

双栅极场发射阵列的特性模拟与设计¹

庄学曾 夏善红 陶新昕

(中国科学院电子学研究所 传感技术国家重点实验室 北京 100080)

摘 要 具有聚焦能力的双栅极场发射阵列 (DGFEA) 是两类最有发展前途的真空微电子器件 (高分辨率场发射显示器和真空微电子微波、毫米波器件) 的关键技术。本文简要比较了两种结构的 DGFEA 的主要性能和优缺点, 叙述了双层栅极结构 DGFEA 的设计与模拟方法。从模拟计算获得的发射特性和聚焦性能可以看到: 这种结构的 DGFEA 能获得几乎平行的场发射电子束, 其最大发射电流密度可达到约 $500\text{A}/\text{cm}^2$ 以上, 是发展真空微电子微波、毫米波器件和其它强流电子注器件等较理想的电子源。

关键词 真空微电子器件, 双栅极场发射阵列, 模拟计算, 微波器件, 毫米波器件

中图分类号 O462.4, TN10, TN4

1 引 言

真空微电子学, 从七、八十年代主要针对场发射阵列 (FEA) 的设计、制备与发射能力的研究和相应器件的原理性研究, 至 90 年代已进入全面发展真空微电子器件为主导的新阶段。这些器件对 FEA 的性能提出新的要求, 促进了 FEA 的研究和发展^[1]。具有聚焦能力的双栅极场发射阵列 (DGFEA) 即是一种重要的新型、高性能 FEA。虽然 Fraser 在 1973 年就已经提出了一种具有多层栅极的“指向性微型电子束源”^[2], 但具体的研究工作却是最近几年的事, 并成为真空微电子学的一个重要研究课题。

2 双栅极场发射阵列 (DGFEA)

通常的 FEA 只有 1 个栅极, 其发射尖锥表面的等位面强烈弯曲, 使发射的电子具有相当可观的横向速度, 电子束将以较大的发散角飞向阳极 (图 1)。这种单栅极 FEA 不适用于发展高分辨率、高画面质量的场发射显示器 (FED), 更难以用来形成精密的强流电子注 (例如应用于微波、毫米波器件等)。DGFEA 是解决这一困难的优先方案^[3,4]。DGFEA 的每一个发射尖锥上方具有两个同心的栅极, 形成静电透镜系统, 可有效地抑制电子的横向速度。图 2 给出了 DGFEA 的两种结构形式: 同平面双栅极聚焦方式, 和双层栅极聚焦方式 [或被分别称作同心聚焦 (Concentric Focus, CF) 方式和孔径聚焦 (Aperture Focus, AF) 方式]。AF 式 DGFEA 的聚焦性能较好, 设计和制备良好的这种 DGFEA 能提供基本上平行的电子束, 其缺点是驱动电压较高 (获得相同发射电流时比单栅极 FEA 的栅极电压高出 10-30%), 而且制备工艺相对复杂一些。CF 式 DGFEA 的优点是栅极电容较小、驱动电压较 AF 式低、制备工艺相对简单、聚焦栅极无截获电流等; 缺点是聚焦性能比 AF 式差, 为保证聚焦栅极与控制栅极间的耐压强度, 每一发射单元占用了较大面积, 使阵列的尖锥密度减小许多, 降低了发射能力。因此, CF

¹ 1997-01-15 收到, 1997-04-25 定稿

式 DGFEA 适用于对发射能力要求不高、电子行程不大的器件 (如 FED, 它要求的发射电流密度约小于 $0.2\text{A}/\text{cm}^2$ 、电子行程 $0.1\sim 1\text{mm}$)。一种基于 CF 方式的“象素聚焦”设计可望应用于高分辨率 FED^[4]。微波、毫米波真空微电子器件对固态器件的竞争优势, 在于其工作频率高、功率容量大和抗恶劣环境能力强等。这类器件需要利用强流、长程和精细的电子注, 即要求其 FEA 具有较高的发射能力和很小的横向电子速度^[5]。因此双层栅极的 DGFEA 就成为发展这类器件的关键技术之一。本文将以这种 DGFEA 为例, 利用 CAD 方法对其发射特性和聚焦性能进行分析研究, 并确定一种较实际可行的 DGFEA 设计。

