

提高 Spindt 型场发射冷阴极阵列 发射均匀性的方法*

张友渝 江泽流 宗婉华 王文喜 张大立 王民娟

(河北半导体研究所 石家庄 050051)

摘要 本文提出采用栅孔直径整匀法以及改进的纵向高阻 Si 镇流电阻法, 提高了 Spindt 型场发射冷阴极阵列的发射均匀性

EEACC: 2560Z, 2320, 2340E

1 引言

Spindt 型场发射冷阴极阵列(FEA)是一种阴极电流密度很高的冷阴极。它也是真空微电子器件(场发射真空平板显示器、微波真空微电子器件、真空微电子传感器等)较为理想的电子源。进一步提高场发射冷阴极阵列的电流密度及降低栅极阈值电压仍然是目前真空微电子学研究的主要领域之一。

实践表明, 在一定的栅极提拉电压 V_{gs} 下, 场发射冷阴极阵列的阴极电流并不与阵列的大小成正比。一般认为, 在成千上万个尖锥组成的 Spindt 型场发射冷阴极阵列中, 只有一部分尖锥发射电子^[1,2]。这种发射电流不均匀现象, 一方面, 限制了场发射冷阴极阵列的阴极电流及阴极电流密度的提高。另一方面, 阵列中个别尖锥发射电流过大, 也是引起场发射冷阴极阵列烧毁的原因之一^[3]。因此, 解决场发射冷阴极阵列内各单元电子均匀地发射成为提高阴极电流密度及可靠性的关键和难点。

图 1 给出场发射冷阴极阵列(FEA)的结构示意图。根据金属场发射的 Fowler-Nordheim 理论^[4], 场发射冷阴极阵列中, 第 j 个尖锥的发射电流可以用公式表达为

$$i_j = \frac{1.54 \times 10^{-6} \epsilon_j^2}{\Psi} \exp\left(-\frac{6.83 \times 10^7 \Psi^{3/2}}{\epsilon_j} \theta(3.39 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\Psi}})\right) \quad (1)$$

$$\epsilon_j = \beta_j V_{gkj} \quad (2)$$

* 国家自然科学基金资助项目

张友渝 男, 1941 年出生, 高级工程师, 从事真空微电子学研究

江泽流 男, 1939 年出生, 高级工程师, 从事微细加工技术研究

宗婉华 女, 1955 年出生, 工程师, 从事超高速 GaAs 单片数字电路研究

1997-03-29 收到, 1997-06-10 定稿

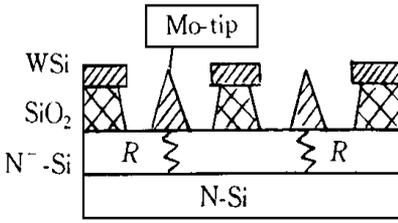


图 1 FEA 结构示意图

其中 s_j 为尖锥顶部的有效发射面积; ϵ_j 是尖锥顶部的电场强度; Ψ 为尖锥金属的功函数, $\theta(y)$ 是 Nordheim 函数; V_{gkj} 为栅-尖锥之间的电压; β_j 为场强倍增因子, 它的大小取决于栅-尖锥之间的几何结构和尺寸. 由(1)式和(2)式, 可以看出, 产生场发射冷阴极阵列 (FEA) 内各单元发射电流不均匀的原因是:

1. 场发射冷阴极阵列各单元的几何尺寸不可能绝对地均匀一致 (栅孔直径的大小、尖锥曲率半径及尖锥高度等的起伏). 而尖锥顶部的场强与该发射单元的几何尺寸密切相关, 该单元的发射电流又是尖锥顶部场强的指数函数. 因此各发射单元之间, 微小的几何尺寸方面的差别, 将导致发射电流的巨大差异.

2. 尖锥顶部表面状态的差异 (晶粒的大小, 晶面指向分布, 表面吸附等) 产生尖锥顶部有效功函数的起伏, 而场发射电流对于尖锥顶部表面的有效功函数的值又是十分敏感. 因此, 尖锥顶部表面状态的差异, 也是造成场发射冷阴极阵列发射不均匀的原因之一.

