

# 碳纳米管场发射背阴极式三极结构及其模拟

陆 旭<sup>1</sup>,狄云松<sup>2</sup>

(1. 江苏联合职业技术学院镇江分院,江苏 镇江 212016)  
(2. 南京师范大学物理科学与技术学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 提出了一种碳纳米管新型的背阴极式场发射三极结构. 在这种结构中,带有孔阵列的薄玻璃基板作为阴极基板,碳纳米管阴极材料通过丝网印刷的方法装配在玻璃孔周围的阴极电极上. 栅极电极则装配在阴极材料下方另一块基板上,在玻璃孔对面与之相对的则为覆盖有 ITO 电极和荧光粉层的阳极基板. 在阳极基板上施加高电压,强电场则通过玻璃孔渗透到碳纳米管的表面使之发射,电子穿过玻璃通道轰击阳极,在栅极电极上施加反向电压用以减小阴极表面的电场从而关闭阴极发射达到调制效果. 本文通过电场和电子轨迹的计算机模拟,验证此场发射三极结构的可行性并得出它的调制特性.

[关键词] 碳纳米管,场发射器件,三极结构,调制特性

[中图分类号] O462.4 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2013)01-0054-05

## Back-Cathode Triode Structure for CNT and Its Simulations

Lu Xu<sup>1</sup>, Di Yunsong<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Union Technical Institute, College of Zhenjiang, Zhenjiang 212016, China)  
(2. Nanjing Normal University, School of Physics and Technology, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** A new field emission triode structure with carbon nanotube (CNT) cathode called back-cathode is proposed. In this triode structure, a glass substrate with an array of holes is used as the cathode plate. The carbon nanotube emitters are printed around the holes on the cathode electrode. The gate electrodes are fabricated on another substrate which is mounted below the cathode substrate. Because a high anode voltage is applied, the electric field produced by the anode voltage can penetrate into the CNT cathode area. A negative voltage is applied on the gate electrode to control the emission current from the CNT cathode. The electrical field distribution and electron trajectories have been simulated, and the modulation feasibility and working modes of the structure have been discussed.

**Key words:** carbon nanotube, field emission device, triode, modulation characteristic

碳纳米管所表现出的优异的场发射特性、化学稳定性和力学特性得到了研究人员的充分关注而成为场发射阴极材料. 一些研究人员和机构先后报道了用碳纳米管材料制作的场发射阴极及器件<sup>[1-3]</sup>. 和二极结构相比,三极结构能同时具备调制电压低和电子能量大的优点. 因此从碳纳米管场发射器件的实用性角度来说,三极结构的设计与制作才是研究问题的关键和难点. 迄今为止也已提出了很多种碳纳米管场发射的三极结构,其中较为典型的有:Normal-gate 三极结构<sup>[4]</sup>、Under-gate 三极结构<sup>[5]</sup>、HOP 三极结构<sup>[6]</sup>等.

Normal-gate 三极结构被认为是基本的且最为有效调制的设计<sup>[4,7]</sup>. 但是低调制电压需要非常小的栅极孔径和很短的阴极、栅极距离,这对 Normal-gate 结构的制作工艺提出了很高的精度要求. 这种结构一般是在高精度的蚀刻工艺和光刻工艺下完成的,而碳纳米管发射体的装配也是通过复杂的 CVD 工艺实现. 因此此结构实现难度大、成品率低,而且栅极上的漏电流也很严重. LG. PHILIPS 公司随后提出了一种电子跳跃式的三极结构,俗称 HOP 结构<sup>[6,8,9]</sup>. 这种结构利用了材料二次电子发射的特性改善了一些器件特性.

收稿日期:2012-05-04.  
基金项目:国家自然科学基金(61101023)、江苏省高校自然科学基金(2009102TSJ0122).  
通讯联系人:狄云松,博士,讲师,研究方向:物理电子学. E-mail:diyunsong@njnu.edu.cn

基于这种 HOP 结构利用了电子通道的构思,我们提出了一种新型的碳纳米管场发射三极结构.在这种新型的三极结构中,将带有孔阵列的薄玻璃基板作为阴极基板,碳纳米管发射材料制作成印刷用浆料通过丝网印刷的方法装配在玻璃孔周围的阴极电极上.栅极电极则装配在阴极材料下方另一块基板上,在玻璃孔对面与之相对的则为覆盖有 ITO 电极和荧光粉层的阳极基板.图 1 给出了这种结构的三维示意图.在阳极基板上施加高压,强电场则通过玻璃孔渗透到碳纳米管的表面使之发射,电子穿过玻璃通道轰击阳极荧光粉层,在栅极电极上施加反向电压用以减小阴极表面的电场从而关闭阴极发射达到调制效果.因为栅极上的工作电压可以设为负电压,则可以有效地避免栅极漏电流的出现.

