

# Spindt 型与薄膜场致发射的数值模拟与特性比较<sup>\*</sup>

刘筠乔 詹杰民<sup>†</sup>

(中山大学应用力学与工程系, 广州 510275)

(2004 年 8 月 4 日收到, 2004 年 11 月 12 日收到修改稿)

采用质点网格法 (particle-in-cell) 利用 MAGIC 软件模拟了场致发射的物理过程. 对两种典型的场致发射模型 (Spindt 阴极发射体和金刚石薄膜发射体) 分别进行了模拟. 对 Spindt 阴极发射, 研究了发射特性与尖端尺寸, 尖端与栅极面的相对高度的关系. 对金刚石薄膜发射, 比较了三极管和四极管的发射特性, 以及薄膜面积对发射特性的影响, 得出金刚石薄膜发射体优于 Spindt 发射体的特性.

关键词: 场致发射, MAGIC 程序, Spindt 发射体, 金刚石薄膜发射体

PACC: 7970

## 1. 引 言

场致电子发射是在阴极加上一个电场, 使电子通过隧道效应进入真空, 其电流发射密度比热发射电流密度大, 是获得高电流密度电子发射的一种有效手段<sup>[1]</sup>. 场致电子发射的理论计算需要知道阴极表面的电场强度. 在给定栅极电压下, 阴极表面的电场与阴极的物性、几何结构和表面附近的电荷分布有关, 一般没有简单的计算方法. 对于纳微米场致发射器件, 考虑阴极几何构造和电荷分布是必要的. 我们用质点网格法对 Spindt 阴极和金刚石薄膜发射体分别进行了模拟. 模拟中采用时域有限差分法对完整的 Maxwell 方程组和 Lorentz 方程进行自洽的数值求解, 从而可以模拟电荷粒子和电磁场相互作用的时间非线性演化过程.

质点网格法的基本思想是从初始条件、边界条件出发, 由 Maxwell 方程组计算出空间的电磁场, 由 Lorentz 公式求出每个电荷粒子在电磁场作用下的加速度、速度, 得到电荷粒子新的空间分布和速度分布, 由连续性方程得到电荷密度和电流密度, 提供给 Maxwell 方程求解需要. 由此循环, 算出大量电荷粒子的运动轨迹和电磁场随时间演化的过程.

## 2. 场致发射的机理与控制方程

场致发射的原理是在阴极加上一个电场, 此电场可以降低阴极的表面势垒, 从而使电子通过隧道效应从阴极进入真空. 外加电场不仅使势垒降低, 还有使势垒变薄的作用. 对场致发射的电流密度与外加电场之间的关系有经典的 Fowler-Nordheim 公式进行描述:

$$j = E^2 \exp[-6.8 \times 10^7 \Phi^{3/2} / E], \quad (1)$$

其中  $j = I/S$ ,  $E = \beta V$ ,  $S$  是发射区面积,  $\beta$  是场增强因子,  $\Phi$  是逸出功. 实验中实际测量的是总电流  $I$  和电压  $V$ <sup>[2]</sup>.

为了使场致发射成为可能, 必须要在发射体表面加上足以使电子发射的电场. 手段有三种: 其一为提高电压, 并将阴极做成曲率半径很小的尖端, 这样就会在阴极表面形成较强的电场, 此种技术在 x 射线管, 电子显微镜等高压运用的电子器件中应用较多; 其二为缩短阴极和阳极之间的间距, 如微型场发射阵列, 在较低电压下也可获得较强的电场<sup>[3]</sup>; 其三为选用发射功函数较低的材料, 使得在较低的电压下电子可以发射<sup>[4]</sup>. 目前场致发射阴极发射体多采用 Spindt 阴极和金刚石薄膜. 实验结果表明<sup>[1,5]</sup>, 尖端曲率半径为 50nm 的钨尖, 在 150—300V 的栅极电

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重点项目(批准号 90306016)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: stszjm@zsu.edu.cn

压下,可产生 50—150 $\mu$ A 的电流,宏观电场强度可达 10<sup>9</sup> V/m 数量级.

阴极发射体的结构尺寸和它的特性密切相关.为了选得最佳的几何尺寸,可以先对其进行计算机的模拟计算,其中最关键的是对不同形状的阴极发射体的空间电场的计算.其计算的理论依据为

高斯定理

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E}) = \rho, \tag{2}$$

电势和场强的关系

$$\mathbf{E} = -\nabla U, \tag{3}$$

以及由以上高斯定理和电势场强关系得出

$$\nabla^2 U = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \tag{4}$$

其中  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\rho$  为空间电荷密度函数.

