

碳纳米管在大气压环境中的场致发射特性

潜力[†] 王昱权 刘 亮 范守善

(清华大学物理系, 清华—富士康纳米科技研究中心, 北京 100084)

(2010 年 5 月 11 日收到; 2010 年 6 月 3 日收到修改稿)

研究了在大气压环境下, 单根碳纳米管作为场致发射阴极, 与阳极间距为 100—200 nm 时的场致发射特性. 对比了碳纳米管在不同阴阳极间距和不同气体环境中的场致发射电流和噪声的特点.

关键词: 碳纳米管, 场致发射, 大气压

PACS: 88.30.rh, 68.37.vj

1. 引言

微型真空电子管的研究从 20 世纪 60 年代开始, 虽然制造出了 Spindt 型微型真空三极管^[1], 但是在微小体积内维持高真空环境却是一个极难解决的技术难题. 气体吸附在阴极表面会影响阴极电子的逸出功, 而场致发射电流随逸出功指数变化, 所以气体分子的频繁吸附以及脱附效应会大大影响发射电流的稳定性^[2-4]. 另一方面, 场致发射一般要求阴极表面电场强度达到 10^7 V/m, 在电场加速下气体中电离的正离子轰击阴极表面, 会造成阴极的损坏, 降低器件寿命^[5]. 因此, 一般场致发射阴极都要求真空度在 10^{-8} Torr ($1 \text{ Torr} = 0.13322 \text{ kPa}$) 以上. 在微小的空间维持这么高的真空度非常困难, 这使得微型真空管到目前为止仍然没有实用化.

2001 年, 德国的 Pescini 等^[6]制作了阴阳极间距在 300 nm 左右的场致发射器件, 该器件工作在 10^{-6} Torr 的动态真空系统中, 并且测试了这个器件在 10^{-2} Torr 的 He, 10^{-2} Torr 的 N₂, 以及大气压的空气中的 $I-V$ 曲线. 英国剑桥大学微电子研究组的 Driskill-Smith 等^[7]在 1997—1999 年制作了阴阳极间距为 100 nm 的真空电子管, 工作在 10^{-6} Torr 的高真空下. 那么此类器件能否工作在大气压下, 从而避开真空的要求呢? 本文研究了阴阳极间距为 100—200 nm 时, 碳纳米管在大气压环境中的场致发射特性.

2. 实验

将碳纳米管均匀分散在溶液中, 采用双向电泳法在原子力显微镜 (AFM) 探针上组装了单根的碳纳米管^[8, 9], 如图 1 所示. 实验在 AFM 中进行, 实验原理如图 2 所示. 组装有碳纳米管的 AFM 探针作为阴极, 一片镀有 Au 膜的平整硅片作为阳极. 碳纳米管距离阳极硅片 100—200 nm 左右. 采用 Keithley 6517 作为电源, 在 0—42 V 之间每个电压下高速采集 200 个电流值, 取其平均值作为最终的电流值, 方差则反映了电流噪声的水平.

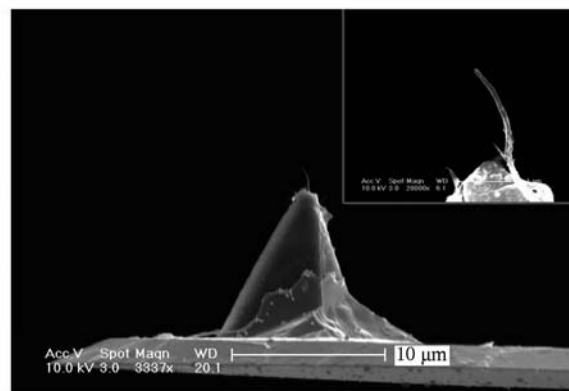


图 1 组装在 AFM 针尖上的碳纳米管

实验中选定了 3 个参量, 研究它们对发射电流和噪声的影响, 即气体环境 (干燥空气, He, Ne, Ar); 阴阳极间距 (100, 200 nm) 和气压 (1 atm ($1 \text{ atm} =$

