

真空微电子三极管直流特性及 栅阴极电容的计算机模拟*

秦 明 黄庆安 魏同立

(东南大学微电子中心 南京 210096)

摘要 本文利用有限差分方法计算了真空微电子三极管中的电势与电场分布,研究了尖端顶部的电场受尖端曲率半径及栅圆环直径的影响情况,并模拟计算了该管的静态输出特性。另外通过改变尖锥及栅圆环的参数,详细研究了栅阴电容的变化情况,该模拟结果与已报道的实验结果符合较好。

EEACC: 2340E, 2320

1 引言

真空微电子三极管包括微波管是真空微电子学中一个重要的研究分支。目前已得到了较为广泛的研究^[1~3]。理论预期该器件可工作到几十 GHz 以上^[4], 目前实验上还不能达到这么高的频率。其主要限制是器件的栅阴电容还不能有效地减小。目前从理论上计算该电容的报道主要是 Kosmahl 等借助椭球近似模型的计算结果^[3]。该结果一是表达式复杂, 实际估算时对不同的结构参数每次都需采用级数近似, 因此较繁琐; 二是由于采用的是近似模型, 理论结果本身与实际有一定的误差。另外采用计算机模拟计算三极管静态特性的方法也有一些报道^[5,6], 但很少涉及表征器件在高频下应用的电容效应的计算。本文利用有限差分方法, 模拟计算了垂直型微波三极管的电场和电容特性, 并采用非均匀网格技术使局部细分点网格可达到 1nm 的网格间距, 较好地满足了锥尖处电场计算要求。

2 真空微电子三极管模型

本文采用的真空微电子三极管模型如图 1 所示。图中栅极做成圆环状是为了减少栅阴电容。该结构是关于通过栅环中心和锥尖中心的轴对称的。因此为了便于模拟, 我们沿对称

* 国家自然科学基金和国防科技预研基金资助项目

秦 明 男, 1967 年生, 博士研究生, 目前专业为半导体器件与微电子学

黄庆安 男, 1963 年生, 教授, 目前从事真空微电子学及微机械加工的研究

魏同立 男, 教授, 博士生导师, 目前从事低温微电子学及异质结的研究

1996 年 7 月 5 日收到初稿, 1996 年 10 月 17 日收到修改稿

轴将该图转换成二维结构来分析. 图中假定阴极、栅极及阳极板均是由金属构成的, 其各部分的参数标注如图 1 所示.

3 有限差分方程的建立及网格划分

根据目前的计算机容量及速度, 采用有限差分方法计算微波场发射三极管中的电势分布是完全可以达到所要求的计算精度的, 而且其原理简单, 在迭代过程中采用超松弛法可加快其收敛速度. 根据静电场理论, 图中锥尖处当栅压较小时电势分布满足 Laplace 方程, 即:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

而当栅压较高, 例如在计算器件的直流输出特性时, 锥尖处电势分布服从 Poisson 方程, 即:

$$\nabla^2 \varphi = -\rho \quad (2)$$

式中 φ 为空间某点的电势; ρ 则为该点的电子电荷密度.

我们采用典型的五点差分方程来离散上述公式, 则(1)式可转化为:

$$\frac{\frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{a_i} - \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{a_{i-1}}}{\frac{a_i + a_{i-1}}{2}} + \frac{\frac{\varphi_{j+1,i} - \varphi_{j,i}}{b_j} - \frac{\varphi_{j,i} - \varphi_{j-1,i}}{b_{j-1}}}{\frac{b_j + b_{j-1}}{2}} = 0 \quad (3)$$

式中 i, j 表示待求电位的点的位置. 方程(2)的离散式类似于式(3), 不同处是将式(2)的 0 换成了该点的电荷密度. 在模拟中最重要的是边界条件的处理. 本文讨论的模型中上下两边符合第一类边界条件, 即:

$$\varphi_a = V_a \quad (4)$$

$$\varphi_c = 0 \quad (5)$$

式中 φ_a, φ_c 分别表示上边界和下边界的电位初值. 对模型中的左右边界可用第二类边界条件来处理, 即在锥尖的轴线上, 由于左右对称, 其上的电位满足:

$$\frac{d\varphi}{dy} = 0 \quad (6)$$

在另一边, 当模型选择较宽时, 边界上的电位也可用式(6)的条件来处理. 有限差分法的精度与网格划分有关. 当网格越密时其计算的该点附近的电位误差越小. 通常网格划分要兼顾计算机内存容量及速度的限制. 本文采用非均匀网格技术划分锥尖和栅极区, 使锥尖和栅极边缘较密, 其他地方较疏(见图 2), 并且通过设置两级误差限来保证锥尖处的计算精度符合预定要求.