(4)式为泊松方程,当不考虑空间电荷影响时,右端项为 0,方程变为拉普拉斯方程.

### 3. Spindt 阴极发射的数值模拟

场发射电极理论最早是在 1928 年由 R. H. Fowler 与 L. W. Nordheim 共同提出.不过,真正以半导体技术研发出场发射电极组件,开启运用场发射电子作为显示器主要技术,却是在 1968 年由 C. A. Spindt 提出后,才吸引众多研发者的投入. Spindt 场发射体由一个微小圆孔与其中的一个微小圆锥组成,在电场作用下,它具有非常大的场增强因子,使电子束容易被释放,发射的电流密度也较高.

#### 3.1. 物理模型

对 Spindt 阴极的要求除了对电气性能的要求以外,还要有对跨导、电容、机械强度的要求.综合考虑各种要求,选定如图 1 所示形状的阴极发射体作为模拟研究的对象.

根据发射体轴对称特性,采用柱坐标轴对称模型,  $z$  轴为对称轴.模型中尖端曲率半径为 50nm,栅极开口半径为 250nm(见图 2).

#### 3.2. 模拟结果与分析

假定发射体材料为钼,功函数为 4.35eV,设置栅极电压为 200V,阳极电压为 400V.图 2 为电子的发射图,有效发射角设定在 60°,从图中可以看到,电子打在阳极上的半径约为 200nm,是尖端半径尺寸的 4 倍.

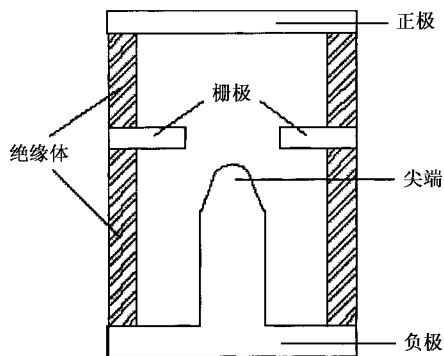


图 1 Spindt 发射体模型

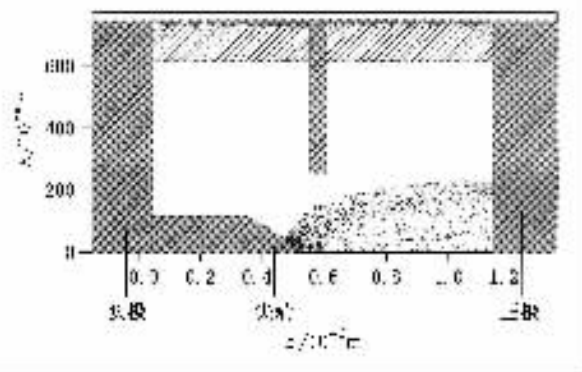


图 2 电子发射图

图 3 为尖端到阳极场强的空间分布图,尖端处的场强最大,量级可达 10<sup>9</sup> V/m,与实验得出的金属尖锥表面场强量级相同.远离尖端处场强变化不大.

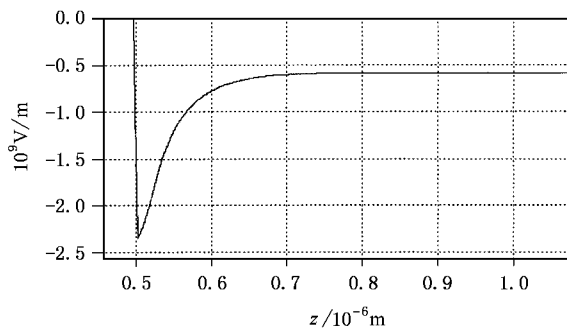


图 3 场强分布

Spindt 发射体的几何尺寸对发射的效果有重要影响.本文研究了尖端的曲率半径和尖端与栅极面的相对高度对发射电流的影响,调整上述两种尺寸,电流强度的变化如图 4 和图 5 所示.

从图 4 可以看出,发射电流随尖端半径的减小呈指数级的增大,在 45—65nm 之间,电流的变化相当明显,45nm 时的电流值是 55nm 时的 5 倍.