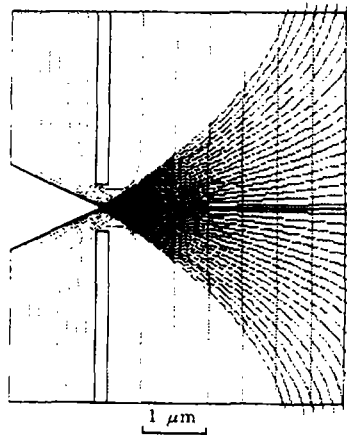


图 1 单栅极 FEA 单元电子束的散焦情况
 $R_t = 20\text{nm}$, $V_g = 180\text{V}$, $V_a = 40\text{V}$

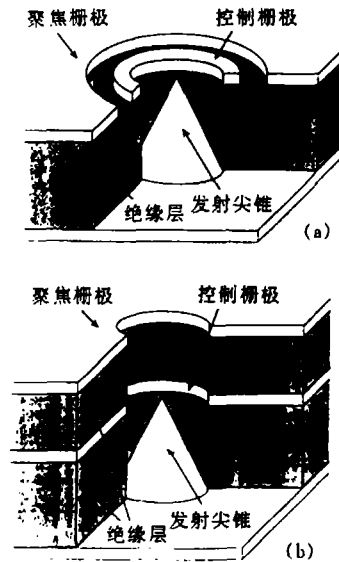


图 2 两种不同结构的 DGFEA
(a) 同平面聚焦方式 DGFEA
(b) 双层栅极聚焦方式 DGFEA

3 设计考虑

FEA 的设计是以其“发射单元”为基础的, 发射单元通常由一个发射尖锥和一个与其同心的圆孔栅极组成。通过模拟计算, 可了解发射单元的各几何参量对其发射特性的影响。进而根据对 FEA 发射能力的要求以及制备工艺上的可行性, 确定其发射单元的几何形状与相关尺寸和尖锥间距等设计参量。DGFEA 的设计过程与 FEA 基本相似, 其特点是在发射单元中原有栅极 (现称为控制栅极 G_1) 的上方增加了一个聚焦栅极 G_2 (见图 2), 因而需要重点研究 G_2 对发射特性和聚焦性能的影响。

应用于真空微电子微波、毫米波器件的 DGFEA 需要具备三个基本条件: 足够大的发射能力、提供平行的电子束 (很小的横向电子速度) 和工作稳定、可靠。合理选择 DGFEA 的各几何参量以满足上述要求, 是设计工作的重要内容。控制栅孔径 D_{g1} 和发射尖锥顶端的曲率半径 R_t 是决定 DGFEA 发射能力的两个关键参量。如果要求 DGFEA 提供 $5\text{A}/\text{cm}^2$ 的发射电流密度, 当尖锥间距为 $5\mu\text{m}$ 时, 则平均每一尖锥的发射应大于 $1.25\mu\text{A}$ 。 G_2 的引入将降低 FEA 的发射能力, 因此可设定 $D_{g1} = 1\mu\text{m}$, $R_t = 20\text{nm}$ 。虽然 G_2 的主要功能是使电子束收敛, 但其孔径 D_{g2} 和它与 G_1 的间距 H_{g2} 对发射能力和栅极截获具有明显的影响。为获得较大的发射和减小

截获, 可选择 $D_{g2} = 2D_{g1}$ 。为了便于对 DGFEA 的聚焦性能进行调节, 聚焦栅极电压 V_{g2} 应略高于尖锥电位 (如 $V_{g2} = 3V$)。以这些参量为出发点, 借助模拟计算程序可得到 DGFEA 的发射特性和电子轨迹图, 调节某些参量, 直至获得满足上述 3 项条件的 DGFEA 的较理想设计。根据这一思路选定了如下初始参量 (图 3):

尖锥顶端曲率半径	$R_t = 20\text{nm}$,	尖锥高度	$H_t = 1.5\mu\text{m}$,
控制栅极孔径	$D_{g1} = 1\mu\text{m}$,	聚焦栅极孔径	$D_{g2} = 2\mu\text{m}$,
控制栅极厚度	$\delta_1 = 0.2\mu\text{m}$,	聚焦栅极厚度	$\delta_2 = 0.2\mu\text{m}$,
尖锥半顶角	$\theta/2 = 30^\circ$,	两个栅极间距	$H_{g2} = 0.9\mu\text{m}$,
逸出功 (Si)	$\phi = 4.2\text{eV}$,	聚焦栅极电压	$V_{g2} = 3V$,
相对介电常数 (SiO_2)	$\epsilon_r = 3.9$.		