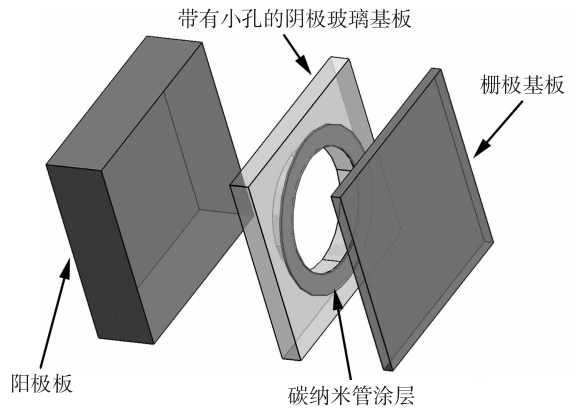


图 1 新型三极结构的三维示意图

Fig. 1 3D schematic diagram of new triode structure

## 1 计算模型

本文通过计算机模拟的方法表现这种新型三极结构的碳纳米管场发射性能.运用有限元方法为这种结构建立了一个数值计算的模型,计算其静电场的空间分布和电子轨迹.从图 1 可知这种结构可以简化为一个轴对称模型.为了缩短计算周期,计算可以在 1 个二维柱坐标中进行.则静电场的 Laplace 方程在柱坐标中可表示为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

其中  $V$  表示空间中的静电势,  $r, z$  分别为各轴上的坐标变量.

结构参数和各个电极上施加的电压值决定了空间电场分布,从而决定了所采用结构的调制特性和聚焦特性.不失一般性,在我们的计算中选择了个特定的结构参数和电压值来验证这种三极结构的调制可行性,具体的结构参数如图 2 所示.因为所用到的发射材料为丝网印刷形成的碳纳米管发射体,其分布具有随机性,同时考虑到现有的计算容量,不可能得到每一根碳管附近的电场分布.因此在我们的计算模型中,我们把印有碳纳米管发射体的阴极作为整体发射电极看待<sup>[10,11]</sup>.当施加在所有电极上的电压确定后,空间各点上的电场强度即可得到.

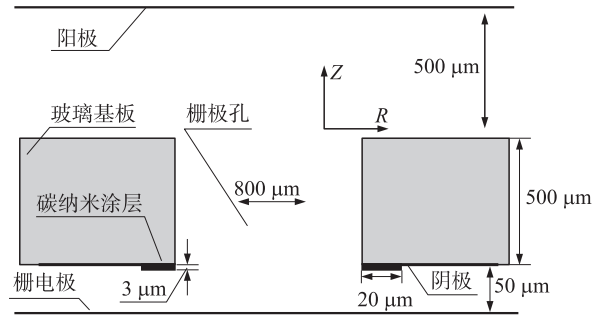


图 2 计算中所用到的结构模型及各个结构参数设置值

Fig. 2 All parameters and values of the structure used in the simulation

在得到了空间各点上的电场强度后,即可通过 Fowler-Nordheim 公式计算出发射电流.所采用的 Fowler-Nordheim 公式的具体形式为:

$$J = \frac{AE^2}{\phi t^2} \exp \left( \frac{-Bv(y)\phi^{\frac{3}{2}}}{E} \right), \quad (2)$$

其中  $A = 1.5415 \times 10^{-6}$ ,  $E$  为发射体表面的电场强度的大小,  $\phi$  是发射体的功函数,  $B = 6.8308 \times 10^9$ ,  $t^2$  和  $v(y)$  为椭圆函数,  $t^2$  可以取近似值 1.1,  $v(y) = 0.95 - y^2$ ,  $y = 3.79 \times 10^{-5} \times E^{1/2} / \phi$ <sup>[10]</sup>.

从以上公式中可知,如果给定碳纳米管的功函数,发射电流密度可由发射体表面的电场强度求得.但是考虑到在计算模型中已经将发射体当作整体平面电极看待,电场屏蔽效应使得计算得到的电极平面上的电场强度要远小于发射体表面上的实际电场强度<sup>[12]</sup>.为了得到一个相对准确的发射体表面的电场强度,采用对计算得到的电场强度乘以 1 个场增强因子  $\beta$  的办法.但场增强因子  $\beta$  和发射材料形貌密切相关.

