

平面薄膜场致发射的模型分析¹

李德昌 杨银堂* 刘广钧** 朱长纯***

(西安电子科技大学理学院 西安 710071)

*(西安电子科技大学微电子所 西安 710071)

** (西安理工大学应用化学系 西安 710066)

*** (西安交通大学电信学院真空微电子所 西安 710049)

摘要 该文系统地讨论宽带隙平面薄膜的场致电子发射 (FEE) 的机理。基本的理论模型是电子对表面势垒的隧穿效应,同时考虑到晶格的散射和薄膜势垒中微细贯穿通道的电子发射作用。分析结果表明,宽带隙平面薄膜结构用作场致电子发射阴极,具有发射电压的阈值低,发射电子的能量分布范围小等优点。另外这种结构制作简单、材料选择范围宽、理化稳定性好,是一种理想的场致发射电子源。

关键词 薄膜,场致发射,模型

中图分类号 O462.4, TB43

1 引言

传统的电子发射大都以某种形式给予电子能量,使之能够越过表面势垒而逸出真空。场致电子发射 (FEE) 一方面利用外加电场降低表面势垒,而更重要的方面是使表面势垒变薄,电子可以隧穿逸出^[1,2]。同时外加电场还可以渗透到材料内部,使其中的电子加速而逸出。FEE 器件具有体积小、电流密度大、响应快和效率高等优点。FEE 的主要研究内容是一方面锐化尖峰阵列,另一方面则是优化表面材料,或者二者的结合。

为了突出表面材料的研究,特别是表面结构系统的研究,本文研究平面薄膜材料结构的场致电子发射理论。其优点是结构简单易于与实验比较,特别是在亚微米和深亚微米尺度情况下,平面结构中的表面缺陷和材料中的非平衡局域态的作用显现,产生了独特的电子发射特性^[3,4]。平面薄膜材料的取材范围宽、可以利用类金刚石 DLC 等优秀的功能材料,其制作工艺易于跟成熟的 Si-IC 工艺兼容,有可能成为实用的 FEE 器件。这种结构利用电子的隧穿效应,可以采用宽带隙的半导体或绝缘材料,从而大大提高阴极器件的理化稳定性和环境适应性。

2 基本的分析模型

如图 1(b) 所示,在外加电场为 0 的条件下,宽带隙平面薄膜用作场致电子发射的能带结构可以简化为沿平面法线 X 的一维形式

$$U(X) = \begin{cases} U_{F1}, & X \leq X_1 \\ U_C, & X_1 \leq X \leq X_2 \\ U_0, & X_2 \leq X \leq X_3 \\ U_{F2}, & X > X_3 \end{cases} \quad (1)$$

其中取发射极衬底材料 Si 的 Fermi 能级为 U_{F1} ; $l_i = X_2 - X_1$ 为绝缘层的厚度; U_C 的大小为衬底材料的电子亲和势 A 与真空能级 U_0 之差 $U_0 - A$; $X_3 - X_2$ 为真空层的厚度; U_{F2} 为阳极的 Fermi 能级。

设 m 和 E 为入射粒子的质量和能量,由 Schrodinger 方程可以得出入射粒子的定态波函数 $\Phi(X)$ 满足如下方程:

¹ 1999-04-01 收到, 1999-09-08 定稿

国家自然科学基金 (69776023)、跨行业基金 (00J8.2.1.DZ0127)
和国家部级重点实验室基金 (00JS02.6.1.DZ0164) 资助项目

$$\Phi''(X) = C[U(X) - E]\Phi(X) \tag{2}$$

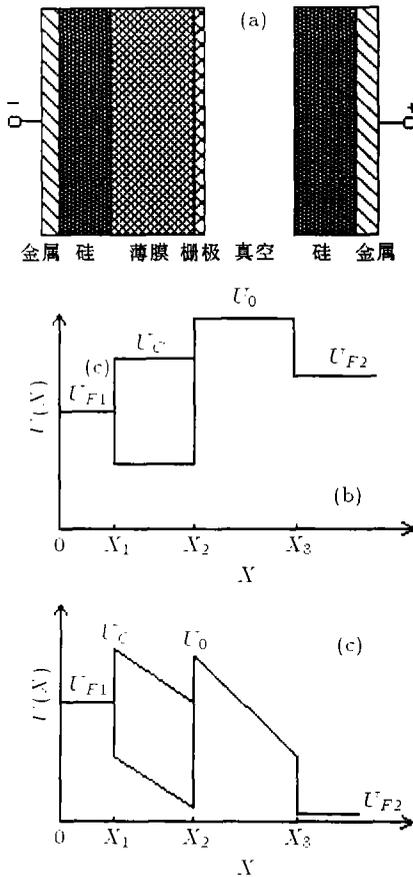


图 1 有阳极的宽带隙平面薄膜阴极的简化模型和能带示意图
 (a) Si 基片上的宽带隙平面薄膜阴极的侧面轮廓
 (b) 外电场为 0 时宽带隙平面薄膜的能带结构
 (c) 栅极电压和阳极电压的电场使平带势垒发生倾斜形成了双三角势垒