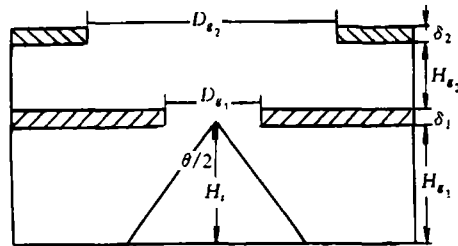


图 3 双层栅极结构 DGFEA 平面尺寸图

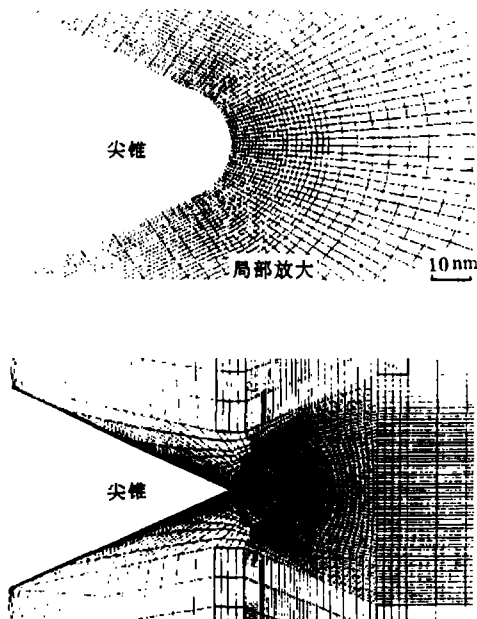


图 4 DGFEA 发射单元的网格分割情况

4 模拟方法

DGFEA 计算机辅助设计的核心是一整套模拟计算的方法和相应的 CAD 程序, 主要包括: 合理地划分网格, 求解空间电位分布, 计算尖锥顶端各部分的场发射电流, 并求出相应的电子轨迹等。

由于 FEA 独特的几何形状, 场致发射集中在尖锥很微小的顶端 (弧线长度约为 20nm 或更短), 而整个模拟计算的区域约为 $5000 \times 5000\text{nm}^2$ 。为了进行有效、准确的计算, 需要特殊的网格分割方法和相应的网格生成程序。我们采用最新的“坐标映射和网格密度函数法”^[6], 将计算区域有效地分割为疏密相差大、又能较平滑过渡的 50×50 个网格, 最小网格的宽度约 0.9nm (可根据需要继续分割得更为细密), 最大为 200nm (见图 4), 在保证计算准确性的同时, 极大地节省了计算时间。

计算考虑空间电荷影响的电位分布, 需要求解泊松方程

$$\nabla^2 U = -\rho/\epsilon, \quad (1)$$

其中 U 为电位, ρ 为空间电荷密度 (等于该点的电流密度 j 与电子速度 v 之比, $\rho = j/v$), ϵ 为介电常数。采用有限元法, (1) 式在轴对称系统中相应的泛函可表达为

$$F(U) = \iint \{(\epsilon_0/2)[(\partial U/\partial z)^2 + (\partial U/\partial r)^2] - \rho U\} 2\pi r dz dr, \quad (2)$$

使 (2) 式中的泛函取极值, 就得到泊松方程的解^[7], 即电位分布, 进而可求得发射表面各点的电场。

场发射电流密度 $J_{FN}(\text{A}/\text{cm}^2)$ 采用 Fowler-Nordheim 公式进行计算

$$J = \{(e^3 E^2)/[8\pi h \phi \cdot t^2(y)]\} \cdot \exp\{-[8\pi(2m)^{1/2}/(3he)] \cdot (\phi^{3/2}/E) \cdot v(y)\} \quad (3)$$

