

接触电阻对碳纳米管场发射的影响*

吕文辉^{1)†} 张帅²⁾

1) (湛江师范学院物理系, 湛江 524048)

2) (湛江师范学院科技处, 湛江 524048)

(2011年8月8日收到; 2011年9月26日收到修改稿)

基于改进的悬浮球模型, 计算了碳纳米管和衬底间的接触电阻存在时碳纳米管顶端的局域电场, 并结合 Fowler-Nordheim (F-N) 场发射规律研究了接触电阻对碳纳米管场发射的影响. 研究表明, 接触电阻的存在, 在高电场区域接触电阻抑制了碳纳米管的电子场发射, 导致在高电场区域出现电流饱和及 FN 直线偏折现象. 其原因可归结为接触电阻使得在碳纳米管顶端的局域电场相对于没有接触电阻时相对地减少.

关键词: 碳纳米管, 场发射, 接触电阻, 电流饱和

PACS: 88.30.rh, 68.37.vj, 72.10.-d

1 引言

碳纳米管具有较小的曲率半径, 较大的长径比, 极高电导率, 卓越的机械强度和化学稳定性等优点^[1]使它成为理想的场发射阴极材料. 最早关于碳纳米管场发射研究的报道是 De Heer^[2]于 1995 年在 *Science* 杂志上发表. 随后的大量研究表明, 碳纳米管具有很低的场发射开启和阈值电场强度、很大的场发射电流密度以及较高的发射稳定性^[3]. 目前人们已经成功地获得了各种基于碳纳米管场发射电子源的原理型的真空微电子器件如: 场发射平面显示器^[4]、X 射线管^[5]和新型场发射光源^[6]等. 将这些器件实用化的一个关键是获得高效的碳纳米管场发射阴极. 因此如何优化碳纳米管阴极的场发射性能成为该研究领域的一个热点.

通常场发射规律的描述采用传统的 Fowler-Nordheim (FN) 公式^[7], 有

$$I_{\text{FN}} = 1.54 \times 10^{-6} S \frac{E^2}{\Phi} \exp \left[-\frac{6.83 \times 10^3 \Phi^{3/2}}{E^2} \right], \quad (1)$$

其中 I_{FN} 为场发射电流, $E = \beta E_{\text{APPL}}$ 为发射体表面的局域电场强度, E_{APPL} 为外加的电场强度, β

为发射体的几何场增强因子, Φ 为发射体的有效表面功函数, S 为发射体的有效发射面积. 若将 (1) 式对数化处理, 可得到 $\ln(I_{\text{FN}}/E_{\text{APPL}}^2)$ 和 $1/E_{\text{APPL}}$ 为线性关系, 被称为 FN 直线, 是确认电子发射是否为场致电子发射的判据. 依照 FN 理论, 场发射性能取决于电子源表面的几何场增强因子和表面有效功函数. 碳纳米管及半导体纳米线具有较高的长径比, 使其具有较大的场增强效应, 适合作为场发射电子源.

另一方面, 从电子输运的过程来看, 电子从衬底电极注入到准一维结构的碳纳米管或半导体纳米线必须穿过一个界面势垒, 其相关的电子通过界面的电输运对应一个高阻^[8,9]. 已经报道的研究工作中指明该界面电阻可能限制碳纳米管的场发射特性, 产生场发射电流饱和及 FN 直线弯曲的现象. 在这些研究中, 均将整个电子场发射过程归结为连续隧穿通过碳纳米管和衬底的接触界面势垒和碳纳米管和真空空间的表面势垒, 即采用“双势垒模型”^[8,9]来理解实验现象. 同时, 也有报道在氮化镓纳米线场发射电子源^[10]中也存在场发射电流饱和及 FN 直线弯曲的现象, 并指明其实质可能源于

* 广东高校优秀青年创新人才培育项目 (批准号:LYM08075) 和浙江大学硅材料国家重点实验室开放课题 (批准号:SKL2010-5) 资助的课题.

† E-mail: lvwenhuily@yahoo.com.cn

在界面电阻导致纳米线与衬底间存在电压降.