其中 $C = 2m/\hbar^2$ ， \hbar 是约化 Planck 常数。

在 $U(X)$ 为常数的区域， $\Phi(X)$ 可取平面波的形式，平面波的各项具有明确的入射、反射和透射等意义。其振幅和初位相可以利用波函数的连续性进行定解。

在外加电压不为 0 的条件下，外电场使图 1(b) 所示的矩形势垒的平顶发生倾斜，如图 1(c) 所示，可以简要地表示为

$$U(X) = \begin{cases} U_{F1}, & X \leq X_1 \\ U_C - E_1 X, & X_1 \leq X \leq X_2 \\ U_0 - E_0(X - l_I), & X_2 \leq X \leq X_3 \\ U_{F2}, & X > X_3 \end{cases} \tag{3}$$

其中 E_1 和 E_0 分别是表面薄膜中和真空中的电场强度，而衬底中的电场强度被屏蔽为 0。这里将势垒区分为表面薄膜层势垒和真空区势垒。注意到穿过绝缘层势垒和真空势垒的电子都将到达阳极，在真空区较厚的条件下，阳极的电势可以用真空中的电场体现。

3 结果分析

3.1 基本理论 在图 1 所示的势垒结构条件下，从定解得出的平面波的振幅的对比中可以求出电子透射系数的表达式为

$$T = |Z|^{-2}$$

$$Z = \left[\cosh(Kl_I) + \frac{i\alpha}{2} \sinh(Kl_I) \right]^2 \exp(i2K_0l_I) + \frac{1}{4} \beta^2 \sinh(Kl_I) \tag{4}$$

其中 $K = [C(U_I - E)]^{1/2}$ ， $K_0 = (CE)^{1/2}$ ， $\alpha = K/K_0 - K_0/K$ ， $\beta = K/K_0 + K_0/K$ 。穿透系数 T 是入射粒子能量 E 的函数 $T(E)$ 。随着 E 的变化， $T(E)$ 可能出现峰值，该峰值最大为 1，即完全透射。

在图 1(c) 所示的势垒条件下, 表面薄层和真空区的势垒高度线性变化为倾斜势垒, 或者称之为三角势垒。在三角势垒区由 Schrodinger 方程定解得出的波函数为所谓的 Airy 函数^[4]:

$$\Phi(X) = aA(t) + bB(t) \quad (5)$$

其中 a, b 是待定系数, $A(t)$ 和 $B(t)$ 分别为 Airy 函数, $t = t_0 + X/\lambda$, $t_0 = C(U_J - E)\lambda^2$, $\lambda = (CE_I)^{-1/3}$, λ 具有长度的量纲, 称之为特征长度。Airy 函数的一般形式为

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \cos \left[\frac{u^3}{3} + ut \right] du \quad (6)$$

$A(t)$ 和 $B(t)$ 是 $\Phi(t)$ 的数学变形。由波函数的连续性条件定解出系数 a, b , 同样也可以得到电子透射系数的表达式 $T(E)$ 。显而易见, 电子穿过势垒的隧道电流密度可以表示为

$$J = \frac{emkT}{\pi^2 h^3} \int_0^\infty T(E)[Z(0) - Z(u)]dE$$

$$Z(u) = \ln\{1 + \exp[(E_F - E - eu)/kT]\} \quad (7)$$

其中 e, k, T 分别为电子的电量、 Boltzmann 常数和绝对温度。

3.2 两种重要的发射效应 由于表面势垒和表面薄膜层对场致发射的决定性作用, 表面层和薄膜层内部的发射机制以及其中的特殊效应, 将深化对 I-V 特性的理解, 开发电子发射全新的潜在的物理机制。

表面薄膜阴极的场致发射, 具有显著的双势垒效应^[5]。基本的发射过程如下: 电子先从衬底的 Fermi 能级附近注入到导带, 并在导带底通过晶格散射达到热平衡 (thermalization); 然后再从宽带隙薄膜的表面发射到真空。当表面薄膜的厚度减小到与电子在膜中的平均自由程相近时, 电子可能在热平衡没有到达之前发射。这时电子的发射几率和发射电流密度应该进行非平衡统计运算。电子在发射过程中穿过了衬底与薄膜间的界面势垒和薄膜的表面势垒, 即穿过了双势垒。正是对这种双势垒的穿过, 产生了所谓的共振隧穿效应。在共振条件下, 电子的透射系数接近于 1, 因而共振隧穿效应有可能大大提高电子器件的速度与效率并且降低其开启电压。