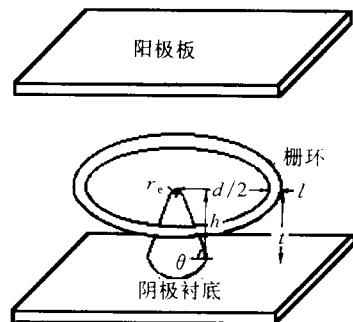


图 1 真空微电子三极管结构

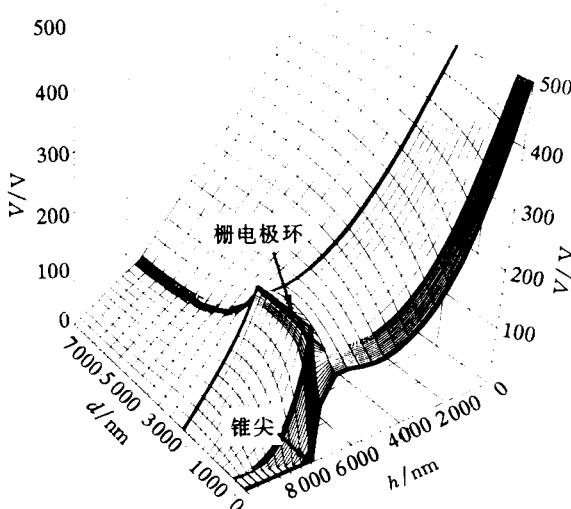


图 2 真空微电子三极管中的电势分布

4 真空微电子三极管直流特性模拟

4.1 真空微电子三极管中电势分布

图 2 给出了模拟的三极管中的电势分布图。图中采用的尖锥半径为 10nm，阳极、栅极电压分别为 500V 和 200V。由图中可见锥尖处的电势起伏较大，表明该处的电场较强。其中最大处达到了 $2.23 \times 10^7 \text{ V/cm}$ 。另外栅边缘处电场也很高，由于电场方向是由栅极指向外的，故该处的高电场对栅电流的收集具有一定的加强作用。

若我们使阳极不加电压，则锥尖处的电场将主要是由栅极电压建立的。即锥尖处的电场用下式来描述：

$$E_{\max} = \beta V_{gc} \quad (7)$$

式中 V_{gc} 是栅阴极间所加的电压，单位为 V； β 称为场增强因子，单位为 cm^{-1} ，其大小与锥尖的形状、高度及栅孔直径有关。模拟结果显示了当栅孔直径从 $1\mu\text{m}$ 增至 $4\mu\text{m}$ 时， β 的数值不是线性减小的，而是有点类似于反比关系。即当栅孔直径变小时， β 值上升较快，当栅孔直径小至 $1\mu\text{m}$ 时， β 值可达 10^5 量级，也就是说在此情况下，只要在栅电极上加 100V 左右的电压即可引起电子可观的发射。

4.2 真空微电子三极管的直流输出特性

图 3 是模拟计算的真空微电子三极管的输出特性。从图中可以看出，该器件的输出特性有点类似于晶体三极管但又有所区别。该类器件的阳极电流主要是由栅电压决定的，阳极电压的作用主要是收集从锥尖发射出来的电子。图中当阳极电压从 200V 增至 1000V 时阳极电流增加不足一个数量级，而当栅电压增加 50V 即引起阳极电流的较大变化，说明阳极电压对锥尖的发射影响远没有栅极大。

4.3 锥尖的形状对发射的影响

目前从理论上提出的尖锥模型主要有锥形、椭球形及尖头圆柱形等。这些模型各有优缺点，但在实验上未见将它们进行发射性能比较的报道。本文利用计算机模拟研究了它们的发射性能，其结果如图 4 所示。图中采用锥尖的倾斜角 θ 来代表不同类型的锥尖形状，当 $\theta = 90^\circ$ 时，锥尖对应于尖头圆柱形； $\theta = 60^\circ$ 则近似表示椭球形锥尖（例如 Spindt 型锥尖）； $\theta = 45^\circ$ 则类似于金字塔形锥尖，所不同的是该尖呈圆锥形。由图中可以看出，尖头圆柱形锥尖性能最好，在同样的锥尖曲率半径下其尖端顶部

