (8): 4942.
- [3] 张亚洲, 陈有荣. 无箔二极管数值模拟 [J]. 国防科技大学学报, 1995, 17 (增刊): 37-47.
- [4] 刘列等. 无箔二极管径向绝缘的数值模拟研究 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14 (1): 124-128.
- [5] 钟辉煌等. 重复运行加速器技术的初步研究 [C]. 第二届全国高功率微波学术研讨会, 1996.

