

文章编号:1007-2780(2013)04-0516-05

## 阴极形貌对表面传导电子源的影响

袁光军, 李 春, 元 光\*, 郭 强

(中国海洋大学 物理系, 山东 青岛 266100, E-mail: yuanguang@ouc.edu.cn)

**摘 要:** 使用有限元方法分析表面传导电子源阴极的形貌对其阴极和栅极附近电场分布及在金属电极、真空与发射薄膜交界处电子发射轨迹的影响。对不同阴极形貌下电子发射轨迹模拟结果表明,并非所有在金属电极、真空与发射薄膜三者交界处的电子都可以到达阳极板,阳极电压、阴极高度和外形都会影响发射电子的轨迹从而影响阴极电子的发射效率,模拟发现降低电极高度、增大阳极电压、使用大半径的弧形电极可以提高电子发射效率。

**关 键 词:** 表面传导电子源; 电场分布; 阴极电极形貌

**中图分类号:** O462.4      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3788/YJYXS20132804.0516

## Influence of Cathode Shape on Surface-Conduction Electrons Emitter

YUAN Guang-jun, LI Chun, YUAN Guang\*, GUO Qiang

(Department of Physics, Ocean University of China, Qingdao 266100, China, E-mail: yuanguang@ouc.edu.cn)

**Abstract:** The influence of the cathode structure on the distribution of electric field near the cathode and grid, and the emission electron trajectories near the intersection of the cathode, film and vacuum is studied in surface-conduction electron emitter by the finite elements method. The results indicate that not all electrons emitted from the zone near the intersection can reach the anode through analyzing electron trajectories. The anode voltage, the cathode height and the cathode shape affect the position from which electrons emit and can reach the anode thereby affecting the efficiency of electron emission, simulation shows that reducing the electrode height, increasing anode voltage and applying arc electrode of large radius can increase electron emission.

**Key words:** surface-conduction electrons source; cathode shape; distribution of electrical field; electrons trajectories

### 1 引 言

场发射显示器(FED)由于其优秀的显示性能已经吸引了人们的大量关注。FED的性能主要取决于其电子源,而电子源的结构对于制造一个

优良的电子源至关重要<sup>[1-2]</sup>。电子源的结构至今已经发展了许多种,包括 Spindt 阴极结构、前栅形、后栅形和平面栅形等<sup>[2-5]</sup>。Spindt 阴极结构有着高发射效率、稳定的发射电流和较低的驱动电压等优点,但是制造大面积的 Spindt 阴极结构非

收稿日期: 2013-02-26; 修订日期: 2013-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 60907007 /41076057)

作者简介: 袁光军(1988—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事场发射阴极模拟计算工作。

\* 通信联系人, E-mail: yuanguang@ouc.edu.cn

常困难,这也导致了 Spindt 阴极结构的不实用;前栅形阴极结构将栅极放置在阴极上方,这样制造简单,但在制造过程中却很容易破坏栅极;后栅形阴极结构将栅极埋在阴极下方,这样可以在制造过程中形成对栅极的保护,但是却也因此失去了栅极对阳极的屏蔽作用,从而导致无法在阳极上施加高电压;平面栅形阴极结构将阴极围绕着栅极进行排布,所有电极在同一个平面上,这样既可以保证栅极对阳极的屏蔽作用还可以防止在制造过程中对电极的损伤,并且可以通过简单的光刻工艺进行大面积的制造。因此,平面栅形阴极结构吸引了人们的大量关注。