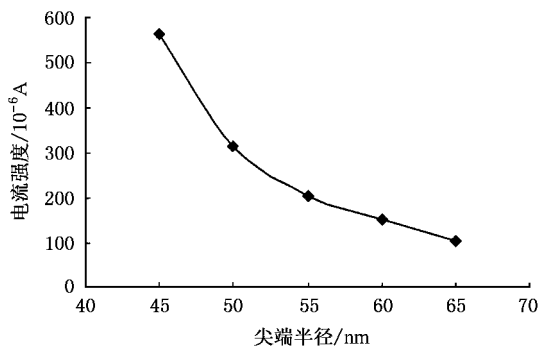


图 4 尖端半径对发射电流的影响

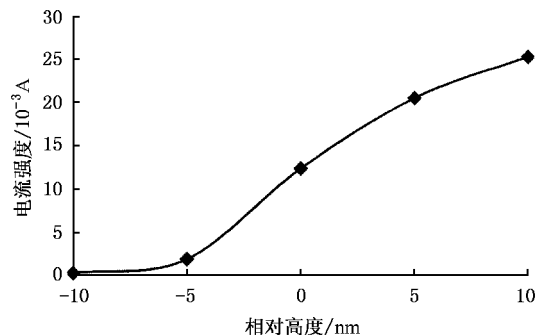


图 5 尖端与栅极的相对高度和发射电流的关系

从图 5 可以看出,尖端与栅极的相对高度对发射电流也有很大的影响,电场强度的变化程度在同一个数量级上,高出栅极 10nm 的电流密度比低于栅极 10nm 的电流密度要大将近两个数量级。

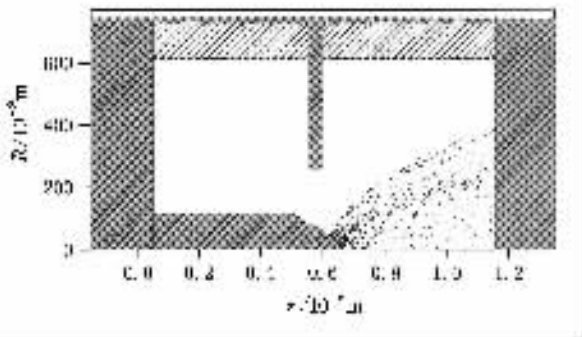


图 6 尖端高于栅极面的发射图

尽管当发射体突出栅极面时,电场强度和电流密度比低于栅极面时的大,但最高电场仍然出现在发射体的尖端处,不会在引起发射体场发射之前引起栅极材料的场发射(图 6)。虽然发射体突出可以增强电场,但高出栅极面以后,电子的成束性变差,因为栅极本身加的是正压,实际上也是一个电子透

镜,对经过电子有聚焦的作用。没有栅极时,发射的电子以一定发射角向前端发射。加了栅极后,阳极到针尖阴极的电力线受到栅极的约束而收缩,这样就导致电子发射角的变小。另外,栅极的孔径也与针尖形成一定的角度,这一角度同样约束了电子的发射角度。如果针尖过于靠近或者是高出栅极,那么栅极对电力线的约束就会减小,同时栅极孔径对电子发射角的约束也变小甚至是消失。电子的成束性变差,跟真空电子器件要求有较高的电子成束性是相悖的。所以,实际的 Spindt 模型尖端略低于栅极面。

### 4. 金刚石薄膜发射的数值模拟

Spindt 阴极是目前普遍采用的发射体,然而从上面分析可以看出,尖端曲率半径减小可以使尖端附近的电场增强,所以制造 Spindt 阴极阵列需要制作曲率半径极小的尖锥,这在工艺上是十分困难的。为降低工艺难度,研究新型发射体结构的真空微电子器件就成了一个十分重要的课题。由于金刚石薄膜性能十分稳定,导热性能好,相应的功函数为 0.2—0.3eV,比金属和硅等常用材料的功函数(约为 4—4.5eV)小得多,采用金刚石薄膜作发射体,甚至采用平面结构也可能在较低的电压下发射电子。

#### 4.1. 三极管结构

我们采用如图 7 的真空微电子三极管结构。利用其对称性,采用柱坐标轴对称模型。Z 轴为对称轴。建模结果金刚石薄膜发射如图 8 所示,薄膜厚度为 25nm,薄膜面的半径为 100nm,同样假设栅极电压为 200V,阳极电压为 400V。电子发射到阳极的半径也大约为 100nm。另外,从薄膜至阳极的电流强度分布图(图 9)来看,在相同的栅极电压和阳极电压