[†] E-mail: qianli98@mails.tsinghua.edu.cn

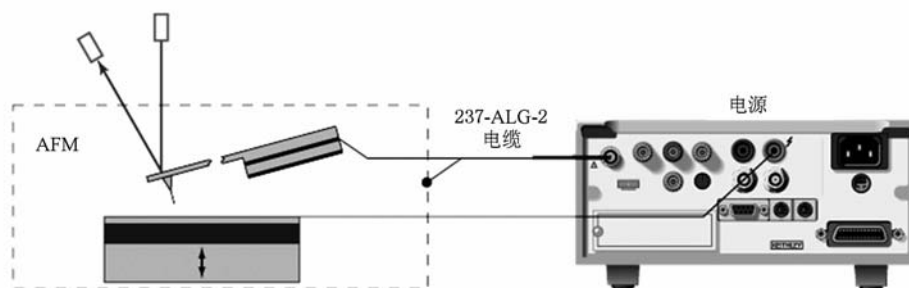


图2 实验原理

1.013×10^5 Pa), 10^{-4} Pa). 一共有 16 种不同的组合. 本次实验将这 16 种组合都进行了测量, 分组进行对比.

3. 结果及分析

实验结果如表 1 所示. 在 0—42 V 的电压下, 除了表中编号为 3, 4 的实验没有测量到发射电流外, 其他实验均测量到大于 10 nA 以上的场致发射电流.

图 3 是与阳极间距为 100 nm 的碳纳米管在 4 种不同气体中的场致发射电流曲线以及 F—N 曲线 (对应表 1 中编号为 1, 5, 9, 13 的实验). 从图 3 可以看到, 场致发射的开启电压都在 12 V 左右. 并没有显著差异. 图 4 中画出了与图 3 实验对应的场致发射电流噪声的曲线. 噪声水平是电流方差除以电流平均值, 由于开启电压以下发射电流很小, 与噪声方差接近, 相除以后误差很大, 因此只有开启电压以上的电流噪声才具有参考价值.

表 1 实验结果

编号	气体	间距/nm	气压/Pa	开启电压/V	电流噪声 $n/\%$	电离电压/V
1	空气	100	1.013×10^5	11	5	12—15
2	空气	100	10^{-4}	13	7	12—15
3	空气	200	1.013×10^5	none	none	12—15
4	空气	200	10^{-4}	none	none	12—15
5	He	100	1.013×10^5	12	3	24.5
6	He	100	10^{-4}	12	3	24.5
7	He	200	1.013×10^5	25	3	24.5
8	He	200	10^{-4}	29	3	24.5
9	Ne	100	1.013×10^5	12	3	21.5
10	Ne	100	10^{-4}	12	3	21.5
11	Ne	200	1.013×10^5	23	3	21.5
12	Ne	200	10^{-4}	25	3	21.5
13	Ar	100	1.013×10^5	12	3	15.7
14	Ar	100	10^{-4}	11	3	15.7
15	Ar	200	1.013×10^5	27	5	15.7
16	Ar	200	10^{-4}	28	5	15.7

从图 4 可以看出, 空气中的场致发射电流噪声最大, 这是因为空气中的 O_2 , N_2 等活性气体分子频繁吸附和脱附会大大影响碳纳米管的逸出功^[10], 进而影响场致发射电流, 而另外三种惰性气体的吸附和脱附则基本不影响逸出功. 在三种惰性气体中,

场致发射电流噪声的大小依次是 $Ar > Ne > He$.

1 atm 下, 各种惰性气体的自由程如表 2 所示. 阴阳极间距分别为 0.01, 0.1, 1, 5, 10 $\bar{\lambda}_e$ 时电子碰撞的概率分别为 0.99, 0.91, 0.37, 0.007, 4.5×10^{-5} , 这里 $\bar{\lambda}_e$ 为电子平均自由程.