在 20 世纪 60 年代,前苏联的研究人员在平面栅形阴极结构的栅极和阴极之间放置上不连续的 SnO<sub>2</sub> 薄膜并因此发现了表面传导电子(SCE)<sup>[6]</sup>。从那时起,SCE 已经吸引了平板显示领域中的大量关注<sup>[7-10]</sup>。2004 年和 2006 年,佳能和东芝联合成立的表面传导电子显示器(SED)公司大大发展了基于 SCE 的显示技术,分别推出 91.44 cm(36 in)和 139.7 cm(55 in)的平板显示器,两种显示器以其优秀的显示性能引起了业界的轰动<sup>[11]</sup>,但是该产品的阴极结构需要复杂的工艺控制阴极和栅极的间距,这导致 SED 的成本巨大。在 2008 年,孙宏博等人使用真空溅射镀膜的方法制造了 SCE 模型,研究发现模型电子发射的性能取决于电极的厚度和发射材料的介电常数及厚度<sup>[12]</sup>。李德杰用四角针状氧化锌作为表面传导电子发射材料制作了 SCE 模型,研究发现在场电子的发射效率取决于氧化锌薄膜层的厚度和相邻电极之间的宽度值<sup>[13]</sup>。张婷在 2009 年使用 ANSYS 软件模拟分析了平面栅形场发射模型的表面电场分布,发现在栅极和阴极中间处电场强度要明显小于在阴极附近的电场强度,并且发现表面电场的分布主要由阴极的宽度和阴极与栅极之间的距离决定<sup>[5]</sup>。我们曾提出过一种简单的平面栅形场发射模型,并且对模型的电参数和结构参数进行了优化,最终得到了一种可以使得发散比率小于 1 的最优模型<sup>[14]</sup>。截止目前,人们对表面传导电子源的电场分布、电极间距和电极宽度进行了大量的研究,但是却很少见到对阴极形状的讨论。然而,既然平面栅形场发射模型是一种边缘发射,可以预料电极的形状会对其周围的电子发射轨迹有巨大的影响,进而会影响整个 SCE 源。

本文在以往研究的基础上,用有限元方法对平面栅形场发射模型模拟其表面电场的分布情况,并在此基础上着重讨论了阴极电极、真空和发射材料三者交界处发射的电子的轨迹,以及阳极电压、电极高度和电极形状对电子轨迹的影响。

## 2 模拟模型

模型如图 1 所示。 $h$  表示阳极到场发射材料薄膜的距离, $j$  代表阴极和栅极的间距, $d$  代表薄膜的厚度。3 个值分别是 240、20  $\mu\text{m}$  和 40  $\mu\text{m}$ 。在这里分别讨论两种不同形状模型。一种模型中电极形状是矩形的,另一种的电极是弧状的。在矩形电极中,阴极宽度  $k$  固定为 20  $\mu\text{m}$ ,但是阴极高度  $H$  会改变,在弧形电极中,阴极下表面宽度固定为 20  $\mu\text{m}$ ,上表面宽度固定为 10  $\mu\text{m}$ ,并设定电极高度为 2.5  $\mu\text{m}$ ,但电极两段的弧边的半径会变化,除此之外,阳极的电压对电子轨迹的影响也进行了研究。

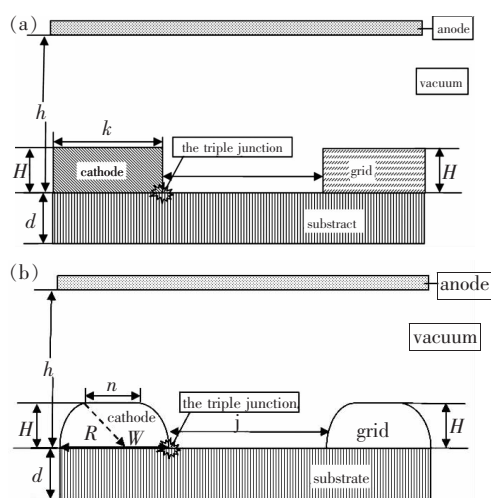


图 1 SCE 模型。(a)矩形电极模型,(b)弧形电极模型。  
Fig. 1 SCE model. (a) Rectangular electrode; (b) Arched electrode.

以氧化锌薄膜作为电子发射材料,出射电子的初能量设定为 0.1 eV,栅极电压设定为 30 V,阴极电压设定为 0 V。

使用有限元方法对模型进行初步模拟之后得到电子轨迹如图 2 所示,A 点表示金属电极、真空和发射材料三者交接点,B 点是能够到达阳极电子的发射初始位置中距阴极最近的那个点,C 点是电场竖直分量为 0 的点。 $L$  表示 A 点和 B 点的间距。尽管 AB 之间的区域具有较强的电场强

