

W[111]尖端场发射电子枪的工作特性*

杨德清 陈尔纲

(云南大学物理系,昆明 650091)

摘要 本文报道了单晶 W[111] 尖端的制作,以及由 W[111] 尖端阴极,第一、二阳极组成的三极场发射电子枪(FEG)的工作特性. 实验结果表明,这种 FEG 在枪室真空为 5×10^{-7} Pa, 加速电压在 30kV 的条件下,其虚源半径为 1.6nm;亮度为 3.8×10^9 A/cm².sterad;场发射电流为 1 μ A 时,束流稳定性为 5%(10min 内). 说明它是一种较理想的点状电子源,在实际应用中具有广泛发展前景.

关键词 场发射电子枪; W[111] 尖端;虚源半径;亮度;束流稳定性

一、引言

利用场致电子发射体制成的场发射电子枪(FEG),由于具有室温工作、即时启动、高亮度、小束斑和较窄的电子初速分布等一系列独特优点,备受人们的关注. 现在,单尖端的 FEG 已成功地应用于各种电真空分析仪器和电子束加工等设备之中^[1-3],成为一种较理想的点状电子源;多尖端的场发射也获得不断进展. 特别是自 1985 年由 G. Bining 和 H. Rohrer 发明扫描隧道电子显微镜(STEM)以来^[4,5],国际上利用尖端和隧道效应引起的场发射现象,在科学技术上实现了一系列引人注目的新发展,更激起人们极大兴趣.

我们在开展对单晶 W[111]、多晶钨和金属钽的场发射特性和稳定特性的研究基础上,又对由单晶 W[111] 尖端阴极和第一、二阳极等所组成的三极 FEG 的应用特性,作了系统的实验和分析,得到一些有用的结果.

二、W[111]尖端的制备

W[111] 是一种金属单晶,其逸出功为 4.39eV. 在制作 W[111] 发射尖端时,我们是采用电解腐蚀法进行的,其电解液为 10% 的氢氧化钠水溶液(重量比). 整个制作过程可参看有关文献^[6,7]. 所制得的尖端其外形尺寸可用 SEM 进行照相确定,如图 1 所示. 在本实验中,W[111]的尖端曲率半径为 1.05×10^{-5} cm,尖端颈为 1.15×10^{-5} cm.

1991.03.19 收到,1991.07.22 定稿.

* 国家自然科学基金资助项目

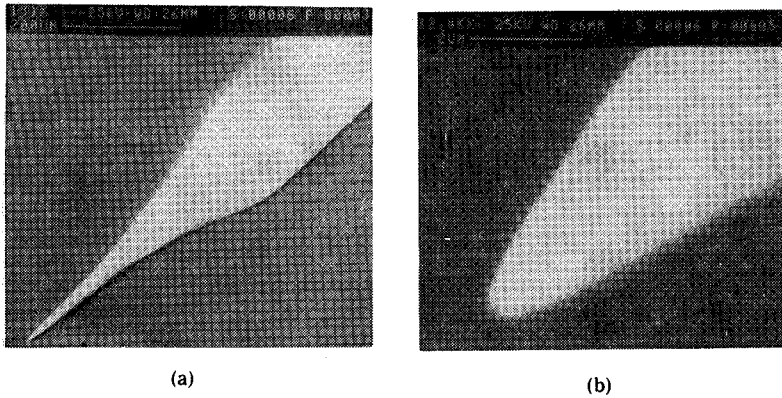


图 1 W[111] 尖端的 SEM 照片
(a) 为 120 倍的低倍像 (b) 为 12000 倍的高倍像

三、FEG 实验装置

我们研制的 W[111] 尖端三极 FEG 的结构如图 2 所示。整个装置分枪室和观测室两部分。在枪室中有发射尖端,第一、二阳极和高压瓷瓶;观测室里主要装有荧光屏和引出线,用以观测发射图象和测量发射电流以及束锥角等。整个枪体由两台抽速为 150L/s, 极限真空为 5×10^{-8} Pa 的 SE-03L 型溅射离子泵抽气,以获得超高真空。

W[111]尖端三极 FEG 的主要技术参数是:

- (1) 枪室真空优于 5×10^{-7} Pa;
- (2) 第一阳极小孔直径为 0.5mm,孔至尖端间距 L_1 为 3mm;
- (3) 第二阳极孔直径为 10mm,孔至尖端间距 L_2 为 123mm;
- (4) 荧光屏直径 100mm,屏至尖端间距 L_3 为 290mm。