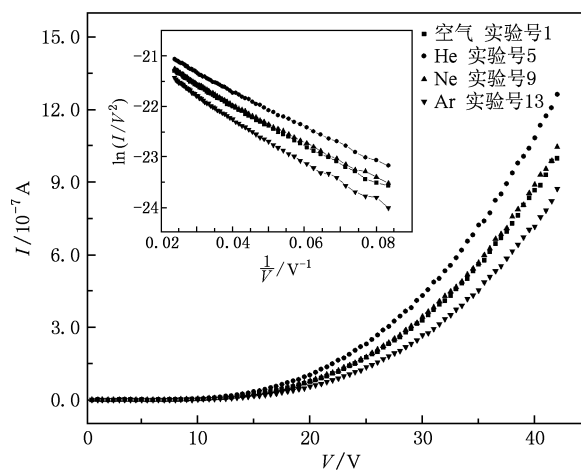


图3 不同气体环境下 100 nm 间距碳纳米管场致发射电流曲线内插图为 F—N 曲线

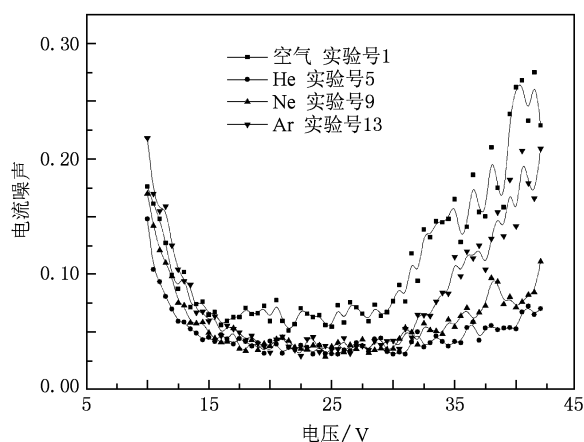


图4 不同气体环境下 100 nm 间距碳纳米管场致发射电流噪声的曲线

表2 惰性气体中的电子平均自由程(300 K, 1 atm)

气体	He	Ne	Ar	Kr	Xe
有效直径/ 10^{-10} m	2.18	2.6	3.7	4.2	4.9
电子自由程/ μm	1.07	0.77	0.38	0.29	0.22

以 He 为例,如果阴阳极间距在 100 nm 左右,小于电子在 He 气中平均自由程 1.07 μm 的 1/10,那么发射电子有 91% 在飞行过程中不会与 He 原子碰撞.

惰性气体 He, Ne, Ar 的第一电离能分别为 24.587, 21.564 和 15.759 eV, 电离效率随电子能量的变化如图 5 所示^[11]. 从图 5 中可以看出,如果电子从阴阳极加速电压所获得的能量小于惰性气体的第一电离能时,气体原子不会电离. 以 He 为例,其第一电离能为 24.587 eV, 而阴阳极间距在 100

nm 左右的纳米场致发射器件的工作电压大约在 10—20 V 左右. 这样的工作条件下,电子与惰性气体原子碰撞后,不会使原子电离,而只是改变电子飞行方向,改变方向后电子的能量几乎不变,在电场的作用下,最终仍然会到达阳极.

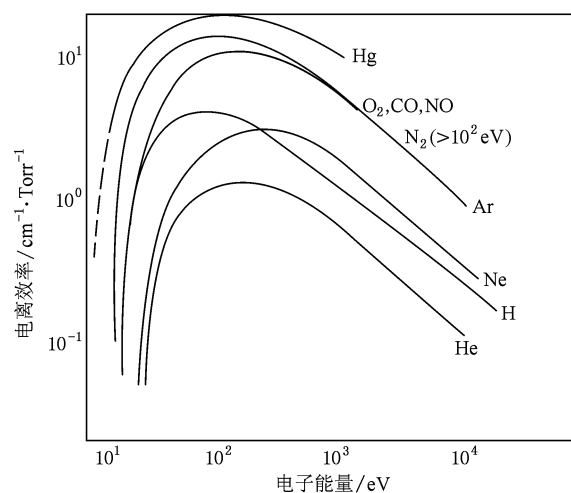


图5 电离效率随电子能量的变化

由以上分析可知,电子在气体中的平均自由程越长,第一电离能越大,则场致发射的噪声就越小. 实验数据也证明了这一点. 因此 He 中的场致发射电流噪声最小,是理想的选择.