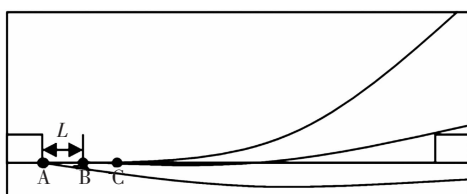


图 2 矩形电极模型中电子轨迹

Fig. 2 Electron trace in the emitter with rectangular electrodes

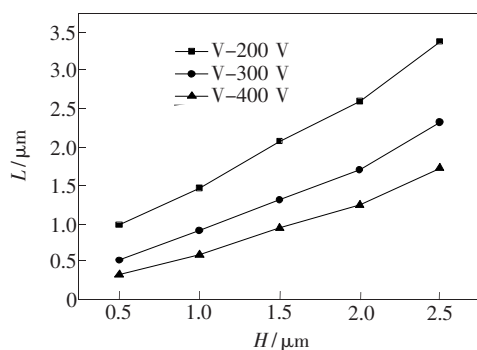
表 1 各模型中的参数

Table 1 Parameters in different models

模型	$H/\mu\text{m}$	$U/\text{V}$	$R/\mu\text{m}$
a	0.5/1.0/1.5/2.0/2.5	200/300/400	—
b	2.5	200/300/400	2/2.5/5/10/20

### 3 结果与讨论

首先讨论阴极电极的高度对从其附近发射出来的电子轨迹的影响。图 3 显示了在不同阳极电压下阴极高度与距离  $L$  的关系。当电极高度固定时,距离  $L$  随着阳极电压的升高而减小;当阳极电压固定时,距离  $L$  随着电极高度的减小而减小。总的来说,大的阳极电压和小的电极高度有助于提高电子发射效率,图中当阳极电压为 400 V、电极高度是  $0.5 \mu\text{m}$  时, $L$  可以减小到  $0.33 \mu\text{m}$  正表明了这个结论。

图 3 阳极电压和矩形电极高度对距离  $L$  的影响Fig. 3 Influence of the anode voltage and the rectangular electrode height on the distance  $L$ 

为了从电场分布上来分析产生上述结论的原因,在  $H$  为  $1.5 \mu\text{m}$ ,阳极  $U$  为 200 V 的模型中计算电场分布,因为阴极高度远小于电极间隙,所以认为电子能否到达阳极板主要看电场竖直分量值 ( $E_Y$ ) 而不是水平分量 ( $E_X$ ) 的变化,即  $E_Y$  对  $L$  的

度,但是在 AB 之间发射的电子却不能到达阳极板,因此可以说  $L$  值越大,电子的发射效率就越小。由此可见减小距离  $L$  的长度是很有意义的工作。为了减小  $L$  值,设计阳极电压分别取值 200,300 V 和 400 V,在每一个电压下改变矩形电极的高度和弧形电极的弧边半径,具体参数如表 1 所示,并利用有限元方法分析这些模型研究电子轨迹。

大小有主要影响。图 4 表明了  $E_Y$  在阴极附近的分布。由于  $E_Y$  是阴极和阳极产生的电场中的竖直分量 ( $E_{YA}$ ) 与栅极和阴极产生的电场的竖直分量 ( $E_{YG}$ ) 的合场强,图 4 中也给出了  $E_{YA}$  和  $E_{YG}$  在阴极附近的分布。从图 4 可知,在 AB 区域,  $E_{YG}$  大于  $E_{YA}$ , 导致  $E_Y$  方向向上,电子受到向下的力,从而使得电子达不到阳极板。而  $E_{YA}$  是正值或者很小的负值的主要原因则是阴极电极的屏蔽作用。

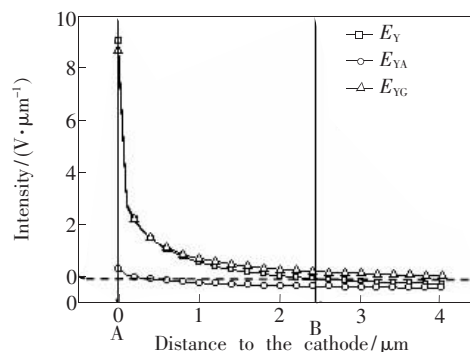
图 4 矩形电极高度为  $1.5 \mu\text{m}$ 、阳极电压为 200 V 模型中阴极附近  $E_Y$ 、 $E_{YA}$ 、 $E_{YG}$  的分布曲线。Fig. 4 Distribution of  $E_Y$ ,  $E_{YA}$  and  $E_{YG}$  near the rectangular cathode with the cathode height of  $1.5 \mu\text{m}$  and the anode voltage of 200 V.

