

场发射显示器环境下不同置向碳纳米管的尖端电场强度计算

任华锋, 田昌会, 王斌科, 屈马林

(空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051)

摘要:针对碳纳米管场发射显示器的实际工作环境,计算给出了碳纳米管在垂直、与垂直碳纳米管等长倾斜45°和与垂直碳纳米管等高倾斜45°放置3种情况下的空间电势分布和电场分布,数值计算表明在上述3种情况下的碳纳米管尖端表面附近的电场强度比值约为13:10:12。进一步分析说明在垂直和倾斜碳纳米管同时存在的条件下,要提高电子发射的均匀性,就必须提高倾斜碳纳米管的高度。

关键词:碳纳米管;场发射;电场强度

中图分类号: TN873 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)05-0067-03

碳纳米管以其优良的场发射性能,低的驱动电压引起国内外研究者的广泛关注。碳纳米管场致发射显示器具有质量轻、厚度薄、亮度高、分辨率高和功耗小等显著的优点,是一种具有广泛应用前景的显示器件^[1-3]。在碳纳米管场发射显示器中,电子发射主要取决于碳纳米管尖端的电场强度,电子发射状态下电场强度的微小变化会对场电子发射产生较大影响。碳纳米管尖端电场强度的差异导致电子发射的不均匀,也会加速场发射显示器的失效。如何提高碳纳米管场发射显示器中碳纳米管尖端的电场强度一致性就成为亟待解决的问题。影响碳纳米管场发射显示器中碳纳米管尖端的电场强度的因素主要有:碳纳米管的高度、密度及方向。关于碳纳米管的高度、密度对尖端电场强度的影响已有许多人做到计算^[4-10]。这些计算都以碳纳米管垂直放置为基础,未涉及碳纳米管倾斜的问题。然而在实际的碳纳米管阴极制备过程中,无论采用直接生长法还是间接移植法都无法保证碳纳米管的完全直立。为了比较分析不同方向放置碳纳米管的电场强度差异,本文计算了单根碳纳米管直立、等长倾斜45°、等高倾斜45°这3种情况下的尖端电场强度,以比较出何种情况下场发射性能最好。

1 模型的建立

碳纳米管具有良好的导电性,在这里将其作为导体来处理,认为其和阴极电极一起构成等势体,如图1所示。因此碳纳米管所处的静电场空间满足拉普拉斯方程为 $\nabla^2\phi=0$ 。

对于图1(a)所示的碳纳米管直立情况,由于碳纳米管具有对称性,可以用很多方法来求解,如交替方向迭代法(ADI)、表面电荷法等,但是对于图1(b)所示的碳纳米管倾斜情况因不具有对称性,用这些方法难以得到其数值解。因此我们选用有限元方法(FEM)对这2种情况进行求解。在图1所示情况下,其上下计算边界条件满足第1类边界条件,即狄里克里(Dirichlet)边界条件,其左右计算边界满足第2类边界条件,即纽曼(Newman)边界条件。设定边界条件后,为了提高计算的精度和计算速度,把要求解的区域分解成很多

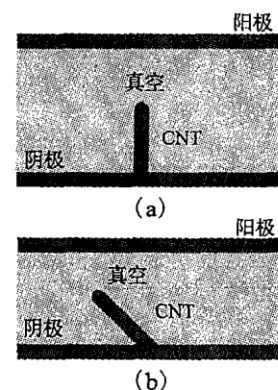


图1 结构示意图

收稿日期:2007-01-10

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2006F32)

作者简介:任华锋(1983-),男,安徽界首人,硕士生,主要从事碳纳米管场发射显示器研究;
田昌会(1963-),男,陕西合阳人,教授,主要从事碳纳米管场发射显示器研究。

大小不同的三角形,在碳纳米管附近三角形面积较小,远离碳纳米管附近三角形面积较大,每一个三角形 3 个顶点为所要求的电势值。考虑到计算的主要目的是为了比较碳纳米管直立、倾斜情况下碳纳米管尖端电场强度的差异,为此将实体的三维结构简化为二维模型处理。

2 电场强度的计算

根据建立的计算模型,在碳纳米管场发射显示器阴阳极电压为 300 V,间距为 200 nm,碳纳米管长为 200 nm 的条件下,利用 Matlab 的 PDE 工具箱,计算的碳纳米管场发射显示器阴阳间的空间等势线分布如图 2 所示。为了验证计算方法的正确性,将图 2(a)的结果与 Murata^[7-8]采取的表面电荷法的计算结果进行了对比,其一致性反映了该方法的正确性。图 2(a)和(b)中垂直和倾斜的碳纳米管长度是相同的,图 2(b)中碳纳米管倾斜度为 45°。