关,不同发射材料对应不同的场增强因子. 相同材料不同形貌,场增强因子也不同,而与器件具体结构无关. 本文旨在讨论这种新的三极结构调制的可行性,忽略应用不同的发射材料而得到不同调制特性的区别,我们通过二极管结构下发射实验得到一种特定的丝网印刷型碳纳米管阴极的场增强因子,将它代入模拟计算中得到此种三极结构的调制特性,证明此结构在原理上的可行性.

结合我们以前的二极管结构下对于丝网印刷型碳纳米管发射阴极场发射测试的工作,我们得到一个二极管结构下丝网印刷碳纳米管阴极场发射的  $I$ - $V$  曲线,并求得了  $J$ - $E$  关系,如图 3(a)(b)所示. 将  $F$ - $N$  曲线的斜率代入公式(3)<sup>[13]</sup>:

$$\beta = \frac{E_{\text{tip}}}{E} = 0.95b\phi^{3/2}d/k,$$

(3)

其中  $k$  为  $F$ - $N$  曲线的斜率,  $d$  为二极管测试中阴极和阳极间距.

我们采用的碳纳米管的功函数  $\varphi$  约为 4.5 eV<sup>[13]</sup>,算得此碳纳米管阴极的场增强因子  $\beta=1\,058$ . 最后三极结构中发射电流的计算应用公式(4)得到<sup>[14]</sup>:

$$I_c = \iint_s J \cdot ds$$

(4)

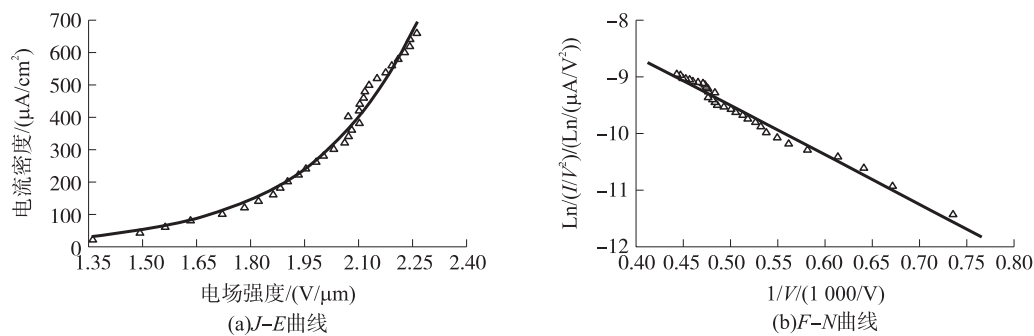


图 3 一个丝网印刷型碳纳米管阴极二极管结构下场发射测试得到的  $J$ - $E$  曲线和  $F$ - $N$  曲线  
Fig. 3 Field emission results from a CNT cathode in a diode configuration

在模拟计算中,施加在阴极和阳极上的电压分别为 0 V 和 6 000 V. 碳纳米管阴极材料为环状分布在玻璃孔的周围,内径为 0.8 mm,外径为 0.82 mm,总发射面积可以算得为 0.025 5 mm<sup>2</sup>. 当栅极上的电压确定后,空间电场即可计算得到,那么从阴极发射出的总电流可以联立计算公式(2)~(4)得到. 我们计算得到栅极电压在-50~+60 V 间总电流和栅极电压之间的对应关系,即为这种三极结构下的一条调制电压曲线,如图 4 所示.

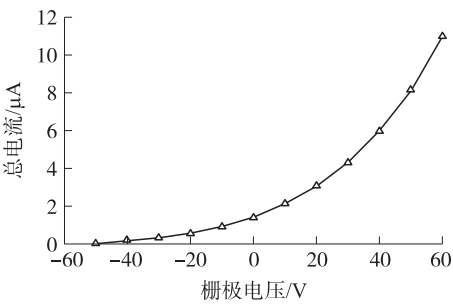


图 4 新型三极结构的栅极调制曲线  $I_{\text{total}}-V_g$ ,  
其中阳极电压为 6 000 V,阴极电压为 0 V  
Fig. 4 Modulation curve ( $I_{\text{total}}-V_g$ ) of the new triode structure,  
with anode voltage 6 000 V, and cathode voltage 0 V

2 讨论

在一个典型的 Normal-gate 结构中,电子将被栅极电场激发出然后由阳极电场加速最终轰击到阳极上. 这样栅极电压必须为正向电压. 其典型的栅极周围的电场分布如图 5(a)所示. 要想关闭电子的发射,所有的电子发射必须是由栅极激发而不能是被阳极激发. 这对 Normal-gate 结构的制作提出了很高的要求:栅极孔径和阴极-栅极间距很小. 这是制作 Normal-gate 结构的难点,文献中报道的这种三极结构均是在高精度微电子蚀刻工艺下完成的,且成品率很低. Normal-gate 结构中栅极的漏电流也是它的一个亟待解决的技术难点<sup>[15]</sup>.