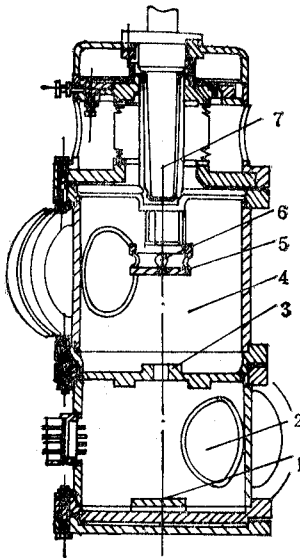


图 2 W[111]尖端三极 FEG 结构图

- 1. 荧光屏, 2. 观测室, 3. 第二阳极, 4. 枪室,
- 5. 第一阳极, 6. W[111] 尖端, 7. 高压瓷瓶

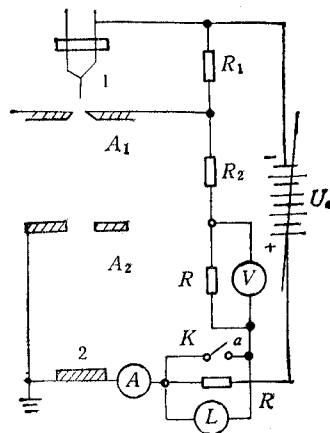


图 3 测量电路

- 1. W[111]尖端阴极, 2. 荧光屏, A_1 和 A_2 ,
分别为第一、二阳极

四、FEG 工作特性的测量和比较

1. FEG 发射特性的测量和比较

测试电路如图 3 所示。其中 U_0 为 50kV 直流负高压电源, A 为检流计, L 为自动记录仪, V 为电压表。工作时保持枪室真空为 5×10^{-7} Pa, 并将第一、二阳极联接在一起。先对 W[111] 尖端进行多次闪烁, 去气。再启动电源。调节负高压电源 U_0 , 测出在不同加速电压下的场发射电流 I , 作出如图 4 所示的 $\ln(I/V^2) \sim (1/V) \times 10^4$ 曲线即可。

为了与 Fowler-Nordheim (F-N) 理论进行比较, 从 F-N 场发射公式^[8]得

$$I = (1.54 \times 10^{-6} \epsilon^2 S / \phi) \exp[-6.83 \times 10^7 \phi^{3/2} \theta(y) / \epsilon] \quad (1)$$

其中 ϕ 为逸出功; $\theta(y)$ 为 Nordheim 函数; S 为尖端有效发射面积, 其值为

$$S = 2\pi r^2 (1 - \cos \alpha) \quad (2)$$

这里 r 和 α 分别为尖端曲率半径和发射半角; ϵ 为尖端表面电场, 它与外加电压 V 和尖端形状系数 β 之间的关系为^[9]

$$\epsilon = \beta V = 0.2V / [(r + H) \ln(2H/r)] \quad (3)$$

其中 H 为尖端颈部的半宽度。

将(3)式代入(1)式, 并把 V^2 移到等式左边, 再两边取对数得

$$\ln(I/V^2) = \ln(1.54 \times 10^{-6} \beta^2 S / \phi) - 2.9662 \times 10^7 \phi^{3/2} \theta(y) / \epsilon \quad (4)$$

代入 V, I, r, α, H, ϕ 和 $\theta(y)$ 等值后, 即可得到 F-N 理论曲线。从图 4 可见, 两者是一致的。

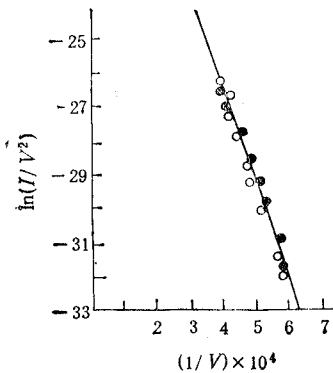


图 4 W[111] 尖端 FEG 发射曲线

● 为理论值, ○ 为实验值

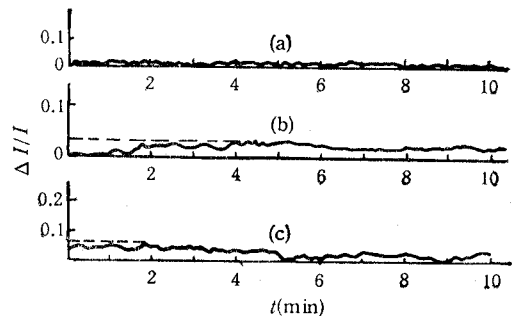


图 5 束流稳定性的实验曲线

(a) $I = 0.05 \mu\text{A}$; $\Delta I/I < 0.5\%$, 10min 内;

(b) $I = 0.1 \mu\text{A}$; $\Delta I/I < 3\%$, 10min 内;