式中 $y = [e^3 E/(4\pi\epsilon_0)]^{1/2}/\phi$, 其中 ϕ 为发射尖锥 (例如重掺杂 Si) 的逸出功, ϵ_0 为真空介电常数; $t(y)$ 和 $v(y)$ 为 Nordheim 椭圆函数, 有数值表可查^[8], 在实际计算中它们可近似为^[9]

$$t(y) = 1 + 0.1107y^{1.33}, \quad v(y) = 1 - y^{1.69}.$$

考虑上述要点, 对二阶有限元法的电子枪计算程序 SOGUN^[10] 进行了调整, 用于计算 DGFEA 的发射特性和单元束的电子轨迹图等。

5 计算结果及讨论

利用上面介绍的 CAD 方法和设定的参量, 可计算得到该 DGFEA 的发射特性和聚焦特性。从图 5 可见: 每一尖锥的发射电流 I_e 随控制栅电压 V_{g1} 的变化特性, 与单栅极 FEA 特性的形状相似, 但下降约半个量级左右; 当要求 $I_e = 1.25\mu\text{A}$ 时, V_{g1} 约需 180V, 比相应的单栅极 FEA 高出约 12%。尖锥顶端曲率半径 R_t 对发射特性的影响非常强烈, R_t 从 40nm 减小至 10nm, I_e 将增加近 5 个量级 (见图 6)。计算结果表明聚焦栅极孔径 D_{g2} 和栅极的间距 H_{g2} 对 I_e 的影响, 比 V_{g1} 和 R_t 的影响要弱得多。值得注意的是聚焦栅极电压 V_{g2} 对 I_e 的影响最小 (图 7), 这就为实际应用时调节 DGFEA 的聚焦性能提供了方便。

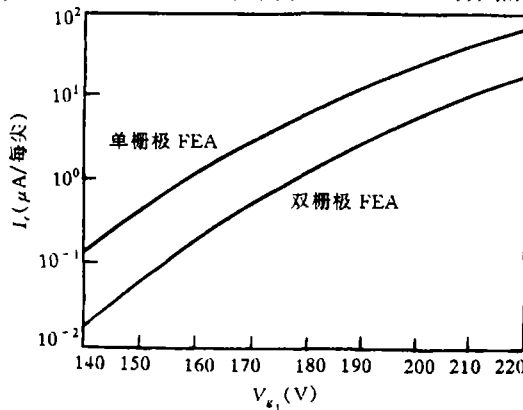


图 5 DGFEA 的直流伏安特性
 $R_t = 20\text{nm}$, $\theta/2 = 30^\circ$, $V_{g2} = 3\text{V}$

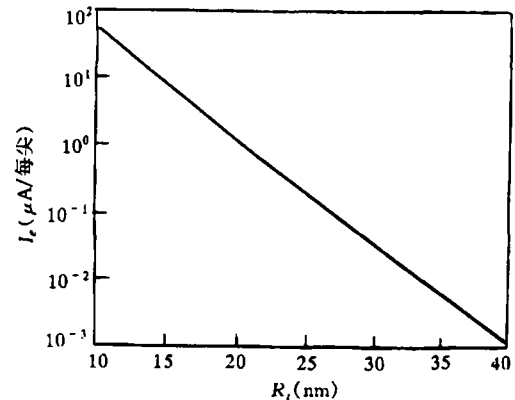


图 6 尖锥顶端曲率半径 R_t 对 I_e 的影响

在应用中, 为避免 DGFEA 栅极击穿短路等现象的发生, 希望 V_{g1} 尽量低一些, 例如 $V_{g1} = 100-120\text{V}$ 。这可用减小 D_{g1} 或 R_t 来有效地实现。从图 8 可见, 修改后的 DGFEA ($R_t = 12\text{nm}$,