图 5 为阴极电极的高度对阳极电场的屏蔽效应。如图所示,当阳极电压为 200 V 时,不同模型中  $E_Y$  在阴极附近的分布会随着电极高度的变小而变小,而且电极高度越小,  $E_Y$  越快达到负值,即  $L$  值将会变得越小。因此,电极高度越小,阴极

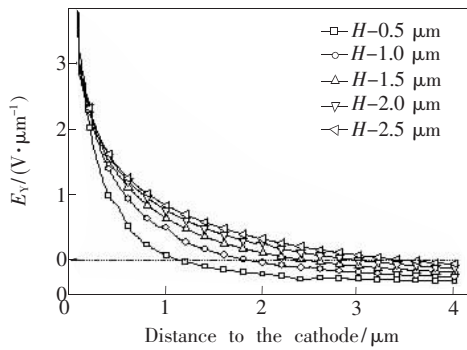


图 5 阳极电压为 200 V 下不同电极高度的模型中  $E_Y$  在阴极附近的分布曲线

Fig. 5 Distribution of  $E_Y$  near the rectangular cathode with different cathode heights from 0.5  $\mu\text{m}$  to 2.5  $\mu\text{m}$  under the anode voltage 200 V

对阳极电场的屏蔽效应越小。

图 6 显示了阴极电极的形状对从其附近发射出来的电子的轨迹的影响。不同半径的弧边模型中  $L$  值的变化曲线。弧边半径  $R$  相同时,  $L$  随着阳极电压的升高而减小, 在这点上与矩形电极中的情况相同。当阳极电压固定时,  $L$  随着  $R$  的变大而变小, 并且当  $R$  大于 5  $\mu\text{m}$  之后,  $L$  的变化速率会变得很小。相对于  $H$  为 2.5  $\mu\text{m}$ , 阳极电压为 400 V 的矩形电极模型中的  $L$  值(1.72  $\mu\text{m}$ ), 在  $H$  为 2.5  $\mu\text{m}$ , 阳极电压为 400 V, 弧边半径为 10  $\mu\text{m}$  的弧边模型中,  $L$  值减小到 0.5  $\mu\text{m}$ 。这表明弧形阴极电极的屏蔽效应远小于矩形电极。

图 7 为弧形阴极电极附近的电场强度分布, 其中阳极电压为 200 V, 弧形电极的半径为 5  $\mu\text{m}$ 。如所示, 电场分布图与矩形电极模型(图 5)的趋势相同, 但是在 AB 区域弧形电极模型中的  $E_{YA}$  要小于矩形电极模型中的  $E_{YA}$ 。这同样表明了弧

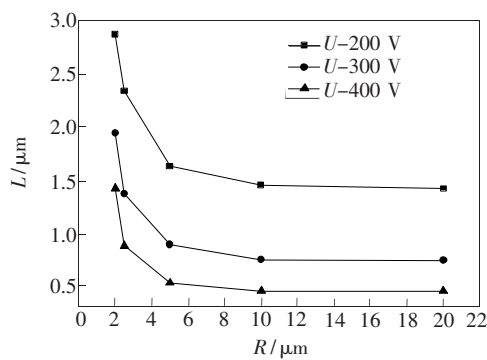


图 6 阳极电压和弧形电极弧边半径与距离的关系曲线  
Fig. 6 Influence of the anode voltage and the arched radius on the distance  $L$

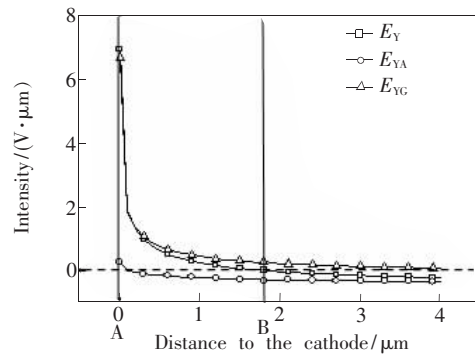


图 7 不同弧边电极模型中阴极附近  $E_Y$ 、 $E_{YA}$ 、 $E_{YG}$  的分布曲线

Fig. 7 Distribution of  $E_Y$ ,  $E_{YA}$  and  $E_{YG}$  near arched cathode

形电极的屏蔽效应要小于矩形电极。

图 8 为不同弧形模型中阴极附近电场垂直分量  $E_Y$  的分布曲线, 其中阳极电压固定为 200 V。由图可知, 弧形半径越大,  $E_Y$  越小, 并且越快的达到负值。但是当弧形半径  $R$  大于 5  $\mu\text{m}$  之后, 不同弧形半径的模型中的  $E_Y$  曲线便已经几乎重合在了一起, 这表明大的弧形半径有利于减小阴极电极的屏蔽效应, 但是当弧形半径足够大时, 再增大半径将会产生很小的改变。

