

表面传导电子发射显示器件电场 分布的理论研究^{*}

李新贝^{1)†} 张方辉¹⁾ 王秀峰²⁾

1) 陕西科技大学 电气与工程学院 咸阳 712081)

2) 陕西科技大学 材料科学与工程学院 咸阳 712081)

(2005 年 10 月 29 日收到, 2006 年 5 月 14 日收到修改稿)

利用电磁理论对表面传导电子发射显示器件的单个子像素在笛卡尔坐标系内建立合理的电学物理模型, 对内部电场强度和电势进行了深入研究, 推导出了模型不同部分的面电荷密度、电场强度和电势的表达式. 为了形象地表征其电学特性, 利用 MATLAB 6.5 对电场强度和电势的分布情况进行了模拟, 从理论上对模拟曲面给出了合理的解释, 分析了子像素内部电子的发射机理和电学行为, 并与电子多重散射模型和惯性离心模型进行了对比, 解释了 SED 阳极电流形成的重要原因. 在误差允许的范围内, 本模型有关电场强度分布的结论与惯性离心模型一致.

关键词: 表面传导电子发射显示, 遂穿效应, 面电荷密度, 电场强度

PACC: 7970, 7360T

1. 引言

表面传导电子发射(surface-conduction electron-emitter display, SED)是近年来出现的一种新型平板显示技术, 被誉为 CRT 的最终形态. 目前, 有关 SED 器件理论研究的报道很少, 最具有代表意义的有电子的多重散射模型和惯性离心模型. 多重散射模型认为当隧道电子由狭缝的一端飞到相对的另一端时, 同薄膜发生碰撞, 碰撞的结果是一部分电子进入薄膜, 成为薄膜表面电流, 另一部分电子被散射进入空间. 对这部分进入空间的电子而言有两种运动方式: 一些电子在散射时摆脱了狭缝电场的束缚, 进入垂直电场的势力范围, 最终轰击阳极; 另一些电子没有逃脱狭缝电场的束缚, 重新被拉回到薄膜表面, 经历第二次选择, 进入薄膜或继续被散射^[1]. 惯性离心模型认为当电子在电场中运动时, 由于轨道不是直线, 电子受到惯性离心力的作用, 使得纳米狭缝边缘的大部分电子流向共平面阴极, 其中一小部分电子在沿着弯曲电场线运动的同时不断加速, 当惯性离心力大于电场力时, 这些电子的运动轨迹趋向于阳极, 形成阳极电流^[2]. 本文从电磁理论出发, 对 SED

子像素建立了激发电场的物理模型, 详细地探讨了 SED 的电子发射机理和电学行为, 研究了上下极板的面电荷密度、电场强度和电势的分布情况, 并与上述两模型进行了对比分析, 发现了 SED 纳米狭缝中线处存在一很强的电场峰值, 对于阳极电流形成具有很大的影响, 因此具有一定的现实意义.

2. SED 工作原理与制造

从结构图(如图 1 所示)中可知, 阳极玻璃基板和阴极玻璃基板通过在其间插入固定隔离层真空封装在一起, 阴极基板上由隧道效应形成的缝间传导电子, 在阳极电压作用下, 有一部分电子可到达阳极基板. 由于极间加速电压很高, 电子具有很高的动能, 轰击阳极基板上的荧光粉发光.

SED 基本显示原理与 CRT 相同, 都是由电子撞击荧光材料而发光, 但电子撞击的方式却不一样. CRT 显像管是将一个电子枪射出的电子束在偏转线圈的强大磁场作用下偏离原来方向, 依次去轰击荧光材料. 而 SED 则是将涂有荧光材料的玻璃板与铺有大量微型电子发射器即电子枪的玻璃底板平行摆放, 大量的微型电子发射器就像液晶或等离子显示

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 50372038)和陕西省教育厅产业化项目基金(批准号: 06JC23)资助的课题.