图 6 显示了 1 atm He 气中碳纳米管与阳极间距为 100 和 200 nm 时的场致发射电流噪声对比. 从表 1 中看到,7 号实验数据(200 nm)的开启电压为 25 V 左右,比较 25 V 以上的噪声电压,可以看出 200 nm 间距的噪声要比 100 nm 间距的噪声大. 这是因为阴阳极间距增大时,电子与气体分子相碰撞的概率会显著增加.

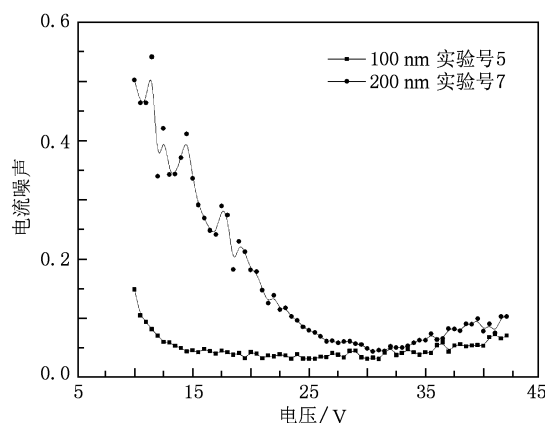


图6 不同电极间距下碳纳米管场致发射电流噪声的曲线

4. 结 论

综上所述,碳纳米管场致发射阴极与阳极间距在 100—200 nm 左右时,可以在 1 atm 的空气以及

惰性气体环境下发射电子,电子与气体分子碰撞的概率很低,气体原子被电子碰撞后电离概率也很低. 惰性气体环境下,场致发射电流的噪声比在空气中的噪声小. 因此,微型场致发射器件可以工作在大气压的惰性气体环境,从而避开真空的要求.

-
- [1] Spindt C A 1968 *J. Appl. Phys.* **39** 3504
 - [2] Maiti A, Andzelm J, Tanpipat N, von Allmen P 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 155502
 - [3] Zhang Z X, Hou S M, Zhao X Y, Zhang H, Sun J P, Liu W M, Xue Z Q, Shi Z J, Gu Z N 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、施祖进、顾镇南 2002 物理学报 **51** 434]
 - [4] Zhang Z X, Zhang G M, Hou S M, Zhang H, Gu Z N, Liu W M, Zhao X Y, Xue Z Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1282 (in Chinese) [张兆祥、张耿民、侯士敏、张浩、顾镇南、刘惟敏、赵兴钰、薛增泉 2003 物理学报 **52** 1282]
 - [5] Charbonnier F 1997 *Vacuum Microelectronics Conference, Technical Digest.*, 10th International pp 7—13
 - [6] Pescini L, Tilke A, Blick R H, Lorenz H, Kotthaus J P, Eberhardt W, Kern D 2001 *Adv. Mater.* **13** 1780
 - [7] Driskill-Smith A A G, Hasko D G, Ahmed H 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2845
 - [8] Lee H W, Kim S H, Kwak Y K, Han C S 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 046108
 - [9] Tang J, Yang G, Zhang Q, Parhat A, Maynor B, Liu J, Qin L C, Zhou O 2005 *Nano Lett.* **5** 11
 - [10] Sheng L M, Liu P, Liu Y M, Qian L, Huang Y S, Liu L, Fan S S 2003 *J. Vac. Sci. Technol. A* **21** 1202
 - [11] Chen P J 1987 *Scientific Foundations of Vacuum Technique* (Beijing: National Defense Industry Press) p571 (in Chinese) [陈丕谨 1987 真空技术的科学基础 (北京: 国防工业出版社) p571]

Field emission of carbon nanotube under atmospheric pressure

Qian Li[†] Wang Yu-Quan Liu Liang Fan Shou-Shan

(Tsinghua-Foxconn Nanotechnology Research Center, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 11 May 2010; revised manuscript received 3 June 2010)

Abstract

Field emission of carbon nanotube in different gases (for example, Air, He, Ne) under atmospheric pressure has been studied. The distance between anode and cathode was 100—200 nm. Detailed comparison has been made to characterize the field emission currents and fluctuations in various gases with different anode-cathode distances.

Keywords: carbon nanotube, field emission, atmospheric pressure

PACS: 88.30. rh, 68.37. vj

[†] E-mail: qianli98@mails.tsinghua.edu.cn