(c) $I = 1.0 \mu\text{A}$; $\Delta I/I < 5\%$, 10min 内

2. FEG 束流稳定性的测量

对 FEG 束流的稳定性我们是用 LM16 型自动记录仪进行测量的。测量时断开开关 K , 同样使第一、二阳极相联。固定一个加速电压 V_1 , 测出相应的发射电流 I_1 随时间

t 的变化;再改变电压为 V_2 ,测出另一个相应的发射电流 I_2 随时间 t 的变化即可。经分别对 I 为 $0.05\mu\text{A}$, $0.1\mu\text{A}$ 和 $1\mu\text{A}$ 三种情况的测量,结果如图 5 所示。从图可见,当 I 为 $1\mu\text{A}$ 时,电流波动为 5%(10min 内)。束流的稳定性是好的。

3. FEG 束斑和亮度的测量和比较

测量 FEG 的束斑和亮度,我们是采用所谓 FEM 法^[10]进行的。经分析可知决定 FEG 亮度和 FEM 分辨率的主要因素是完全相同的,都是由于从尖端表面发射出来的电子具有横向速度以及 FEG 系统具有象差和电子衍射所致。假定第一、二级级所加的电位分别为 V_1 和 V_2 ,则可以证明,由电子横向速度引起的虚源半径为^[10,11]

$$r_0 = A\alpha\beta r \quad (5)$$

其中

$$\alpha = \sqrt{\frac{V_2 L_1}{V_1 L_3}} + \frac{2\sqrt{V_1 V_2}}{(V_2 - V_1)} \left(\sqrt{\frac{V_2}{V_1}} - 1 \right) \frac{L_2 - L_1}{L_3} + \frac{L_3 - L_1}{L_3} \quad (6)$$

$$A = \left[\frac{D}{2eV_2} \left(1 + \frac{\sqrt{eV_2\phi}}{e\epsilon\alpha\beta r} \right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$D = h e \epsilon / [4\pi \sqrt{2m\phi} t(y)] \approx 9.76 \times 10^{-9} \epsilon / \sqrt{\phi} \quad (8)$$

这里 h 为普朗克常数; β 为修正系数,其值在 1.5 至 2 之间。

由 FEG 系统的球差、色差和衍射引起的虚源半径为^[12]

$$\Delta r_s = C_s \theta^3 / 4 \quad (9)$$

$$\Delta r_c = C_c \theta \Delta V / V \quad (10)$$

$$\Delta r_a = 0.7503 \times 10^{-7} / (\theta \sqrt{V_2}) \quad (11)$$

其中 C_s , C_c 为球差和色差系数,其值为

$$C_s = 3.0\nu + 0.1 \quad (\text{mm}) \quad (12)$$

$$C_c = 1.59 \times 10^{-3} (1.46 - 0.19\nu) r^{-0.9} V_1 / \epsilon \quad (13)$$

这里的 ν 和 γ 为尖端形状系数,其值可查表^[13]。在我们实验条件下: $\nu = 0.15$, $\gamma = 3$, $\Delta V / V = 1 \times 10^{-4}$ 。

综合上述 FEG 的实际虚源半径为

$$r_e = (r_0^2 + \Delta r_s^2 + \Delta r_c^2 + \Delta r_a^2)^{1/2} = A\alpha G\beta r \quad (14)$$

其中

$$G = \left[1 + \left(\frac{C_s \theta^2}{A\beta r} \right)^2 + \left(\frac{C_c \Delta V}{\beta r V} \right)^2 + \left(\frac{0.7503 \times 10^{-7}}{(\alpha A)^2 \beta r \sqrt{V_2}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

由此可见,从尖端表面同一点发射出来的电子打到荧光屏上时,已不可能汇为一点,而是形成一个散射圆。假定该圆直径为 d ,其上的电流为 I' ,则按 FEG 阴极的亮度定义可表示为

$$B_e = I' / (\pi r_e^2 \pi \theta^2) \quad (16)$$

其中 θ 为电子束半锥角,它与 d 和 L_3 之间的关系为

$$\theta = d / (2L_3) = \alpha A \quad (17)$$

假定从尖端发出并打在荧屏上的电流的分布是均匀的,屏上电子束图象半径为 b ,发

射电流为 I , 则不难证明 I 与 I' 之间的关系为

$$I' = I\pi d^2 / (4\pi b^2) = I(\alpha AL_3/b)^2 \quad (18)$$

将(14),(17)和(18)式代入(16)式, 则 B_e 为

$$B_e = I / [(\pi\beta r)^2(\alpha AGb/L_3)^2] \quad (19)$$

由此可见, 只要精确测量 V_1, V_2, I 和 b 值, 就可以由上式确定出 FEG 的虚源半径, 电子束半锥角和亮度。

测试时将第一、二阳极分开。先对尖端进行闪烁, 调整第一阳极电压 V_1 为 2.6kV, 使发射电流为 $0.2\mu A$ 。然后再测出在不同加速电压 V_2 下荧光屏上束斑 b 的大小。作出 b, r_e 和 B_e 与加速电压 V_2 之间的关系曲线, 如图 6 和图 7 所示。