$\theta/2 = 15^\circ$) 当 $V_{g1} = 105\text{V}$ 时 I_e 即能达到 $1.25\mu\text{A}$ (图 8)。DGFEA 的发射电流密度 J 还与尖锥密度成正比(即与尖锥间距 D_{tt} 的平方成反比) $J = I_e/D_{tt}^2$ 。当 $D_{g2} = 2\mu\text{m}$ 时, D_{tt} 的最小值宜定为 $3\mu\text{m}$, 相当于该 DGFEA 在 $V_{g1} = 105\text{V}$ 时的最大发射电流密度 J_{\max} 为 $14\text{A}/\text{cm}^2$ 。

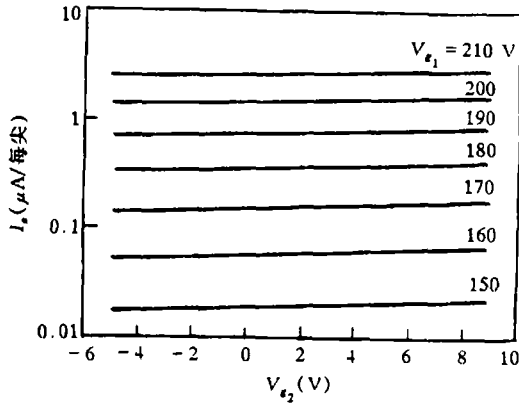


图 7 聚焦栅极电压 V_{g2} 对阳极收集电流 I_a 的影响

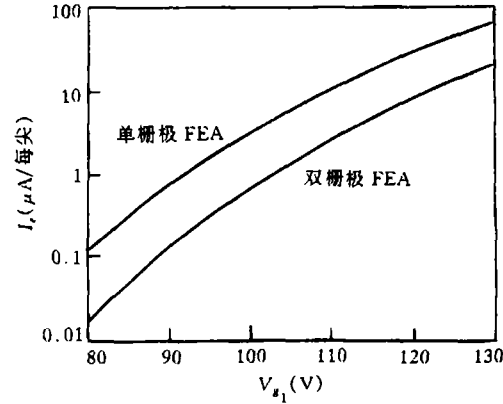


图 8 修改后的 DGFEA 的伏安特性
 $R_t = 12\text{nm}$, $\theta/2 = 15^\circ$, $V_{g2} = 3\text{V}$

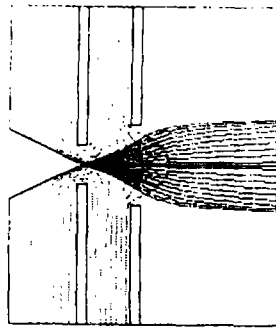


图 9 双层栅极聚焦方式 DGFEA 单元束的电子轨迹图

$$D_{g2} = 2\mu\text{m}, V_{g2} = 3\text{V}, R_t = 20\text{nm}, \\ V_{g1} = 180\text{V}, D_{g1} = 1\mu\text{m}, H_{g1} = 1.5\mu\text{m}, \\ H_{g2} = 0.9\mu\text{m}$$

由上述模拟计算程序获得的 DGFEA 单元束的电子轨迹图, 可定性地评估其聚焦性能。从图 9 可见, 当 $V_{g2} = 3\text{V}$ 时, 该 DGFEA 能获得电子轨迹几乎平行的单元束, 聚焦性能良好; 减小 G_2 孔径, 使 $D_{g2} = 1.6\mu\text{m}$ 时, 单元束外层的电子将朝轴向偏转, 聚焦性能将恶化。此时如将 V_{g2} 调整至 6V , 聚焦性能会得到很大改善, 可见 V_{g2} 对聚焦特性的调节功能相当有效。由 DGFEA 发射的、总的电子束是由均匀排列的所有单元束组成的, 其聚焦性能应考虑各单元束空间电荷的相互影响。严格地说, 这需要利用三维模拟计算程序^[11]。Yasushi Toma 等人对他们制成的

“世界上首例 DGFEA” 样品 (5×5 个尖锥、 $D_{tt} = 20\mu\text{m}$) 的聚焦能力进行了实验研究。在距 DGFEA 20mm 处, 偏置为 5kV 的阳极上获得了束斑图象。通过对该图象的分析估算出: 单元束的发散角约为 0.5mrad , 单元束相互之间几乎没有明显的影响^[12]。