[†] E-mail: limingjing1986@yahoo.com.cn

器的像素一样. SED 显示器的关键是微型电子发射器之间的缝隙, 这个缝隙只有几纳米, 在施加电压的情况下会产生电子隧穿效应, 从而使发射器发射电子, 并在极间电压的作用下撞击荧光材料实现发光显示. 在结构上, SED 和 CRT 完全不同. CRT 是用一组电子枪来实现整个屏幕的显示, 因此电子枪必须以扫描的方式才能生成一幅完整的画面, SED 则不一样, 它实际上是将电子枪微型化, 使每一个像素点都有三个微型电子枪(电子源), 它们分别对应像素点上 RGB 三色. 以一块解析度为 1920×1080 的 SED 平面显示器为例, 它的电子源就有 $1920 \times 1080 \times 3$ 个. 当电子源受控发射电子, 撞击像素点上的荧光物质(RGB), 显示屏就呈现出不同的图形与色彩. 所以, SED 显示技术并不需要扫描, 它和等离子(PDP)、液晶(LCD)一样, 都被称为“寻址(Addressed)显示器”. 从这个角度讲, SED 显示器可以说是传统 CRT 电视技术与寻址显示技术的结合.

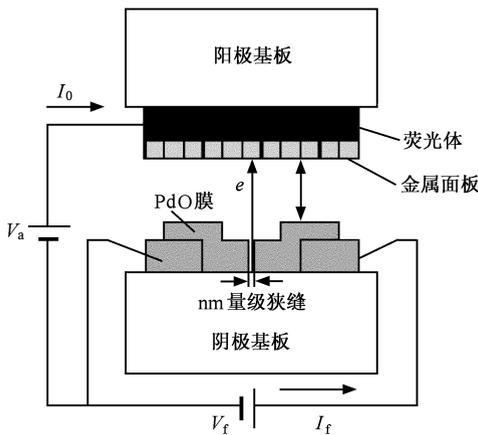


图 1 SED 显示器件示意图

SED 是一种高真空器件, 真空度高达 1×10^{-5} Pa 以上, 由上下两块玻璃及四周的特殊玻璃封接而成^[3], 器件结构如图 2、图 3 所示; 上板玻璃是透明的 ITO 导电玻璃基板, 在其上依次制备有彩色滤色膜、黑矩阵、荧光粉和面板电极(金属铝膜). 滤色膜分别对应三基色荧光粉, 用以提高色纯度, 黑矩阵是借用 LCD 工艺, 将三种荧光粉按像素分隔, 以避免干扰, 荧光粉以色条的形式间隔沉积, 沉积后, 再在其上镀一层铝膜作为阳极, 这就是所谓的荧光屏金属化过程^[4]. 由于 CRT 荧光屏制造工艺相当成熟, 所以 SED 上板制程可以借鉴, 并有所简化. SED 的关键部分是下基板(即阴极板)的制造, 其过程: 先在平面衬底上用蒸发和光刻技术制成平行结构的阴极和

引出极, 间距 $10\mu\text{m}$ 左右, 然后在间隙上沉积一层二氧化锡薄膜, 或蒸发一层金属锡薄膜, 由于氧化而形成导电的二氧化锡薄膜. 膜很薄, 呈非连续的孤岛状, 孤岛之间存在一些导电通道. 真空条件下, 在两电极之间施加电压, 当电流达到一定强度时, 一些导电通道会被烧掉. 将这一过程持续数小时, 直至所有导电通道都被烧掉, 这时两电极间的电流是靠场发射过程实现的, 这就是 SED 器件简单的制造过程^[5,6].

2.1. SED 理论研究

2.1.1. 电学物理模型

整个 SED 平板显示器件的上下两导电基板之间的距离通常在几个毫米左右, SED 器件通常在 40 寸以上, 属大屏幕显示, 而且器件的厚度相对尺寸很小, 故可把整个 SED 器件当作理想的平板电容器, 这种建模思想对于器件子像素的处理是完全适用的^[7], 因为脱离了整个显示器件而纯粹地研究某个子像素是毫无意义的. 这里研究的子像素尺寸为 $205 \times 615\mu\text{m}$, 即 $S = wl$; 取 $V_a = 6\text{kV}$, $V_f = 18\text{V}$, $d = 10\text{nm}$, $h = 5\text{mm}$.