电场强度的大小通过差分方法计算。根据静电场理论,有:

$$E = -\nabla\phi = -\left(x \frac{\partial\phi}{\partial x} + y \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) \tag{1}$$

对式(1)进行 3 点差分,可得到式(2)、(3)。

$$E_x^n = -\frac{\phi^{n+2} - \phi^n}{\Delta x_1 + \Delta x_2} ; E_y^n = -\frac{\phi^{n+2} - \phi^n}{\Delta y_1 + \Delta y_2} \tag{2}$$

$$E^n = \sqrt{(E_x^n)^2 + (E_y^n)^2} \tag{3}$$

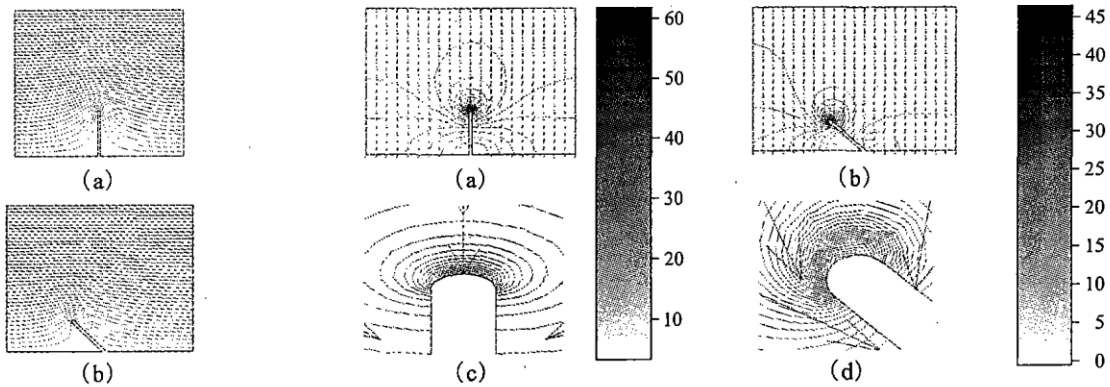


图 2 所求场空间等电势线分布

图 3 场空间内电场线和电场强度等值线图

由于有限元所划分的网格大小不同,所以 3 点差分公式在这里作了必要的改动,即是把原来的 $2\Delta x, 2\Delta y$ 改变为 $(\Delta x_1 + \Delta x_2)$ 和 $(\Delta y_1 + \Delta y_2)$ 。由式(1)、(2)、(3)计算了在碳纳米管周围的电场分布,如图 3 所示,图中箭头表示电场强度的大小和方向,实曲线为电场强度大小的等值线。图 3(c)、(d)为碳纳米管尖端附近的放大图像。由图中我们可以看出碳纳米管尖端处的电场强度最大,碳纳米管底部的电场强度最小,这和静电场理论相符合。

图 2、图 3 所示为倾斜碳纳米管与垂直碳纳米管等长的情况,在实际的碳纳米管场发射显示器中也存在

许多倾斜碳纳米管与垂直碳纳米管距阳极等间距的情况,为了分析这种倾斜碳纳米管与垂直碳纳米管尖端电场强度的差异,本文还计算了当倾斜碳纳米管与垂直碳纳米管距阳极等间距时的空间等势线和电场强度大小,其分布如图 4 所示。其中图 4(a)为等势线分布,图 4(b)中实线为电场强度的等值线,箭头为电场线,图 4(c)为图 4(b)中碳纳米管尖端附近的放大图像。