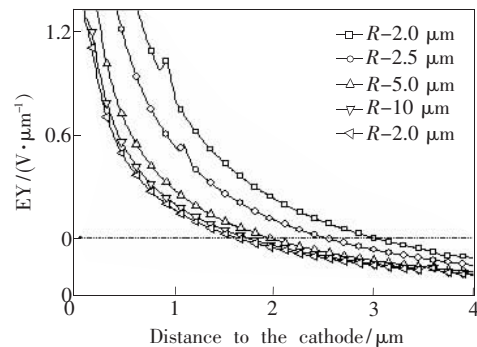


图 8 阳极电压为 200 V 下不同弧边半径的模型中阴极附近  $E_Y$  的分布曲线

Fig. 8 Distribution of  $E_Y$  near the arched cathode with different arched radii from 2  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$  under the anode voltage 200 V

可以看出得到降低电极高度, 增大阳极电压, 使用大半径的弧形电极可以帮助减小间距  $L$ 。如果电极高度  $H$  为 0.5  $\mu\text{m}$ , 弧形半径为 20  $\mu\text{m}$ , 阳极电压为 400 V, 计算得到的  $L$  值仅为 0.2  $\mu\text{m}$ 。

### 4 结 论

研究了平面栅形场发射模型, 用有限元方法

模拟了电场分布以及阴极附近发射电子的轨迹。模拟结果表明,在阴极附近一定范围内发射的电子无法到达阳极板。通过模拟计算阴极电极高度

和形状以及阳极电压对电子轨迹的影响,发现降低电极高度、增大阳极电压、使用大半径的弧形电极可以提高电子发射效率。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] Nagao M, Utsumi K, Gotoh Y, *et al.* Dependence of emission characteristics of spindt-type field emitters on cathode material [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1999, 146(4):182-186.
- [ 2 ] 李玉魁,朱长纯. 新型三极碳纳米管场发射器件的研究 [J]. *液晶与显示*, 2004, 19(6):423-426.
- [ 3 ] Dragone C C A, Edwards R C. Kistler. Integrated optics N×N multiplexer on silicon [J]. *IEEE Photon Technol Lett.*, 1991, 3(2):896-899.
- [ 4 ] Choia Y S, Kanga J H, Parkb Y J, *et al.* An under-gate triode structure field emission display with carbon nanotube emitters [J]. *Diamond and Related Materials*, 2001, (2):1705-1708.
- [ 5 ] 张婷,郭太良. 平面栅形 FED 的模拟研究 [J]. *现代显示*, 2009, 97(3):28-31.
- [ 6 ] Fedorovich R D, Naumovets A G, Tomchuk P. M. Electron and light emission from island metal l ms and generation of hot electrons in nanoparticles [J]. *Physics Reports.*, 2000, 328(2): 73-79.
- [ 7 ] Lei Wei, Zhang Xiaobing, Wang Baoping, *et al.* A stable field-emission light source with ZnO nanoemitters [J]. *IEEE Electron Device Letter*, 2008, 29(5):452-455.
- [ 8 ] Lee C J, Lee T J, Lyu S C, *et al.* Field emission from well-aligned zinc oxide nanowires grown at low temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(19):3648-3650.
- [ 9 ] Ternyak O, Akhvediani R, Hoffman A, *et al.* Field electron emission from undoped, continuous, submicron-thick diamond films. [J]. *Appl. Phys.*, 2005, 98(12):123522(1-3).
- [10] Qu Ke, Li Chi, Hou Kai, *et al.* High efficiency surface-conducted field emission from a ZnO nanotetrapod and MgO nanoparticle composite emitter. [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(25):253501(1-3).
- [11] 孙宏博,吴胜利,张劲涛. SED 的磁控溅射法制作技术试验研究 [J]. *真空电子技术*, 2008, 89(35):30-33.
- [12] Li Chi, Hou Kai, Lei Wei, *et al.* Efficient surface-conducted field emission from ZnO nanotetrapods [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(16):163502(1-3).
- [13] Zhu Dan, Li De Jie, Wang jian. Electron emission from Pd-carbon compound film on carbon nanoislandschem [J]. *Phys. Lett.*, 2008, 93(12):123118(1-3).
- [14] Yuan Guang, Jiang Jinjing, Li Chun. Simulation of self-focusing electron emitter [J]. *J. Vac. Sci. Tech. B*, 2010, 28(2):627-630.