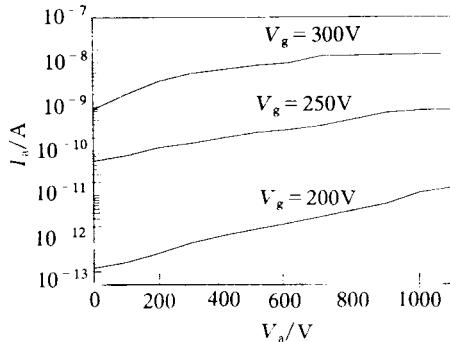


图 3 真空微电子三极管的直流输出特性

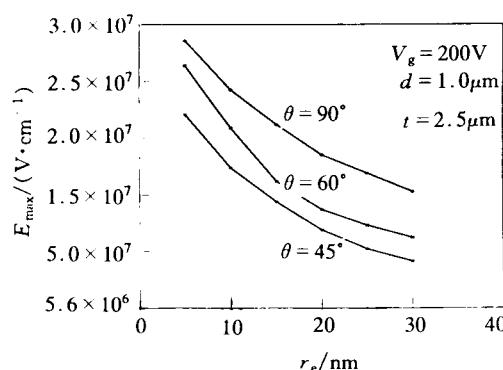


图 4 锥尖曲率半径对发射的影响

的电场最高. 椭球形锥尖次之. 另外从图中还可以明显地看出, 尖锥的曲率半径对其顶部的电场影响很大, 曲率半径越小则电场越大. 因此我们在实验中应尽可能使锥尖做得尖锐一些以降低应用电压.

5 真空微电子三极管中栅阴极电容的计算

在图 1 所示结构中, 我们选用圆环状栅极主要是为了减小对阴极的电容. 在一般的静电场理论中, 电容的计算式可表示为:

$$C = \frac{1}{V} \oint \epsilon E ds \quad (8)$$

因此要计算栅阴极电容, 我们可以先求出栅圆环周围的电场分布, 然后再用(8)式就可算出栅对阴极的电容. 为了保证计算精度, 我们对栅极附近的区域进行了网格细分, 细分后的网格间距可小至 5nm, 较好地满足了计算精度的要求. 细分后的结果从图 3 可大致看出.

利用有限差分方法, 我们模拟计算的栅阴极电容为 9.818×10^{-14} F. 在计算中采用的参数为栅环宽 l 为 $4.5\mu m$, 栅孔直径 d 为 $1\mu m$, 栅高和尖锥高度均为 $1.5\mu m$, 尖锥半角 θ 为 60° , 半径为 $20nm$, 选取此参数主要是与实验结构相匹配, 计算结果表明, 上述电容值与实验值 $0.1PF^{[7]}$ 非常接近, 表明本文所采用的方法具有较好的精度, 可以满足实际应用的要求.

图 5 是计算的栅阴极电容随锥尖倾斜角 θ 及栅环宽度 l 的变化情况. 由图可见, 当 θ 角较大时, 电容变化不明显, 仅略有减小. 但当 θ 变得较小时, 电容上升较快. 出现这种情况可能是此时栅阴极距离变短了 (由于锥尖高度始终保持不变), 从而导致栅处电场增强, 电容增大. 从图中还可看出, 栅环宽度 l 对电容的影响较大, 其原因是栅环的表面积增加了, 由图 4 和图 5, 我们可以认为柱状阴极结构是一种较理想的微波场发射阴极结构.

尖锥高度对电容的影响如下所述: 当尖锥高度 h 由 $1.5\mu m$ 开始增加至 $2\mu m$ 时, 栅阴电容的数值增加不大, 当 h 再增加时, 电容值开始明显增大. 模拟中栅极距衬底阴极的高度 t 选为 $2.5\mu m$, 因此为了减小栅阴极电容, 要求锥高最好不超过栅孔门极. 上述模拟结果与文献[8]的报道完全一致.