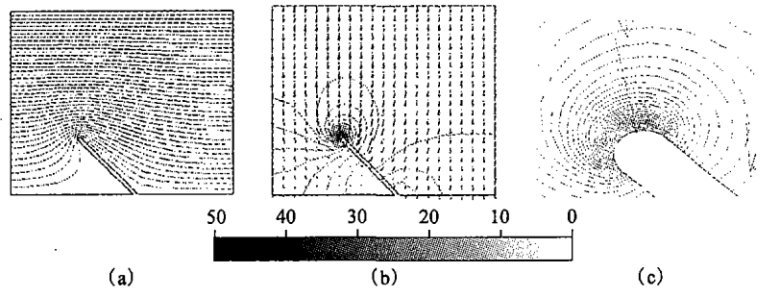


图 4 倾斜碳纳米管与垂直倾斜碳纳米管距阳极板等距时等势

由于电子发射依赖于碳纳米管的尖端最大电场强度,而最大电场强度通常处在碳纳米管尖端附近。为了量化反映不同置向碳纳米管尖端电场强度的差异,把所加背电场强度看作 1,根据式(1)、(2)、(3)在距碳纳米管尖端表面相同距离的条件下计算了在碳纳米管尖端表面附近的电场强度,计算结果为碳纳米管在垂直情

况下为 61.47,与垂直碳纳米管等长倾斜 45° 为 46.54,与垂直碳纳米管等高倾斜 45° 为 56.87。

3 结论

通过计算,给出了碳纳米管在垂直、与垂直碳纳米管等长倾斜 45° 和与垂直碳纳米管等高倾斜 45° 放置 3 种情况下的空间电势分布和电场分布,数值计算表明在上述 3 种情况下的碳纳米管尖端表面附近的电场强度比值约为 13:10:12。

在移植制作的阴极中,垂直和倾斜碳纳米管会同时存在,当碳纳米管密度一定的条件下,垂直放置碳纳米管其场发射性能具有明显的优势,这种优势也会导致电子发射的不均匀,要提高电子发射的均匀性,就必须提高倾斜碳纳米管的高度。这样才能使阴极中发射点均匀发射,防止个别发射点因发射电流过大而烧毁。

虽然在这里计算的只是单根碳纳米管,并将实际的三维结构简化为二维模型,计算值在具体的数值上可能与实际值有差异,但实际的碳纳米管场发射显示器研究主要关心的是相对结果,用相同条件下的计算值比较不会影响其结论。

参考文献:

- [1] 田昌会,朱长纯,王琪琨,等.真空度对碳纳米管场发射显示器的影响[J].空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(5):33-36.
- [2] Zhang Y N, Lei W, Zhang X B, et al. Calculation of the emission performance of the carbon nanotube array [J]. Applied Surface Science, 2005, 245(1-4): 400-406.
- [3] 林志贤,郭太良.场致发射显示器研究进展[J].光电子技术,2006,26(1):1-6.
- [4] Wang X Q, Ge H L. Modeling and simulation for the field emission of carbon nanotubes arrays [J]. Physica E - Low - Dimensional Systems & Nanostructures, 2005, 30: 101-106.
- [5] 李玉魁,刘兴辉.碳纳米管阴极场发射的电场数值模拟[J].辽宁大学学报:自然科学版,2006,33(2):168-171.
- [6] 朱亚波,王万录,孔春阳.碳纳米管表面电荷分布及尖端电场研究[J].重庆大学学报,2002,25(4):35-39.
- [7] idekazu Murata, Hiroshi Shimoyama, Toshimi Ohye. I. Simulation method and computing model[A]. In: Computer Simulation of Electric Field Analysis for Vertically Aligned Carbon Nanotubes[C]. 2001, 156-162.
- [8] Hiroshi Shimoyama, Hidekazu Murata, Toshimi Ohye. II Electric field on the nanotube apex[A]. Computer Simulation of electric field analysis for vertically aligned carbon nanotubes[C]. 2001, 163-171.
- [9] 胡陈果,杨楠,王乐,等.碳纳米管场发射的电场计算[J].真空科学与技术,2003,23.(2).111-115.
- [10] 邓建中,刘之行.计算方法(第二版)[M].西安:西安交通大学出版社.2001.

(编辑:田新华,徐楠楠)

Calculations of Electric Field to Different Setting Direction of Carbon Nanotubes Tip

REN Hua-feng, TIAN Chang-hui, WANG Bin-ke, QU Ma-lin

(The Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In view of actual environment of carbon nanotubes - field emission display, the electric field and electric potential distribution of single vertical carbon nanotube, including 45° with the same length of the vertical one and 45° with the same height, are calculated respectively. The results indicate that the electric field intensity's ratio for the three types of carbon nanotubes is about 13 : 10 : 12. The further analysis shows that if the uniformity of field emission is desired to obtain improvement, the height of inclining carbon nanotubes should be increased on condition that the vertical and inclining carbon nanotubes exist simultaneously in the cathode of field emission display.

Key words: carbon nanotube; field emission; electric field intensity