Itoh 等人^[5]指出, 在一定的尖锥成型工艺条件下, 尖锥高度和尖锥顶的曲率半径均与栅孔直径有关. 由于光刻版图的不均匀性及光刻工艺过程本身引入栅孔直径的起伏, 将导致尖锥高度和尖锥顶的曲率半径的不均匀. Bestui 等人^[6]为了克服光刻圆阵列图形直径的分散, 人为地采用由直径分别为 1.00、1.05、1.10 和 1.15 μm 的子阵列组成的圆阵列光刻掩模, 以克服光刻工艺过程本身引入的圆阵列直径的起伏. 虽然这种方法可以确保每个子阵列总有一个尖锥正常发射电子, 提高了整个场发射冷阴极阵列发射的均匀性, 但确降低了整个阵列的点阵密度.

Borel 等人^[7]和 Meyer^[8]分别提出采用纵向和侧向串联电阻法, 以改善阴极阵列内各单元之间发射电流的均匀性. Itoh 等人指出^[9], 采用侧向串联电阻法时, 由于电流路径的不同, 与各个尖锥串联的电阻其阻值与尖锥在阵列中的位置有关. 此外, 与侧向串联电阻连接的金属互连网格需要占据一定的面积, 降低了阵列点阵密度, 这对进一步提高阴极阵列的电流密度十分不利.

为此, 一方面, 我们采用栅孔直径整匀术, 改善栅孔直径本身的均匀性以及尖锥高度和尖锥顶部曲率半径的均匀性, 以便减少各发射单元伏安特性曲线的分散. 另一方面, 为进一步提高阴极阵列内各单元之间发射电流的均匀性, 我们在每一个尖锥下制作一个纵向串联电阻 R . Levine^[10]指出, 当采用微米量级厚度的电阻层时, 由于侧向串联电阻的电长度较纵向串联电阻长, 侧向串联电阻的热击穿和电击穿强度均高于纵向串联电阻, 因此认为侧向串联电阻法优于纵向串联电阻法. 为了克服纵向串联电阻法的这个缺点, 我们采用了几十微米厚的高阻 Si 作为纵向串联电阻层. 采用纵向串联电阻结构, 不需要设置与之互连的金属网格. 因而在点阵间距一定的条件下, 可获得最高的点阵密度. 而且各个纵向串联电阻的阻值均匀一致. 此串联电阻产生的电流负反馈作用, 可进一步改善阵列内各单元之间发射电流的均匀性.

2 实验原理

2.1 栅孔直径整匀法

图 2(见图版 D)给出了采用倾角旋转蒸发法提高栅孔直径均匀性的原理图 W Si 栅金属层上的 SiO₂ 作为补偿层 首先,在 SiO₂ 层上用光刻法制作栅孔阵列图形 假设其孔径分布为高斯分布,如图 3 所示 SiO₂ 层上直径为 φ 的圆孔的概率 $p_1(\varphi)$ 为

$$p_1(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} \exp\left(-\frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (3)$$

其中 φ_j 为阵列中第 j 个圆孔的直径; φ_0 为圆孔直径的平均值; σ_1 为方差 然后,采用倾角为 θ 的旋转蒸发法,在片子上蒸发薄的 Ni 层 ($< 0.1\mu\text{m}$), θ 角的取值为

$$\theta = \arctg(\varphi_0/h) \quad (4)$$

其中 h 为 SiO₂ 补偿层的厚度 对于 SiO₂ 上一个孔径为 φ ($\varphi > \varphi_0$) 的圆孔,在以倾角为 θ 的旋转蒸发 Ni 层之后,未被 Ni 蒸发层复盖的小孔直径为 φ_2 , 则 φ_2 的值为:

$$(\varphi + \varphi_2)/2 = h \text{tg}(\theta) \quad (5)$$

$$\varphi_2 = 2h \text{tg}(\theta) - \varphi = 2\varphi_0 - \varphi \quad (6)$$

$$\varphi_0 - \varphi_2 = \varphi_0 - (2\varphi_0 - \varphi) = \varphi - \varphi_0 \quad (7)$$