栅极宽度 l 对电容也有影响. 当栅环宽度增加时其电容也增加, 但电容增加的速度要快一些. 例如当栅环宽度从 $1\mu m$ 增至 $2\mu m$ 时, 电容 C_{ge} 上升了 1×10^{-14} F, 而当栅环宽度由 $2\mu m$ 增至 $3\mu m$ 时, 电容上升了 1.3×10^{-14} F 左右. 出现此结果的原因可归结为栅环表面积的增加, 从而导致电容也大. 如果我们保持栅圆环的面积不变, 而仅增加圆环的直径, 电容的变化会怎么样呢? 图 6 的结果说明了这种情况. 图中的栅环面积始终保持不变, 当栅孔直径增大时, 栅阴电容 C_{ge} 也开始增加, 当 d 较大时电容开始出现饱和趋势. 仔细研究栅环表面的电场发现, 出现这种现象的原因可能是栅环边缘电容的影响, 图 3 可清楚地看出在栅周围电场强

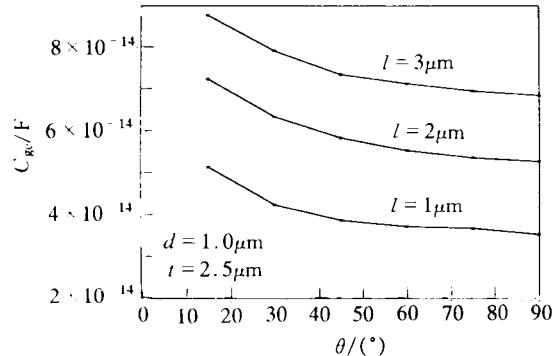


图 5 栅阴极电容随锥尖的倾斜角的变化

是栅环的表面积增加了, 由图 4 和图 5, 我们可以认为柱状阴极结构是一种较理想的微波场发射阴极结构.

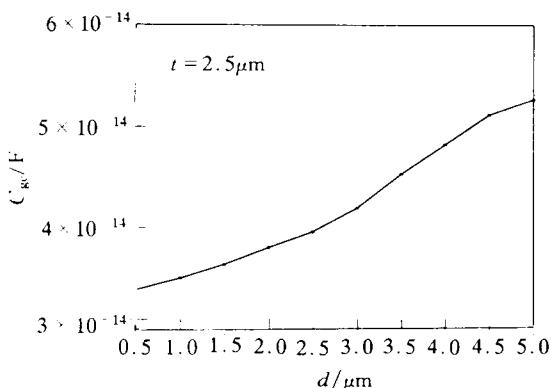


图 6 棚环面积一定时棚孔直径对棚阴极电容的影响
控制棚环的宽度和棚孔的直径可以明显地减小棚阴极电容,从而提高器件的工作频率.

度也较大.随着直径 d 的增大,边缘的影响渐趋稳定,从而使电容也趋向饱和.

6 结论

利用有限差分方法,可以计算一定精度的电场、电势等.本文从模拟计算真空微电子三极管内的电势分布着手,详细研究了结构参数对锥尖的发射和栅阴极电容的影响,得到的结果符合实际情况,在实际应用中有一定的参考价值.研究发现,尖头圆柱形锥尖是一个较理想的微波三极管的锥尖模型.在能满足光刻精度的条件下尽量

参 考 文 献

- [1] J. P. Calame, H. F. Gray and J. L. Shaw, *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**: 1485.
- [2] P. N. Lally, Y. Goren and E. A. Nettlesheim, *IEEE Trans. Electron. Device*, 1989, **36**(11): 2738.
- [3] Q. A. Huang, T. Xiang, M. Qin *et al.*, in 7th Int. Conf. on Vacuum Microelectronics, France, 1994, 281.
- [4] K. G. Kosmahl, *IEEE Trans. Electron. Device*, 1989, **36**(11): 2728.
- [5] W. N. Caor, H. J. Wang, K. K. Chin *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1990, **A8**: 3381.
- [6] Zaidman, *IEEE Trans. Electron. Device*, 1993, **40**(5): 1010.
- [7] C. A. Spindt, C. E. Holland, A. Rosengreen *et al.*, *IEDM. Dig. Tech. Papers*, 1993, 749.
- [8] H. H. Busta, in 5th Int. Conf. on Vacuum Microelectronics, Austria, 1992, 1~19.

Simulation of Direct Current Characteristics and Grid-to-Cathode Capacitance of Vacuum Microelectronic Triode

Qin Ming, Huang Qingan and Wei Tongli

(Microelectronics Center, Southeast University, Nanjing 210096)

Received 5 July 1996, revised manuscript received 17 October 1996

Abstract The electrical potential and field distribution in vacuum microelectronic triode are simulated by using finite difference method. The effect of the tip radius and the diameter of the grid ring on the tip field is also studied and the direct output characteristics of this triode is calculated. By changing the parameters of the tip and grid, the grid-to-cathode capacitance is studied in detail. The simulated results are in agreement with the experiment results reported.

EEACC: 2340E, 2320