在我们提出的这种新型三极结构中,电子的发射是靠阳极强电场渗透过玻璃通道后激发阴极基板另一侧的碳纳米管发射体而产生的. 典型的阴极和栅极周围电场分布如图 5(b)所示. 相对于 Normal-gate 结构来说施加在阳极上的电压很高,电子有很大的能量轰击阳极荧光粉层达到高亮度的要求. 在阴极下方的

栅极电极上施加反向电压,用以减小发射体表面电场即可达到关闭电子发射的要求. 因为栅极上为反向电压,电子不能达到栅极从而不存在栅极的漏电流,这是这种新型三极结构的一大优点.

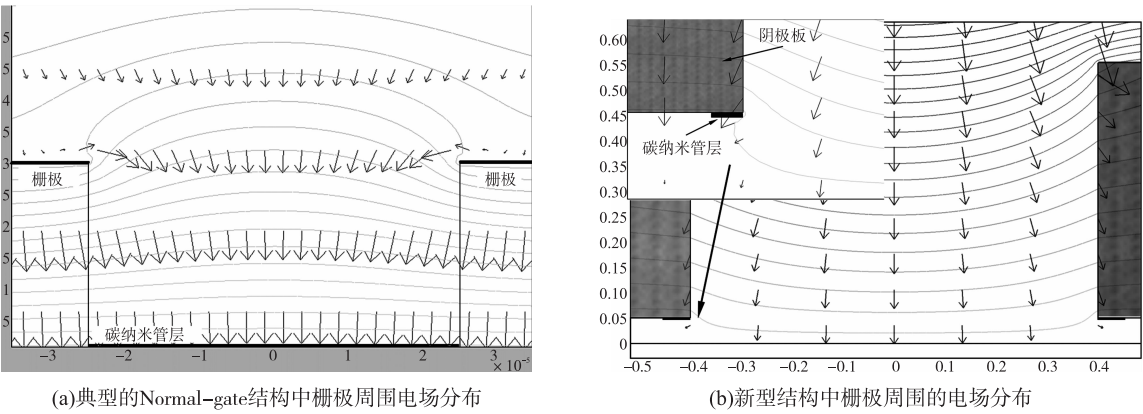


图5 (a)典型的Normal-gate结构中栅极周围电场分布;(b)新型结构中栅极周围的电场分布  
Fig.5 (a)Electric field displacement around the gate in a Normal-gate structure;(b) Electric field displacement around the gate in this new triode structure

新型三极结构的另一个优点在于阴极的实际发射面积较Normal-gate结构中的发射面积大. 在Normal-gate结构中阴极发射体的面积受制于栅极孔径,一般在这种结构中的栅极孔径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以下,则1个像素的阴极发射总面积小于 $0.002\text{ mm}^2$ . 而在这种新型的三极结构中由于采用环形阴极图案,大大增加了阴极的面积,在我们计算中采用的结构参数下阴极的发射面积达到了 $0.025\text{ mm}^2$ ,远大于Normal-gate结构中的阴极面积.

在这种新型三极结构中,尽管用反向栅极电压关闭电子发射,也可以为了降低阳极电压而使栅极上施加正向电压来达到增大发射电流的效果. 但考虑到阳极电压过高可能导致隔离体击穿等问题,栅极所施加的正向电压必须限制在1个最大数值内,超过这个数值将会导致总电流增加而阳极电流反而降低. 图6(a)(b)(c)是在阳极电压为 $6\text{ }000\text{ V}$ ,栅极电压分别在 $20\text{ V}$ 、 $80\text{ V}$ 、 $120\text{ V}$ 下得到的电子轨迹图,说明了当栅极上正向偏置电压过大时导致栅极电流很大从而使器件失效甚至烧毁.