电子在接触界面的散射对碳纳米管和纳米线电子源的电场发射的影响不容忽视. 有必要澄清和获得接触电阻对碳纳米管的场发射性能影响的相关规律及其物理本质. 在本文, 考虑碳纳米管与衬底之间存在一个接触电阻, 利用改进的悬浮球模型计算了碳纳米管顶端的局域电场, 并结合 FN 场发射规律分析和讨论了接触电阻对碳纳米管场发射的影响及相关物理过程.

2 模型和计算

为了引入碳纳米管的纳米尺寸效应, 简单地认为碳纳米管为顶端为半球的圆柱体, 圆柱的高度为碳纳米管的高度, 圆柱的半径和半球的半径为碳纳米管的半径, 并且圆柱体的碳纳米管直立在衬底电极上作为场发射电子源^[11]. 不考虑接触电阻时, 王新庆等^[11-13]依照静电场的分布特性进一步简化碳纳米管, 建立了如图 1(a) 所示的求解碳纳米管顶端局域电场的悬浮球模型, 即将碳纳米管看作是一个悬浮在两个平行电极板之间的金属球体, 球的半径为碳纳米管顶端的曲率半径 ρ , 球心距离阴极的高度为碳纳米管的高度 h , 球处在电场强度为 E_{APPL} 的空间中, 球的电势与接地的衬底电极相同, 即球的电势 $\varphi = 0$.

考虑到接触电阻存在时, 碳纳米管与衬底电极间的电势将不在相同, 而是存在着一个电势差 V_T , 即球的电势 $\varphi = V_T$. 为此, 我们改进了浮动球模型如图 1(b) 所示, 即在悬浮球模型基础之上将球的电势变为 V_T . 依照针对悬浮球模型所建立的镜像电荷模型^[11-13]的求解近似, 球上的感应电荷和阴极板上的感应电荷对空间电场的影响用一个点电荷 $-Q$ 和垂直于极板的镜像电偶极矩 $-P$ 以及一个镜像电荷 $+Q$ 和一个方向垂直于极板的镜像电偶极矩 $+P$ 来代替. 则以球的中心为原点, 竖直向上的方向为 z 轴的球坐标系下, 靠近球面的点 (r, θ) 的电势 $\varphi(r, \theta)$ 可以近似为^[11-13]

$$\varphi(r, \theta) = \frac{[-Q(1-r/2h)]}{(4\pi\epsilon_0 r)} + E_{\text{APPL}} h + \frac{(-P \cos \theta)}{(4\pi\epsilon_0 r^2)} + E_{\text{APPL}} r \cos \theta. \quad (2)$$

为了保证球表面两点 $(r = \rho, \theta = \pi/2)$ 和 $(r = \rho, \theta = \text{任意值})$ 的电势为 V_T , 代入 (2) 式, 可

得

$$Q = 4\pi\epsilon_0 \rho h \frac{E_{\text{APPL}} - V_T/h}{1 - \rho/2h}, \quad (3a)$$

$$P = 4\pi\epsilon_0 E_{\text{APPL}} \rho^3, \quad (3b)$$

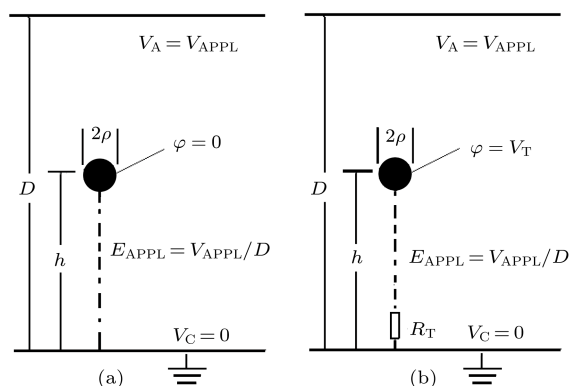


图 1 悬浮球模型 (a) 文献 [10—12]; (b) 改进后的模型

因此在碳纳米管顶端处的局域电场强度 E 为

$$\begin{aligned} E &= - \left[\frac{\delta\varphi(r, \theta = 0)}{\delta r} \right]_{r=\rho} \\ &= - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \rho^2} - \frac{2P}{4\pi\epsilon_0 \rho^3} - E_{\text{APPL}} \\ &= \frac{h E_{\text{APPL}} - V_T/h}{\rho} - 3E_{\text{APPL}}. \end{aligned} \quad (4)$$