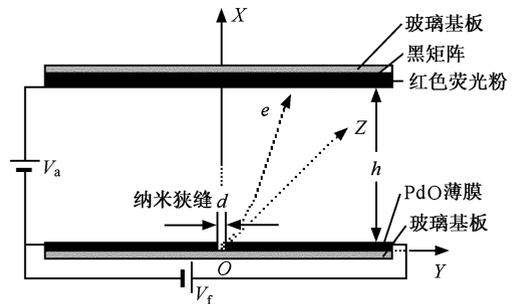


图 2 SED 显示器件红色子像素的纵剖面示意图

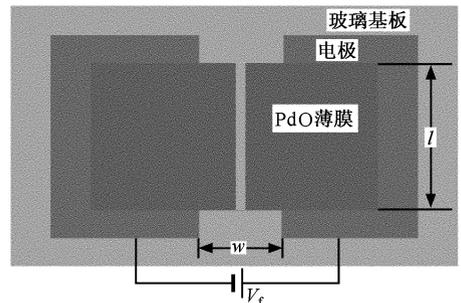


图 3 SED 显示器件子像素的横剖面示意图

2.1.2. 面电荷密度

为了精确地研究上基板和下基板左右两侧的电场分布情况, 需对面电荷密度进行求解, 故建立如下

模型(如图 4 所示):SED 子像素相当于一个大的平板电容 C_1 ,它是由两平板电容 C_2, C_3 并联形成的,

其中 C_2, C_3 是一个子像素的左右两侧半个子像素的等效电容.

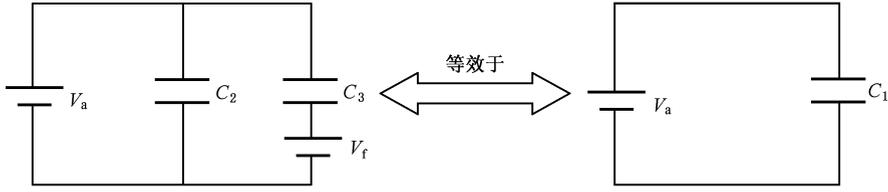


图 4 SED 显示器件电容等效物理模型的建立

SED 属高真空器件,故取 $\epsilon_r = 1$,真空中的介电常数 $\epsilon_0 = 8.854187818 \times 10^{-12}$ F/m,由平板电容计算公式得

$$C_2 = C_3 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d};$$

由上图知

$$C_2 V_a + (V_a - V_f)C_3 = V_a C_1,$$

推得

$$C_1 = \left(2 - \frac{V_f}{V_a}\right) C_2;$$

平板电容器 C_1 上基板的面电荷密度大小为

$$\sigma_1 = \frac{C_1 V_a}{wl};$$

平板电容器 C_2, C_3 下基板的面电荷密度大小分别为

$$\sigma_2 = \frac{2C_2 V_a}{wl},$$

$$\sigma_3 = \frac{2C_3(V_a - V_f)}{wl}.$$

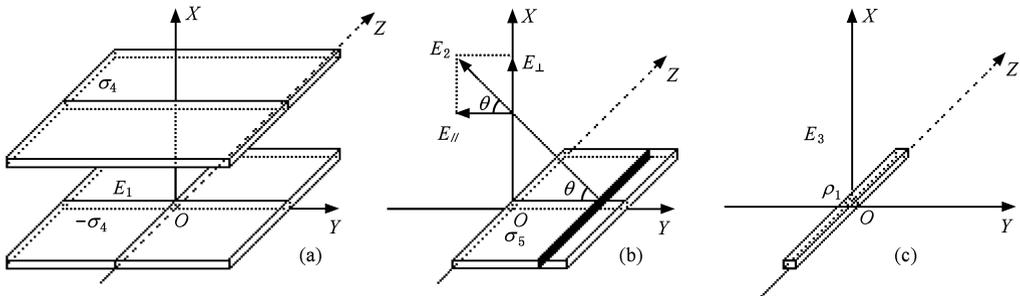


图 5 SED 显示器件结构等效物理模型的建立

利用高斯定理求解电场强度,并取 YOZ 平面的左半侧为电势零点,则该半平面上任意一点的电势 $U_{r_0} = 0$,其他各点的电势为 $U_r^0 = \int_r^{\infty} E \cdot dl$,具体分析如下:

2.1.3. 电学特性

研究 SED 器件子像素内部的电学行为和电子发射机理,要构造合理的物理模型^[8],在笛卡尔直角坐标系中,使 SED 器件子像素的宽、长分别平行于 Y 轴和 Z 轴,坐标原点 O 处于该子像素的中心位置.

从电磁理论出发,由于下基板左右两侧和上基板所加电压的不同,在整个平板显示器件中一个子像素的内部电学特性分布情况等效为以下三部分电学特性的叠加,从而把一个复杂的问题简单化.图 5 (a)为两个无限大平板,上下基板面电荷密度分别为 $\sigma_4, -\sigma_4$ (b)为一面电荷密度为 σ_5 的半无限大平板 (c)为一密度为 ρ_1 的无限长线电荷.