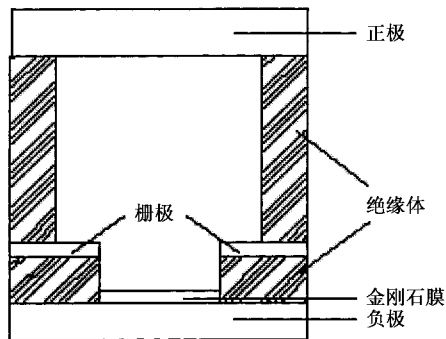


图 7 金刚石薄膜发射体三极管结构

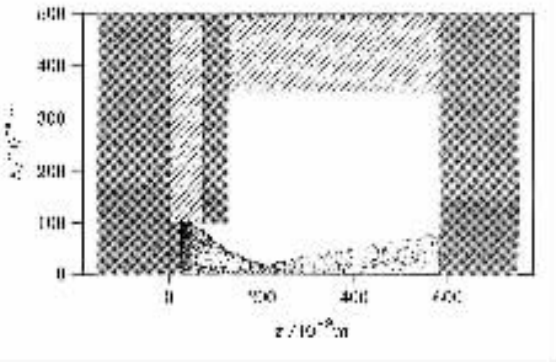


图 8 三极管结构发射图

下,金刚石薄膜的发射电流要比 Spindt 发射体的发射电流大三个数量级.

国内外相关研究表明<sup>[6]</sup>,影响金刚石薄膜发射的主要因素是薄膜的面积.图 10 是程序模拟得出的结果.可以看出,随着薄膜宽度的增大,发射电流也大致呈线性增大的趋势.

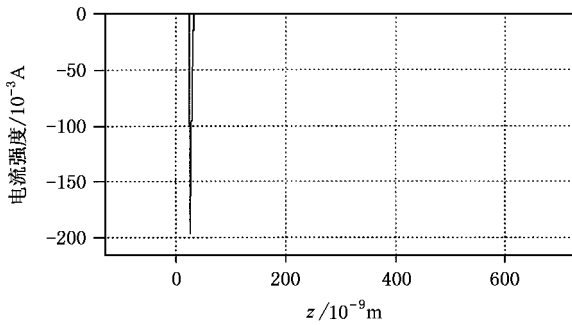


图 9 三极管的电流强度分布图

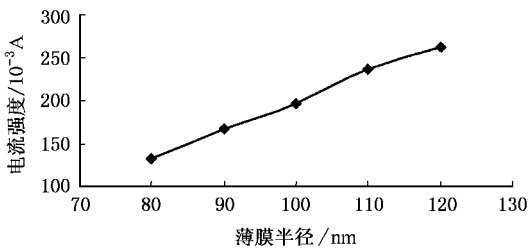


图 10 薄膜面积对电流的影响

### 4.2. 四极管结构

研制场发射平面显示器,要求电子束有较好的聚焦性.栅极的作用主要在于辅助电子发射,它的聚焦作用其实很有限.在实验中如果要减少电子束的发散,需要在栅极之上再另外加上聚焦极.模拟结果

表明,在三极管的基础上加多一个聚焦极(图 11),适当调整各级电压,可以使电子成束.我们在聚焦极加上 16V 的电压,结果如图 12 所示.

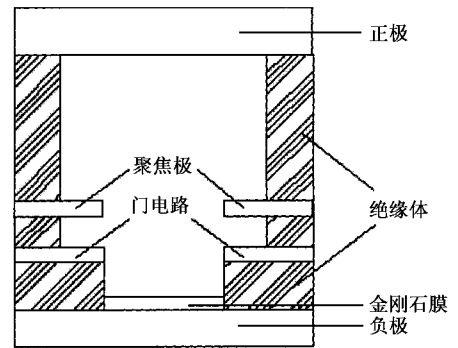


图 11 金刚石发射体四极管结构

与图 8 比较,由于加上了聚焦器,四极管的电子束半径 20nm 左右,只有三极管电子束半径的 1/4—1/5.可见,金刚石薄膜发射的四极管结构的电子聚焦效果是比较理想的.