当碳纳米管几何参数 $\rho \ll h$ 并结合 (4) 式, 碳纳米管顶端处的局域电场强度 E 可写为

$$E = \frac{h}{\rho} E_{\text{APPL}} - \frac{V_T}{\rho}. \quad (5)$$

若接触电阻不存在, 即 $V_T = 0$, (5) 式碳纳米管顶端处的局域电场强度与文献 [11—13] 的计算结果一致. 根据 FN 场发射规律, 将 (5) 式代入 (1) 式可得到接触电阻存在时碳纳米管的场发射电流

$$\begin{aligned} I_{\text{FN}} &= 1.54 \times 10^{-6} S \frac{\left(\frac{h}{\rho} E_{\text{APPL}} - \frac{V_T}{\rho} \right)^2}{\Phi} \\ &\exp \left(-6.38 \times 10^3 \frac{\Phi^{3/2}}{\left(\frac{h}{\rho} E_{\text{APPL}} - \frac{V_T}{\rho} \right)} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

依照 (6) 式, 只要确定 V_T 即可获得 I_{FN} 和 E_{APPL} 间的场发射性能的变化关系, 其中 V_T 与碳纳米管与衬底电极间的电阻有关. 为了计算简单, 我们根据报道的实验数据^[14] 近似地假定电子通过衬底电极与碳纳米管间的接触势垒遵从于欧姆定律, 即

$$I_T = V_T/R_T, \quad (7)$$

其中 I_T 为界面电流, R_T 为衬底电极与碳纳米管间的接触电阻. 在场发射稳定时根据电荷守恒定律可知, 通过衬底与碳纳米管的界面电流和场发射电流相等, 即

$$I = I_T = I_{FN}. \quad (8)$$

综合 (6)—(8) 式即可获得接触电阻存在时, 碳纳米管场发射所满足的规律, 有

$$I = 1.54 \times 10^{-6} S \frac{\left(\frac{h}{\rho} E_{APPL} - \frac{IR_T}{h}\right)^2}{\Phi} \exp\left(-6.83 \times 10^3 \Phi^{3/2} \frac{h}{\rho} E_{APPL} - \frac{IR_T}{\rho}\right). \quad (9)$$

3 结果与讨论

采用接触电阻存在时碳纳米管场发射所满足的规律即方程 (9), 数值计算了接触电阻对碳纳米管场发射性能的影响. 计算时所用的参数分别为: 碳纳米管的半径 $\rho = 5 \text{ nm}$, 碳纳米管高度 $h = 5 \text{ }\mu\text{m}$, 碳纳米管有效发射面积 $S = \pi\rho^2 = 7.85 \times 10^{-5} \text{ }\mu\text{m}^2$, 碳纳米管的功函数 $\Phi = 5 \text{ eV}$. 图 2(a) 和 (b) 是计算得到的不同的接触电阻下场发射电流与外加电场强度的关系曲线, 即 $I - E_{APPL}$ 曲线及相应的 FN 曲线 ($\ln(I_{FN}/E_{APPL}^2)$ 和 $1/E_{APPL}$ 的关系曲线). 从图 2 中可以看出对于不同的接触电阻, 在低电场区域场发射电流基本相同, 并且均与没有接触电阻的场发射电流大体一致; 而在高场区域相对于没有接触电阻的场发射电流显著的减小, 并且不同的接触电阻下的场发射电流有了很大的差异, 随着接触电阻的增大场发射电流显著减小. 相应的对于不同的接触电阻, 在低电场区域 FN 曲线近似为一条直线,

并且斜率基本相同, 和没有接触电阻的 FN 直线重合; 而在高场区域 FN 直线发生偏折, 出现了电流饱和现象.

通过上述计算, 说明接触电阻对碳纳米管场发射具有一定的影响, 随着接触电阻的增大在高电场区域场发射电流显著减小, 场发射电流受到了接触电阻的限制, 出现电流饱和现象, 并且随着接触电阻的增大明显地出现电流饱和现象的外加电场强度向低场偏移. 因此, 为了获得更高的场发射电流需要在制作碳纳米管场发射阴极时尽可能使得碳纳米管与衬底电极良好接触, 以减小接触电阻, 延缓明显的电流饱和现象的出现, 以获得优化的场发射性能.