2.1.3.1. 电学参数

由于 $\sigma_1 \approx \sigma_2$,在误差允许的范围内,为了简化计算将 $\sigma_4, \sigma_5, \rho_1$ 分别取以下数值: $\sigma_4 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \sigma_5 = \sigma_3 - \sigma_4, \rho_1 = l \cdot \sigma_4.$

1)图 5(a)所示理想平板电容是由两块无限大平板组成,其电场强度 E_1 、电势 U_1 ,上下两板的面电荷密度为 σ_4 ,根据高斯定理 $\oint_s E_1 ds = \frac{1}{\epsilon_0} \int_v \sigma_4 dV$,得

$$E_1 = -\frac{\sigma_4}{\epsilon_0}, U_1 = \frac{\sigma_4 x}{\epsilon_0}.$$

2) 图 5(b) 所示为一块面电荷密度为 σ_5 的半无限大平板, 处于 YOZ 平面的右半侧, 空间电场强度为 E_2 , 电势为 U_2 . 可得

$$E_2 = \frac{l\sigma_5}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{1}{x} \right],$$

$$U_2 = \frac{l\sigma_5}{4\pi\epsilon_0} \left[\ln(y + \sqrt{x^2 + y^2}) - \ln x \right],$$

其中半无限大平板的线电荷密度与面电荷密度关系为 $\rho_0 = l\sigma_5$.

3) 图 5(c) 所示为一线电荷密度为 $\rho_1 = l\sigma_4$ 无限长线电荷所产生的电场强度和电势分别为

$$E_3 = \frac{\rho_1}{2\pi\epsilon_0 \sqrt{x^2 + y^2}},$$

$$U_3 = -\frac{l\sigma_4 \cdot \ln \sqrt{x^2 + y^2}}{2\pi\epsilon_0}.$$

由于电场为矢量, 子像素内部电场强度原则上不能由以上三部分 E_1, E_2, E_3 直接表征, 但从误差分布论角度出发, 实际上这种叠加引入的误差很小, 并在误差允许的范围之内, 同时很大程度上反映了内部电场强度的分布情况; 而电势是标量, 总电势可直接用 U_1, U_2, U_3 表示; 由以上推导和分析得出 SED 子像素的内部电场强度和电势的表达式为

$$E = -\frac{\sigma_4}{\epsilon_0} + \frac{l\sigma_5}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{1}{x} \right] + \frac{\rho_1}{2\pi\epsilon_0 \sqrt{x^2 + y^2}},$$

$$U = \frac{\sigma_4 x}{\epsilon_0} + \frac{l\sigma_5}{4\pi\epsilon_0} \left[\ln(y + \sqrt{x^2 + y^2}) - \ln x \right] - \frac{l\sigma_4 \cdot \ln \sqrt{x^2 + y^2}}{2\pi\epsilon_0}.$$

计算得

$$E = -1.2 \times 10^6 - \frac{144.6}{x} + \frac{262.0}{\sqrt{x^2 + y^2}},$$

$$U = 1.2 \times 10^6 x + 72.3 \times \left[\ln(y + \sqrt{x^2 + y^2}) - \ln x \right] - 117.4 \times \ln \sqrt{x^2 + y^2}.$$

2.1.3.2. MATLAB 6.5 软件模拟与分析

为了更加形象地理解 SED 子像素内部电场强度和电势的分布情况, 利用 MATLAB 6.5 绘制了相应的电学模拟曲面^[9,10].

图 6 中电场强度的正负表示场强的相对大小,

结合图 5 分析可知, 在 SED 子像素内部, 当 X 值趋于零时, 总电场强度 E 曲面出现关于直线 $Y=0$ 左右对称的很大的电场强度梯度, 呈抛物线形^[11]; 在 X 远离零值时, 子像素纳米狭缝对真空腔内电场分布影响越来越小, 此时内部电场为近恒定电场, 是由图 5(a) 部分产生的; 当 $X=0, Y=1.025 \times 10^{-4}$ 时, 子像素下基板右侧电场强度达到最小值; 在 X, Y 同时趋于零的过程中, 狭缝处垂直方向上的电场强度越来越大, 峰值 E_{\max} 达 1.0×10^8 V/m.