由(7)式可知,凡直径大于 φ_0 的 SiO₂ 圆孔,在蒸发 Ni 层之后,W Si 栅金属裸露部分的直径为 φ_2 在图 3 中, φ_2 的位置正是以 φ_0 为对称轴时 φ 的对称点 对于 $\varphi < \varphi_0$ 的 SiO₂ 孔,则 φ_2 仍等于原孔径 φ 因此,在倾斜蒸发 Ni 层之后,用 Ni 层作掩蔽层刻蚀出的 W Si 栅孔阵列,其直径的分布类似于截断的半高斯分布:

在 $0 < \varphi < \varphi_0$ 区域内,

$$p_2(\varphi) = \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} \exp\left(-\frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (8)$$

在 $\varphi > \varphi_0$ 区域内

$$p_2(\varphi) = 0 \quad (9)$$

显然,这种分布提高了场发射冷阴极阵列栅孔直径的均匀性

通常 Spindt 场发射冷阴极阵列的尖锥是以栅孔为模板,采用自封闭尖锥成形法制作的 所以,尖锥高度和尖锥顶的曲率半径不仅与所采用的工艺设备和工艺条件有关,而且与栅孔直径 φ 栅金属的厚度 t 以及 SiO₂ 介电隔离层高度有关 因此,在一定的栅金属厚度 t 和 SiO₂ 介电隔离层高度 H_0 情况下,我们可以假设尖锥顶的曲率半径 r_j 与 φ 栅孔直径成正比:

$$r_j = \eta\varphi \quad (10)$$

根据文献[11],尖锥顶的场强可以近似地表示为:

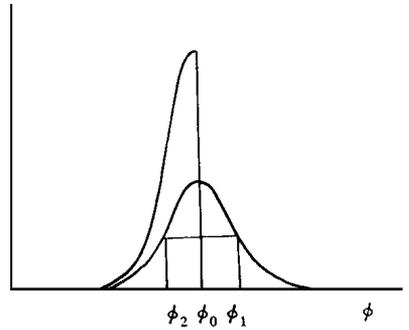


图 3 SiO₂ 光刻窗口直径 φ 的分布图

$$\epsilon_j = \frac{\pi V_{gkj}}{r_j \ln(4\phi_j/t)} \tag{11}$$

其中 t 为栅金属的厚度 阴极电流 I 可以表达为:

$$I = \sum_{j=1}^n p(\phi) i_j(\phi) \tag{12}$$

其中 n 是场发射冷阴极阵列的点阵数 由于一般场发射冷阴极阵列的 n 值很大, 所以(12)式可以近似地表达为

$$I = \int_0 p(\phi) i_j(\phi) d\phi \tag{13}$$

根据(1)~(3)式和(8)~(13)式, 根据我们所用的光刻掩模 光刻设备和工艺条件, 我们取常数 $\phi = 0.8\mu\text{m}$ 、 $\sigma = 0.05\mu\text{m}$ 、 $\Psi = 4.1\text{eV}$ 、 $\eta = 0.0125\mu\text{m}$ 、 $t = 0.25\mu\text{m}$ 、 $n = 2500$ 代入上述