为澄清接触电阻限制碳纳米管场发射性能的物理过程, 采用 (5), (7)—(9) 式数值计算了不同接触电阻下在碳纳米管尖端局域电场与外加电场的关系. 计算的参数与上述计算相同, 计算结果如图 3 所示. 从图 3 中可以看出没有接触电阻时, 在整个电场区域碳纳米管尖端的局域电场随着外加电场线性增加. 对于存在接触电阻时, 在低的外加电场区域碳纳米管尖端的局域电场与没有接触电阻时尖端的局域电场基本相同, 随着外加电场线性增加, 因此发射规律遵从于 FN 的场发射规律; 而在高场区域与没有接触电阻时尖端的局域电场相比, 存在接触电阻时碳纳米管尖端的局域电场相对的减少, 并随着接触电阻的增大尖端的局域电场相对减少的更显著, 因此发射规律背离于 FN 的场发射规律, 出现场发射电流饱和. 这说明接触电阻使得了碳纳米管尖端的局域电场相对减小是接触电阻引起碳纳米管场发射电流饱和的原因.

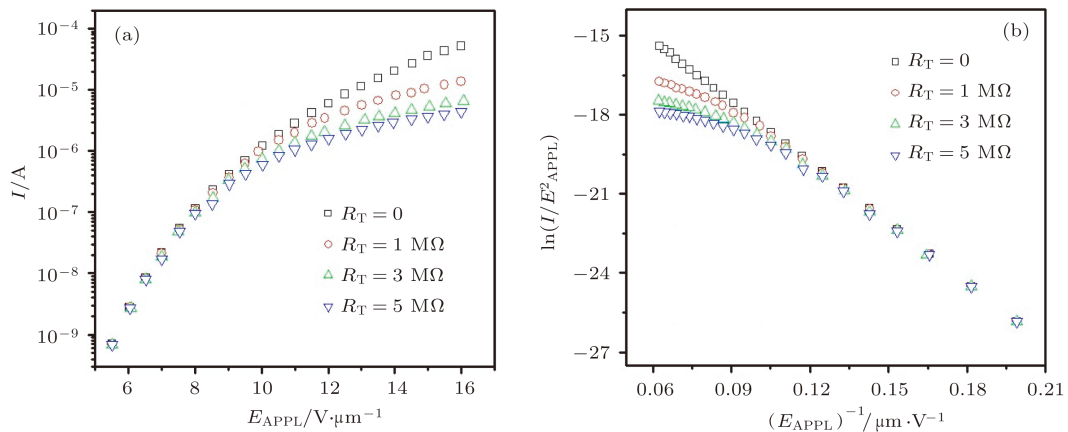


图 2 (a) 数值计算不同接触电阻下场发射电流与外加电场强度的关系曲线; (b) 相应的 FN 曲线

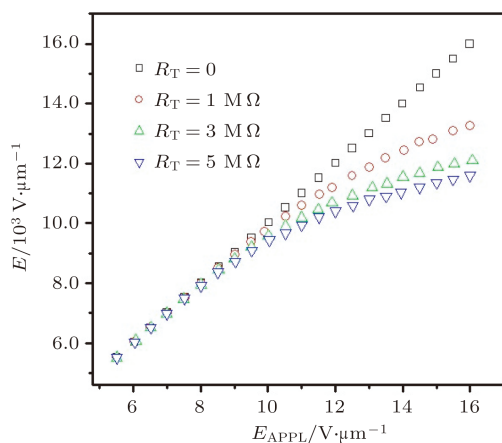


图3 数值计算不同接触电阻下碳纳米管顶端局域电场与外加电场强度的关系曲线

在以前的报道中有许多实验结果均出现电流饱和的现象^[15,16],相应地给予一定的解释.我们相信碳纳米管和衬底电极间的接触电阻在碳纳米管场发射中扮演一个重要角色.上述数值计算结果证实了接触电阻的存在确实改变的碳纳米管的场发射性能,出现场发射电流饱和及FN直线偏折.其可

能的物理过程是接触电阻的存在使得了碳纳米管尖端局域电场强度相对降低.由于碳纳米管和衬底电极间的接触电阻是客观存在的,碳纳米管场发射电流饱和现象在高电场下必然存在,只是不同的接触电阻明显出现电流饱和现象的应用电场不同.