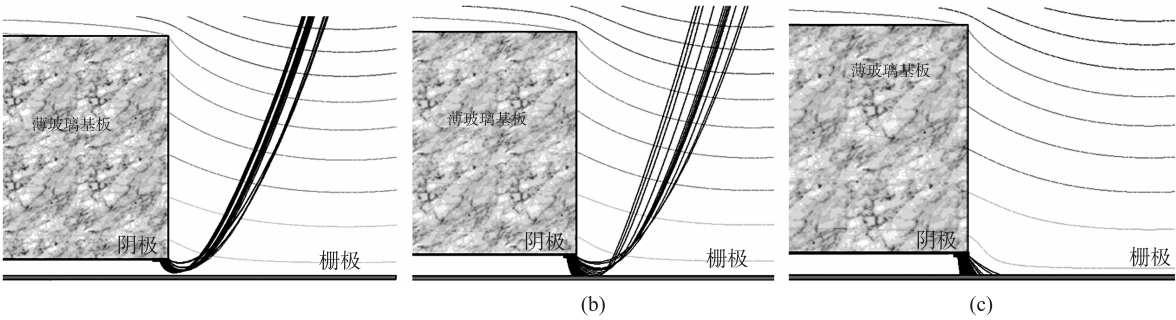


图6 不同的栅极正向偏置电压下电子轨迹图  
Fig.6 Electron trajectories at different positive gate bias

这种新型三极结构的碳纳米管场发射设计从原理上来说较为适合大电流或大功率器件,但在碳纳米管场发射显示器件的应用上还有一定的缺陷. 其原因有两个:一、采用的玻璃通道的孔径较大,达不到显示的要求;二、在玻璃上制作小孔阵列的工艺较为昂贵且大面积封接时容易导致基板的破碎. 这种结构能否得到实际的应用还需很多的计算和实验验证工作,具体涉及到电子束的形态分布计算、结构参数调整、电极电压设置等工作.

3 结论

提出了一种新型的碳纳米管场发射的三极结构,在赋予特定的结构参数和特定阴极发射数据的基础上,用数值模拟的方法得到了栅极的调制特性和电子轨迹,显示出这种结构具有一定的调制效果. 和

Normal-gate 结构相比,这种新型的三极结构具有制作工艺简单、阴极发射面积大、栅极漏电流改善等优点. 为碳纳米管场发射三极结构的设计提供了一条新的思路.

### [参考文献]

- [1] Wang Q, Setlur A, Lauerhaas J, et al. A nanotube-based field-emission flat panel display[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(22): 2 912–2 913.
- [2] Fan S, Michael G, Nathan R, et al. Self-oriented regular arrays of carbon nanotubes and their field emission properties[J]. Science, 1999, 283(5401): 512–514.
- [3] Lei W, Zhang X, Chen J, et al. Very high field emission from a carbon nanotube array with isolated subregions and balanced resistances[J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2011, 58(10): 3 616–3 621.
- [4] Wang Q, Yan M, Chang R. Flat panel display prototype using gated carbon nanotube field emitters[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(9): 1 294–1 296.
- [5] Choi Y, Kang J, Park Y, et al. An under-gate triode structure field emission display with carbon nanotube emitters[J]. Diamond and Related Materials, 2001, 10(9): 1 705–1 708.
- [6] Visser H, Rosink J, Gillies M, et al. Field emission display architecture based on hopping electron transport[C]. SID Symposium Digest, 2003, 34: 806–809.
- [7] Jung J, Choi J, Park Y, et al. Development of triode-type carbon nanotube field-emitter arrays with suppression of diode emission by forming electroplated Ni wall structure[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2003, 21(1): 375–381.
- [8] Zhong X, Wilbert P, Engelsens D, et al. Monte Carlo calculation of electron transport through hop and flu spacers in HOPFED[J]. J Soc Inf Display, 2004, 12: 203–206.
- [9] Zhao H, Lei W, Zhang X, et al. Simulation of the cathode surface damages in a HOPFED during ion bombardment[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2005, 23(6): 3 148–3 152.
- [10] Garner D, Amaratunga G. Analytic modelling of the thin-film field-emission triode[J]. Solid-State Electronics, 2001, 45(6): 879–886.
- [11] Lee C, Cheng H. Planar triode structure carbon nanotubes field emission display[C]. SID Symposium Digest, 2003, 34: 922–925.
- [12] Nilsson L, Groening O, Emmenegger C, et al. Scanning field emission from patterned carbon nanotube films[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(15): 2 071–2 073.
- [13] Li J, Lei W, Zhang X, et al. Field emission characteristic of screen-printed carbon nanotube cathode[J]. Applied Surface Science, 2003, 220(1): 96–104.
- [14] Wei L, Zhang X. Study of the triode structure in a field emission display element[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2006, 24(2): 962–966.
- [15] Jang Y, Choi C, Ju B, et al. Suppression of leakage current via formation of a sidewall protector in the microgated carbon nanotube emitter[J]. Nanotechnology, 2003, 14: 497–500.

[责任编辑:顾晓天]