表面薄膜阴极的场致发射还具有导电通道的作用。利用阳极图像技术可以在大面积范围显示电子的发射位置, 并测量其 I-V 特性。结果表明, 某些薄膜的场致电子发射中存在固定的发射点。这些点可以认为是薄膜中的局域态, 即杂质、缺陷的自发聚集或者表面尖刺的作用。在场致发射中这些自发聚集的局域态似乎形成了某种导电通道。电子在导电通道中加速并发射出去。图 2 显示出了实际场致发射薄膜阴极的结构, 而表面薄膜中导电通道的形成模式如图 3 所示。

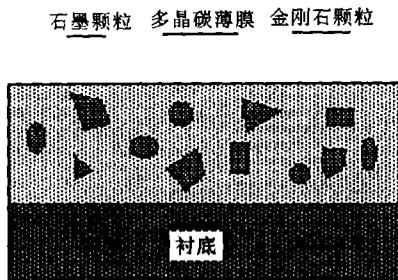


图 2 实际多晶薄膜阴极的结构

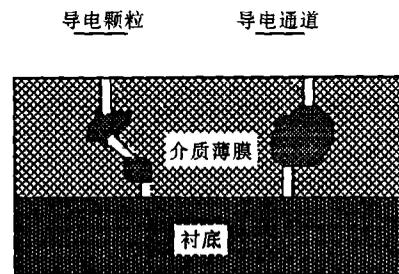


图 3 薄膜中导电通道的示意图

4 结 论

为了便于与实验的比较, 本文讨论平面薄膜阴极结构的电子发射机理, 得到了共振隧穿的场致发射特征。在共振条件下, 电子的透射系数接近于 1, 因而有可能大大提高电子器件的速度并降低其开启电压。共振隧穿场致发射是双势垒的结果, 这种发射的薄膜仅限于几纳米的厚度范围。在微米厚度范围的薄膜发射, 是薄膜表面和内部微结构的发射效应。

参 考 文 献

- [1] Y. Glazer, M. Gitterman, Tunneling through highly transparent symmetric double barriers, *Physical Review B*, 1991, 43(2), 1855-1858.
- [2] De-Chang Li, G. J. Liu, Y. T. Yang, *et al.*, The resonant field electron emission from DLC films, *Ultramicroscopy*, 1999, 79(1999), 83-87.
- [3] L. Yunpeng, L. Enze, Space charge of field emission triode, *Applied Surface Science*, 1994, 76/77(1994), 7-10.
- [4] M. Abramowitz, I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, National Bureau of Standards, 1964, 446-464.
- [5] M. W. Geis, J. C. Twichell, N. N. Efremov, *et al.*, Comparison of Electron Field Emission from Nitrogen-doped, Type b Diamond, Boron-doped Diamond, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(16), 2294-2296.

MODEL STUDY OF FEE FROM PLANAR FILMS

Li Dechang Yang Yintang* Liu Guangjun** Zhu Changchun***

(*School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

*(*Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

**(*Dept. of Appl. Chem., Xi'an University of Sci. and Tech., Xi'an 710066, China*)

***(*School of Electronics and Info. Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China*)

Abstract The mechanics of Field Electron Emission (FEE) from planar thin films of wide band-gap have been studied systematically. The basic model is the electron tunneling through the potential barriers at the interfaces, on the other hand the effect of scattering of the crystal lattice and the effect of micro conductive channel on FEE have been taken into consideration. The study result shows that the planar film structure is conformable for FEE cathode, because it has low voltage threshold and small range of energy distribution of the emitted electrons. Since the structure can be easily prepared, and its components are widely selectable, and its surface stability in mechanics and chemistry is outstanding, this structure is an ideal electron emitter.

Key words Thin film, Field emission, Model

- 李德昌: 男, 1956年生, 副教授, 博士, 研究方向为真空微电子学与场致发射, 碳纳米材料及其应用。
 杨银堂: 男, 1960年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 ECRCVD 技术和高温半导体器件及其应用。
 刘广均: 男, 1971年生, 讲师, 硕士, 研究方向为化学工程, 防水灌浆材料及其应用。
 朱长纯: 男, 1941年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为真空微电子学与场致发射, 纳米材料及其应用。