4 结论

采用改进的悬浮球模型并结合FN场发射规律研究了接触电阻存在时对碳纳米管场发射所满足的规律.研究表明:接触电阻的存在,在高电场区域接触电阻抑制碳纳米管的电子场发射,导致在高电场区域出现电流饱和现象.其可能的物理过程是由于接触电阻的存在使得在碳纳米管顶端的局域电场相对于没有接触电阻时相对减少.由于接触电阻是固有存在的,为了获得最优化的碳纳米管场发射阴极应在制作阴极时尽可能使得碳纳米管与衬底电极良好接触,以减小接触电阻,延缓出现场发射电流饱和.

- [1] Bethune D, Kiang C-H, de Vries M, Gorman G, Savoy R, Vazquez J, Beyers R 1993 *Nature* **363** 605
- [2] de Heer W A, Chatelain A, Ugarte D 1995 *Science* **270** 1179
- [3] Zhong D Y, Zhang G Y, Liu S, Sakurai T, Wang E G 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 506
- [4] Choi W B, Chung D S, Kang J H 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 312
- [5] Zhang J, Yang G, Cheng Y, Gao B, Qiu Q, Cheng Y, Gao B, Qiu Q, Lu J P, Zhou O 2003 *Appl. Phys. Lett.* **86** 184104
- [6] Park J H, Son G H, Moon J S, Han J H, Berdinsky A S, Kuvshinov D G, Yoo J B, Park C Y, Nam J W, Park J, Lee C G, Choe D H 2005 *J. Vac. Sci. Technol. B* **23** 749
- [7] Fowler R H, Nordheim D L 1928 *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A* **119** 173
- [8] Zhang J H, Wang X, Yang W W, Yu W D, Feng T, Li Q, Liu X H 2006 *Carbon* **44** 418
- [9] Chen L F, Song H, Zhao H F, Liu X, Guo W G, Li D B, Jiang H, Cao L Z, Li Z M 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 033703
- [10] Yamashita T, Hasegawa S, Nishida S, Ishimaru M, Hirotsu Y, Asahi H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **44** 082109
- [11] Wang X Q, Wang M, He P M, Xu Y B, Li Z H 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 6752
- [12] Wang X Q, Wang M, Li Z H, Yang B, Wang F F, He P M, Xu Y B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1347 (in Chinese) [王新庆, 王淼, 李振华, 杨兵, 王凤飞, 何丕模, 徐亚伯 2005 物理学报 **54** 1347]
- [13] Wang M, Shang X F, Li Z H, Wang X Q, Xu Y B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 797 (in Chinese) [王淼, 尚学府, 李振华, 王新庆, 徐亚伯 2005 物理学报 **54** 797]
- [14] She J C, Xu N S, Deng S Z, Chen J, Bishop H, Huq S E, Wang L, Zhong D Y, Wang E G 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2671
- [15] Xu X P, Brandes G R 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 2549
- [16] Dean K A, Chalamala B R 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 375

Effect of contact resistance on field emission from carbon nanotube*

Lu Wen-Hui^{1)†} Zhang Shuai²⁾

1) (*Department of Physics, Zhanjiang Normal College, Zhanjiang 524048, China*)

2) (*Science and technology office, Zhanjiang Normal College, Zhanjiang 524048, China*)

(Received 8 August 2011; revised manuscript received 26 September 2011)

Abstract

After accounting for a contact resistance between carbon nanotube (CNT) and substrate, the local electric field of top of CNT were calculated by combining an improved floated sphere model and the Fowler-Nordheim theory for understand the effect of the contact resistance on field emission from CNT. It is found that the field emission current is limited and current saturation and nonlinear characteristics of the Fowler-Nordheim plots are produced by the contact resistance in region of high electric field. The origin can be attributed to the local electric field of top of CNT remarkably debases as compared to without the contact resistance.

Keywords: Carbon nanotube, field emission, contact resistance, current saturation

PACS: 88.30.rh, 68.37.vj, 72.10.-d

* Project supported by the Foundation for Distinguished Young Talents in Higher Education of Guangdong, China (No:LYM08075), and the Open Project of State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University, China (No.SK2010-5).

† E-mail: lvwenhuiy@yahoo.com.cn