6 结 论

在 FEA 控制栅极的上方增加一同心的聚焦栅极能够显著改善其聚焦性能。本文通过计算机模拟计算, 给出了一种双层栅极结构 DGFEA 的设计尺寸。模拟计算的结果说明: 该 DGFEA 能获得几乎平行的场发射电子束, 其聚焦性能可以通过 V_{g2} 进行有效的调节; 由于聚焦栅极的引入, 该 DGFEA 的发射能力将下降半个量级左右(或 V_{g1} 需提高约 12%), 当将尖锥曲率半径 R_t 从 20nm 减小为 12nm , 尖锥间距为 $3\mu\text{m}$ 的该 DGFEA 将具有 $14\text{--}500\text{A}/\text{cm}^2$ 以上的发射能力(相应的 $V_{g1} = 105\text{--}150\text{V}$)。可见, 该 DGFEA 能够满足发展真空微电子微波、毫米波器件

和其它强流电子注器件等的基本要求。

参 考 文 献

- [1] 庄学曾, 夏善红, 刘光诒. 真空微电子器件的进展和问题. 电子科学学刊, 1997, 19(5): 688-694.
- [2] Fraser D L. Miniature Directed Electron Beam Source. U. S. Patent 3, 753022.
- [3] Mobley R M, Boers J E. Computer simulation of micro-triode performance. IEEE Trans. on ED, 1991, 38(10): 2383-2388.
- [4] Kesling W D, Hunt C E. Beam focusing for field-emission flat-panel displays. IEEE Trans. on ED, 1995, 42(2): 340-347.
- [5] 庄学曾. 真空微电子微波管. 真空电子技术, 1996, (2): 9-15.
- [6] Xia S, Broers A N. Adaptive finite element mesh generation program for electron gun simulation. Int'l J. Numerical Modelling 1995, 8: 109-125.
- [7] 盛剑霓, 等. 电磁场数值分析. 科学出版社, 1984, 第二章, 56-126.
- [8] Good R H Jr, Mueller E W. Field Emission, In "Handbuch der Physik" (Fluace S., ed.), Berlin: Springer-Verlag, Vol.21, 1956, 176.
- [9] Hawkes P W, Kasper E. Principles of Electron Optics, Vol2: Applied Geometrical Optics, Berlin: Academic Press, 1989, 927.
- [10] Zhu X, Munro E M. A computer program for electron gun design using second order finite elements. J. Vac. Sci. & Technol, B, 1989, 7(6): 1862-1869.
- [11] Munro E M, Zhu X, Rouse J A, Liu H. Computer Solution of Vacuum Microelectronic Components. The 7th Int'l Conf. on Vacuum Microelectronics, Grenoble France: 1994, 7: 143-146.
- [12] Yasushi Toma, Seigo Kanemaro, Junji Itoh. Electron-beam characteristics of double-gated Si field emitter arrays. J. Vac. Sci. Technol, B, 1996, 14(3): 1902-1905.

SIMULATION AND DESIGN OF DOUBLE-GATED FIELD EMISSION ARRAYS

Zhuang Xuezheng Xia Shanhong Tao Xinxin

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract One of the crucial technologies for developing high resolution field emitter displays and vacuum microelectronic devices in microwave and millimeter-wave bands is the design and fabrication of field emitter arrays which can provide with focused electron beam. After having a brief discussion of two kinds of double-gated field emission arrays (DGFEA), the concentric focusing (in plane gates) and the aperture focusing (2-tier gates), presented in the paper are the design and simulation methods of the aperture focusing DGFEA, and simulation results about its emission characteristics and focusing performance. It is believed from the results that the DGFEA can produce a pretty parallel electron beam, its maximum emission current density may exceed 300 A/cm^2 , and it meets the major requirements for developing microwave and millimeter-wave devices, and other strong beam devices.

Key words Vacuum microelectronic devices, Double-gated field emission arrays(DGFEA), Simulation computation, Microwave tubes, Millimeter-wave devices

庄学曾: 男, 1939年生, 副研究员, 主要从事毫米波器件与技术和真空微电子器件的研究工作。

夏善红: 女, 1958年生, 博士, 研究员, 现主要从事真空微电子传感器等研究工作。