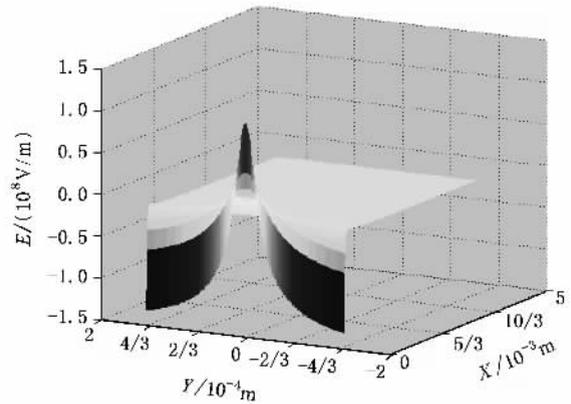


图 6 SED 器件子像素内部电场强度模拟曲面

简单推算一下可知, 平面场发射的驱动电压 V_f 为 18V, 狭缝宽度 d 为 10nm, 故狭缝内水平方向的电场强度 $E_i = V_f/d = 1.8 \times 10^9$ V/m. 而阴阳极间的加速电压 V_a 为 6kV, 距离 h 为 5mm, 故非狭缝处垂直方向的场强(近似看作匀强电场) $E_{ii} = V_a/h = 1.2 \times 10^6$ V/m. 比较发现这两个场强相差约 3 个数量级, 说明 E_{ii} 不可能对狭缝中的电子运动产生影响, 也就谈不上抽取出来了; 但是 E_{\max} 与 E_i 仅相差一个数量级, 这表征着 SED 器件在靠近纳米级 PdO 薄膜狭缝处电场强度最大, 在电子从狭缝一侧遂穿到另一侧的过程中, 那些离狭缝中线最近的电子有着更大的概率在峰值电场 E_{\max} 的作用下进入 SED 子像素的内部空间电场, 并在近恒定电场的加速下轰击对面电极的荧光粉, 实现发光显示.

由图 7 可知, 当 X 趋于零时, 原本在 X 轴上有着一定电势梯度分布的电势曲面出现明显的起伏, 这是由纳米狭缝和子像素下基板左右两侧电压差异 V_f 引起的, YOZ 平面的左半侧规定为电势零点, 右半侧电压相对左半侧高 18V, 从而导致在 Y 轴负半轴区域电势显著降低, 而 Y 轴正半轴区域电势迅速增大; 当 X, Y 同时趋于零时(即狭缝处), 电势明显

增大,随着 X 值增大(即靠近上基板阳极),电势线性增大。从整个 SED 子像素内部电势分布看,整个电势曲面是由图 5(a)部分决定的。

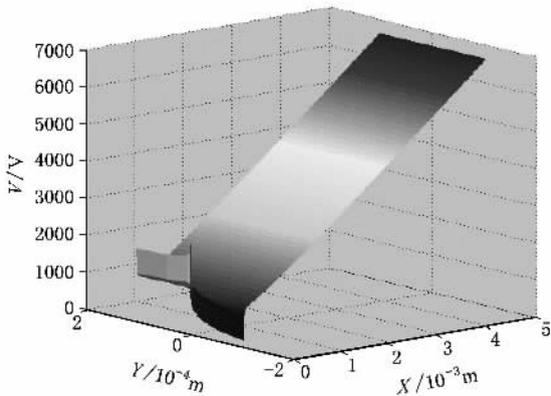


图 7 SED 器件子像素内部电势模拟曲面

多重散射模型从牛顿方程出发,计算出了散射后电子的运动轨迹,进而对电场分布情况进行了研究,惯性离心模型计算了具有一定能量的电子在沿弯曲电场线运动时的偏转角度和运动轨迹,并利用 Fowler-Nordheim 方程研究了纳米狭缝处的电场情况^[12];以上两种模型的建立相对复杂,都重点对阴极表面电子在纳米狭缝内部电场作用下的发射机理进行了详细研究,均能对实验的结果给出比较好的解释。本模型利用简单的叠加原理从 SED 子像素两极板间的外部电场出发,模拟了电场强度和电势分布情况,其中电场模拟结果与惯性离心模型结果十

分吻合,发现 V_a 在两极板之间产生的宏观电场相对于纳米狭缝处的内部电场对电子发射的影响可近似忽略,但是模拟结果表明狭缝中线处的内部电场存在一个很强的峰值,而且对隧穿后电子的行为有很大的影响。

3. 结 论

从电磁理论出发计算了所建 SED 子像素物理模型不同部分的电学参数,利用 MATLAB 6.5 对内部电场强度和电势分布情况进行了模拟,得出以下结论:

1. SED 子像素内部电场关于纳米狭缝呈现抛物线形的场强梯度分布,狭缝中线处电场强度峰值达 1.0×10^8 V/m,在电子从狭缝一侧隧穿到另一侧的过程中,狭缝中线附近的电子有着更大的概率在峰值电场的作用下进入 SED 子像素的内部空间电场,并在近恒定电场的加速下轰击荧光粉,实现发光显示,这是 SED 实现显示的重要因素。

2. SED 子像素下基板左右两侧电压差异 V_f 的存在导致左半平面附近电势显著降低,而右半平面电势迅速增加,在电势模拟曲面末端出现明显的起伏。

3. 电子的多重散射模型和惯性离心模型的建模思想相对复杂,本模型采用简单的叠加原理详细地研究了 SED 子像素内部空间电场,其结论与惯性离心模型一致。

[1] Lu Y, Zhang Y F, He Z H, Lian W L 2005 *Nuclear Techniques* **28** 463 (in Chinese) [鲁 扬、张亚非、何智慧、练文柳 2005 核技术 **28** 463]

[2] Kim, Young Sam; Kim, Young Guon; Kim, Dai Il; Kang, June Gill; Kang, Seung Oun; Choi, Eun Ha; Cho, Guangsup 2000 *Japanese Journal of Applied Physics* **39**(7A) L684

[3] Oguchi T, Yamaguchi E, Sasaki K, Suzuki K, Uzawa S, Hatanaka K 2005 *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **71**(1) 129

[4] Lauren E. Shea 1998.9 *The Electrochemical Society Interface* p24

[5] Yamamoto K, Nomura I, Yamazaki K, Uzawa S, Hatanaka K 2005 *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **71** 1933

[6] Yamaguchi E, Sakai K, Nomura I, Ono T, Yamanobe M, Abe N, Hara T, Hatanaka K, Osada Y, Yamamoto H, Na-kagiri T 1997 *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **6**(2) 52

[7] Asai A, Okuda M, Matsutani S, Shinjo K, Nakamura N, Hatanaka

K, Osada Y, Nakagiri T 1997 *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **10**(4) 127

[8] Okuda M, Matsutani S, Asai A, Yamano A, Hatanaka K, Hara T, Nakagiri T 1998 *SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers* **14**(1) 1

[9] Deng C Y, Zhao H, Wang Y S 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1385 (in Chinese) [邓朝勇、赵 辉、王永生 2001 物理学报 **50** 1385]

[10] Zhang Z X, Hou S M, Zhao X Y, Zhang H, Sun J P, Liu W M, Xue Z Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 434 (in Chinese) [张兆祥、侯士敏、赵兴钰、张 浩、孙建平、刘惟敏、薛增泉 2002 物理学报 **51** 434]

[11] Zhou Y, Whang K W, Yang J H, Jeong D C, Ha C H, Choi Y W 2004 *Chin. Phys.* **13** 789

[12] Chen L, Zhang G M, Wang M S, Zhang Q F 2005 *Chin. Phys.* **14** 181

Electric field distribution in surface-conduction electron-emitter display^{*}

Li Xin-Bei^{1)†} Zhang Fang-Hui¹⁾ Wang Xiu-Feng²⁾

1) (College of Electronics and Electrical Engineering , Shaanxi University of Science and Technology , Xi'an 712081 , China)

2) (School of Material Science and Engineering , Shaanxi University of Science and Technology , Xi'an 712081 , China)

(Received 29 October 2005 ; revised manuscript received 14 May 2006)

Abstract

The surface-conduction electron-emitter display (SED) based on tunneling effect is a newly developed flat panel display. It has obvious technical advantages and excellent characteristics and is praised as one of the most advanced displays. Based on the theory of electromagnetism , an equivalent physical model of a single pixel of SED is established. In particular , it shows the exterior charge densities in different parts of the pixel. Furthermore , the electric potential and electric field intensity are studied in detail , and their distribution is simulated with the help of MATLAB 6.5 Software. Finally , a theoretical analysis of the simulated curved surface is given , and the electrical behavior as well as the emission mechanism is explained comprehensively. In order to further interpret the behavior of electrons in SED , we compare this model with the multi-scattering model and the inertial centrifugal force model respectively. It is found that within the limits of error our conclusion on electric field distribution is consistent with that of the inertial centrifugal force model.

Keywords : surface-conduction electron-emitter display , tunneling effect , exterior charge density , electric field intensity

PACC : 7970 , 7360T

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50372038) and the Industrialization Foundation of Education Bureau of Shaanxi Province , China (Grant No. 06JC23).

[†] E-mail : limingjing1986@yahoo.com.cn