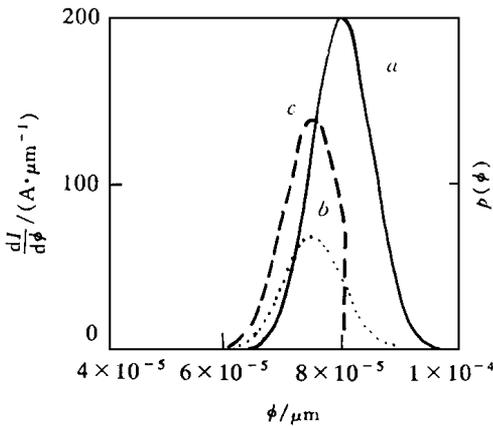


图 4 FEA 阴极电流分布图

各式, 可以得到场发射冷阴极阵列中所有栅孔直径为 ϕ 单元的发射电流之和 I_E 与栅孔直径的关系(图 4). 图 4 中, 曲线 a 为栅孔直径的高斯分布曲线 $p_1(\phi)$; 曲线 b 表示栅孔直径 ϕ 为高斯分布时的 $np_1(\phi) i_j(\phi)$ 与 ϕ 关系. 曲线 c 表示栅孔直径 ϕ 为截断的半高斯分布时 $np_2(\phi) i_j(\phi)$ 与 ϕ 的关系. 曲线 b 和曲线 c 所包围的面积分别表示栅孔直径为高斯分布和栅孔直径为截断的半高斯分布时的阴极电流. 从图 4 中可以看出, 曲线 c 所包围的面积比曲线 b 所包围的面积大, 而且栅孔直径大于 ϕ 的单元对阴极总电流的贡献甚少. 这说明采用栅孔整匀法可以提高阴极电流和阴极电流密度.

粗略地讲, 假设栅孔直径 $\phi > \phi$ 的单元不发射电子, 而只有栅孔直径 $\phi < \phi$ 的单元发射电子, 那末, 经过栅孔整匀之后, 栅孔直径 $\phi < \phi$ 的单元数将增加约一倍. 因此, 在同样栅压 V_g 下, 阴极电流最大可增加约一倍.

2.2 Si 电阻的镇流原理

为了进一步提高阵列内各发射单元发射电流的均匀性, 在发射极尖锥下设置一个高阻 Si 层, 作为每个阴极尖锥与地之间的串联电阻. 图 5(见图版 1) 给出阵列内各个发射单元的伏安特性曲线的示意图. 当栅-阴之间电压 V_{gs} 为一定值时, 各个发射单元的发射电流分别为 i_j , 则在电阻 R 两端的电压为 $i_j R$. 在各个栅-尖锥之间的电压为 V_{gkj} , 则有 V_{gs}

$$V_{gs} = V_{gkj} + iR \tag{14}$$

$$i_j = \frac{V_{gs} - V_{gkj}}{R} \tag{15}$$

因此, 在图 5 中, 斜率为 $-1/R$ 的直线 a 与各个发射单元的伏安特性曲线交点的纵坐标即为各个发射单元的发射电流 i_j , 阴极的总电流 I 应为:

$$I = \sum_{j=1}^n i_j \tag{16}$$

其中 n 为阵列的点阵数

由图 5 可以看出, 引入串联电阻 R , 明显地减少了各个发射单元之间的发射电流的差

异也限制了个别单元发射过大的电流。当串联电阻 R 的值越大, 则各个发射单元之间的发射电流的差别越小。但是过大的 R 值将过分地减少 V_{gk} 的值。因此选择适当的串联电阻 R 的值, 是十分重要的。

3 实验方法

实验样品采用 N^+ / N^+ 硅外延片, 外延高阻 N^+ 层作为纵向电阻。其电阻率 $\rho = 300 \Omega \cdot \text{cm}$, 厚度为 $60 \mu\text{m}$ 。厚度 $0.86 \mu\text{m}$ 的热氧化法生长的 SiO_2 层, 作为栅-阴之间的介质隔离层。采用磁控溅射法, 在热氧化法生长的 SiO_2 上, 淀积 $0.25 \mu\text{m}$ 厚的 W/Si 合金层和 $0.275 \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 层。 W/Si 合金层作为栅金属, W/Si 上的 SiO_2 作为光刻的补偿层。采用接触式曝光法和 RIE 干法刻蚀工艺, 在 SiO_2 层上光刻出栅孔阵列图形。在小样品上, 用扫描电镜测定 SiO_2 层上圆孔直径的平均值 \bar{D} , 确定旋转蒸发的倾角 θ 。然后, 在电阻加热蒸发台内, 倾角旋转蒸发 Ni 。以 Ni 层作为掩蔽层, 用 RIE 干法刻蚀工艺, 在 W/Si 层上刻蚀出栅孔阵列。以 W/Si 为掩膜, 用缓冲 HF 酸溶液, 将 W/Si 栅孔内的 SiO_2 介质隔离层腐蚀干净(补偿层同时也被腐蚀干净)。倾角旋转蒸发 Al 牺牲层, 再淀积 Mo 金属尖锥。最后, 用盐酸溶液剥离掉 W/Si 层上的 Mo , 制成 Spindt 型场发射冷阴极阵列。