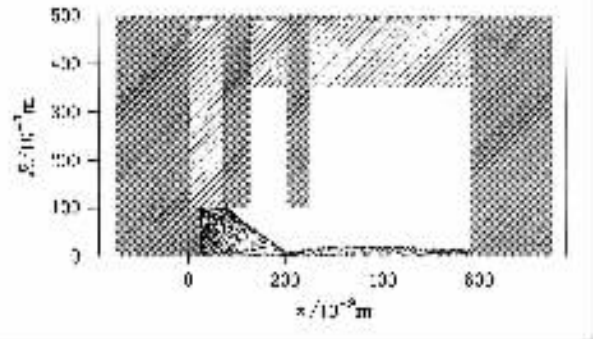


图 12 四极管结构发射图

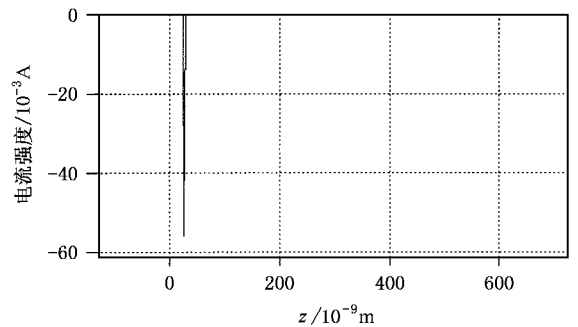


图 13 四极管电流强度分布图

图 13 是四极管薄膜至阳极处电流强度的分布图,与图 9 比较,电流强度的最大值仍然出现在发射处,数值较三极管小,说明四极管对电子的会聚作用

以降低发射电流为代价.

## 5. 结 论

模拟发现, 发射尖端曲率半径和尖端与栅极的相对高度是影响 Spindt 发射体发射特性的主要因素. 为了使尖端处得到强电场, 可以通过减小尖端曲率半径的途径实现. 尖端突出栅极面时可以使发射

电流增强, 但同时电子的成束性减弱. 综合考虑各因素, 应适当调整尖端与栅极面的相对高度, 使尖端略低于栅极面.

金刚石薄膜发射能在相同的栅极电压下产生与 Spindt 发射体相比更大的发射电流, 而且具有工艺简单的优点, 也能形成较好的聚焦电子束. 其发射电流与薄膜面积有很大关系, 要增强发射电流强度, 可以增大薄膜面积. 本文模拟应用了 MAGIC 模拟程序.

[ 1 ] Liu Y Z *et al* 1995 *Electronic Emission and Photoelectric Cathode* (Beijing Institute of Technology Press) [ in Chinese ] 刘元震等 1995 电子发射与光电阴极 [ 北京理工大学出版社 ]

[ 2 ] Sun J P *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1805 [ in Chinese ] 孙建平等 物理学报 2001 **50** 1805 ]

[ 3 ] Wei W *et al* 1999 *Vacuum Electronics* **6** 1 [ in Chinese ] 尉 伟等

1999 真空电子技术 **6** 1 ]

[ 4 ] Chen G H *et al* 2000 *J. Beijing Polytechnic University* **3** 116 [ in Chinese ] 陈光华等 2000 北京工业大学学报 **3** 116 ]

[ 5 ] Bonin B 1995 *Vacuum* **46** 907

[ 6 ] Zeng B Q *et al* 1998 *Vacuum Science and Technology* **18** 355 [ in Chinese ] 曾葆青等 1998 真空科学与技术 **18** 355 ]

# Numerical simulation and characteristic comparison of Spindt type and diamond film field emission \*

Liu Jun-Qiao Zhan Jie-Min

( Department of Applied Mechanics and Engineering , Zhongshan University , Guangzhou 510275 , China )

( Received 4 August 2004 ; revised manuscript received 12 November 2004 )

## Abstract

By using the electromagnetic particle-in-cell ( PIC ) MAGIC code , the process of field emission is simulated. The simulation includes two representative field emission devices ( Spindt-type field emitter and diamond film field emitter ). For Spindt-type field emitter , the relation between the characteristics and the radius of curvature of the emitter tip , the relative height between the emitter tip and the gate are studied. As regards the diamond film field emitter , the characteristics of field emission microtriodes and microtetrodes are compared with each other and the influence of the area of diamond film is investigated. The results show that the characteristics of diamond film field emitter has an advantage over Spindt-type field emitter.

**Keywords** : field emission , MAGIC code , Spindt-type field emitter , diamond film field emitter

**PACC** : 7970

\* Project supported by the major Program of the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 90306016 ).