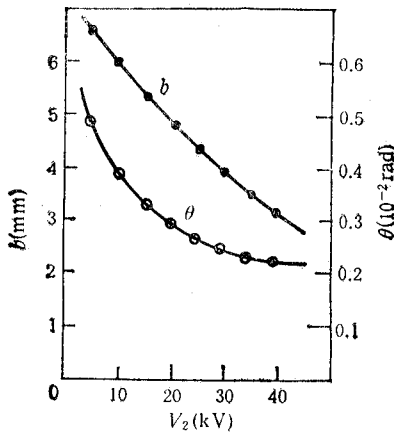


图 6 b, θ 与加速电压 V_2 之间的关系

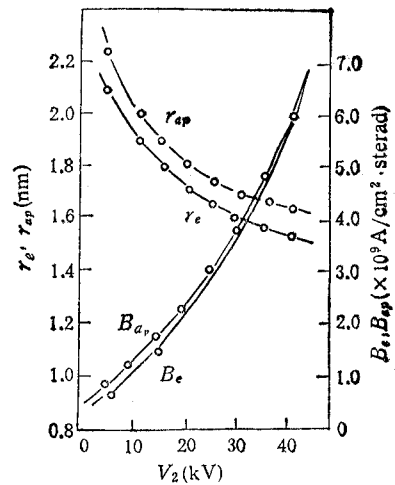


图 7 由实验测定的 r_e, B_e 与由球-锥面模型计算得的 r_{ep}, B_{ep} 之间比较

为检验测试结果的可靠性, 我们用上述实验结果与目前在描述场发射方面一致公认较为成功的球-锥面模型^[14]进行了比较。结果如图 6 和图 7 所示。从图可见, 两者基本上是一致的。

五、结 束 语

从实验和分析中可看到, W[111]尖端三极 FEG 具有以下特点:

(1) 在加速电压为 30 kV 的条件下, 该电子枪的虚源半径(即电子有效发射束斑)为 1.6nm; 相应的亮度为 3.8×10^9 A/cm 2 sterad。若进一步提高加速电压, 则 r_e 还会减小, 而 B_e 会更大。可得到较理想的点状电子源。

(2) 在枪室真空为 5×10^{-7} Pa, 尖端经多次闪烁处理, 其发射电流为 $1.0\mu A$ 时, FEG 束流稳定性为 5%(10mm 内), 所以说工作是稳定的。

具有这些特点的 FEG, 显然, 将在 SEM, STEM, 电子束曝光机和俄歇电子谱仪中得到具体的应用。

参 考 文 献

- [1] A. V. Crewe et al., *J. Appl. Phys.*, **39**(1968) 13, 5861—5868.
[2] A. V. Crewe et al., *Science*, **168**(1970) 39, 1338—1340.
[3] A. Tonomura et al., *J. Electron Microscopy*, **22**(1973) 1, 141—146.
[4] G. Bining et al., *Appl. Phys. Lett.*, **40**(1982) 2, 178—180.
[5] G. Bining et al., *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982) 1, 57—61.
[6] 杨德清等, 微细加工技术, 1988 年, 第 1 期, 第 30—34 页。
[7] 杨德清等, 云南大学学报(自然科学版), **10**(1988)2, 167—171。
[8] 刘学恣, 阴极电子学, 科学出版社, 北京, 1980 年, 第 258 页。
[9] 杨德清等, 电子科学学刊, **12**(1990)6, 660—665。
[10] 杨德清等, 微细加工技术, 1991 年, 第 1 期, 第 14—19 页。
[11] 陆家和等, 表面分析技术, 电子工业出版社, 北京, 1987 年, 第 98 页。
[12] 唐天同, 应用带电粒子光学引论, 西安交通大学出版社, 西安, 1986 年, 第 322—324 页。
[13] 唐天同, 应用带电粒子光学引论, 西安交通大学出版社, 西安, 1986 年, 第 317 页。
[14] C. Wiener et al., *J. Appl. Phys.*, **44**(1973) 5, 2140—2148.

OPERATING CHARACTERISTICS FOR A FIELD EMISSION GUN WITH W[111] TIP

Yang Deqing Chen Ergang

(Yunnan University, Kunming 650091)

Abstract The fabrication method of W[111] tip and the operating characteristics of a field emission gun (FEG) which consists of W[111] tip, first and second anodes are reported. Experimental results show that on condition that the vacuum in the gun chamber is better than 5×10^{-7} Pa and acceleration voltage is 30kV, the finite radius of the virtual source of the FEG is 1.6nm, and the brightness of FEG is estimated as 3.8×10^9 A/cm². sterad; on condition that the field emission current is 1 μ A, the stability of beam current is better than 5% in 10 min. It is able to be used in scanning electron microscopes and electron probe system etc.

Key words Field emission gun; W[111] tip; Finite radius of the virtual source; Brightness of FEG; Stability of beam current