4 实验结果

图 6(见图版 D) 给出采用本文的两种技术和未采用两种技术制作的 Spindt 型 FEA 伏安特性的比较。由图 6 可以看出, 用常规 Spindt 法制作的 FEA, 在同样的 V_{gs} 下, 其电流较小, 而用本法制作的 FEA, 电流较大; 由于用本法制作的 FEA, 存在串联电阻, 所以其伏安特性的微分电阻较前者大。测定每组阵列的电特性, 其伏安特性一致性较好。在栅压 40 伏下, 阴极电流为 1mA , 阴极电流密度达 $1.6 \text{A}/\text{cm}^2$ 。未采用上述两种方法的样品, 阴极电流密度仅为 $0.5 \sim 0.8 \text{A}/\text{cm}^2$, 这说明采用上述两种技术可以提高阴极阵列的发射均匀性。图 7(见图版 D) 给出整匀后刻蚀的 W/Si 栅孔阵列的 SEM 显微照片, 其栅孔直径为 $0.8 \mu\text{m}$, 栅孔间距为 $5 \mu\text{m}$, 阵列大小为 50×50 点阵密度为 $4 \times 10^6/\text{cm}^2$ 。图 8(见图版 D) 给出用本法做成的 Spindt 型场发射冷阴极阵列的剖面图(W/Si 栅上的 Mo 层还未被剥离掉)。

参 考 文 献

- [1] N. A. Cade *et al* , "Studies into the emission uniformity of large silicon field emitter array", VMC '94, Technical Digest, Grenoble, France, 1994, p. 338~ 341.
- [2] A. Ghis *et al* , IEEE Trans on Electron Devices, 1991, **38**(10): 2320~ 2322.
- [3] F. Charbonnier, "Breakdown in conventional and vacuum microelectronics field emission devices", VMC '96, Technical Digest, St Petersburg, Russia, 1996, 10~ 18.
- [4] R. H. Fowler and L. W. Nordheim, Proc Roy. Soc., ser A, 1928, **119**: 173.
- [5] S. Itoh *et al* , "Experimental study of field emission properties of the Spindt-type field emitter", VMC '94, Technical Digest, Grenoble, France, 1994, 217~ 220.

- [6] K. Betsui *et al* , "64X32-matrix silicon field emitter array", *VMC '93*, Technical Digest, Newport, Rhode Island, 1993, 137~ 138
- [7] Michelle Borel, Jean-Francois Borenat, Robert Meyer and Phillippe Rambaud, French Patent, No. 2, 623, 013, May 12, 1989
- [8] Robert Meyer, French Patent, No. 2, 663, 462, December 20, 1991
- [9] S. Itoh *et al* , "A new structure of field emitter arrays", *VMC '95*, Technical Digest, Portland Oregon, U SA, 1995, 99~ 101
- [10] J. D. Levine, "Benefits of the lateral resistor in FED", *VMC '95*, Technical Digest, Portland Oregon, U SA, July 12~ 15, 1995, 67~ 71
- [11] K. L. Jensen *et al* , "Analytical and semi-numerical for gated FEA's", *VMC '95*, Technical Digest, Portland Oregon, U SA, 1995, 216~ 219

Homogenization of Field Emission for Spindt-Type FEA

Zhang Youyu, Jiang Zheliu, Zong Wanhua, Wang Wenxi,
Zhang Dali, Wang Minjuan

(Hebei Semiconductor Institute, Shijiazhuang 050051)

Received 29 March 1997, revised manuscript received 10 June 1997

Abstract Two techniques to homogenize field emission of Spindt-type FEA have been presented. One method is based on vertical Si resistor in series with microtips, the other is to uniform gate hole diameter of Spindt-type FEA.

EEACC: 2560Z, 2320, 2340E