

在传统热阴极上实现场致发射大电流的研究

狄云松^{1 2} 崔云康^{2 3} 高峰²

(1. 南京师范大学 物理科学与技术学院 江苏 南京 210046)

(2. 东南大学 电子科学与工程学院 江苏 南京 210096)

(3. 南京工程学院 基础部 江苏 南京 211167)

[摘要] 在传统的热阴极表面制备催化剂,通过自加热化学气相沉积法,成功地在热阴极表面生长出碳纳米管薄膜。碳纳米管薄膜具有较好的场致发射能力,通过二极管结构下对该阴极的发射性能测试,得到了最大电流为 5.5 mA 的场致发射电流。该方法可以在不改变现有热阴极材料和器件结构的基础上,得到稳定的冷阴极发射电流,为热阴极向冷阴极过渡的研究提供了一种途径。

[关键词] 热阴极 碳纳米管 化学气相沉积 场致发射 大电流

[中图分类号] O462.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2012)02-0024-04

Study on Large Current Field Emission on a Traditional Thermal-Cathode

Di Yunsong^{1 2} Cui Yunkang^{2 3} Gao Feng²

(1. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

(2. School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(3. Department of Basic Course, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Based on a traditional thermal cathode, catalyst material layer has been deposited, and then carbon nanotube layer has been synthesized on the surface of the thermal cathode by self-heated chemical vapor deposition. As is known, carbon nanotube has excellent field emission properties, and the field emission capability of this cathode has been tested in a diode structure, a maximum 5.4mA current has been obtained. We provide a new way to realize field emission large current on a traditional thermal cathode device while the cathode material and the whole structure need not be changed.

Key words: thermal cathode, carbon nanotube, chemical vapor deposition, field emission, large current

阴极作为真空电子器件的电子发射源,对器件的性能起着至关重要的作用,被喻为是真空电子器件的“心脏”^[1]。大发射电流密度阴极是实现大功率微波器件的最为关键的技术问题^[2]。目前的电子发射源有热阴极和场发射阴极两种,热阴极发射稳定,但加热功耗大,不利于器件微型化和集成化的发展趋势;场发射阴极由于其发射机理的特殊性,目前仍处于研究和开发阶段,尚需时日才能装配并应用在真空器件中,作为强大的电子发射源。碳纳米管以其优良的各种性质,被作为良好的电子发射材料,并已经开展电子发射的研究数十年了。碳纳米管发射体理论上可实现高达 10^6 A/cm² 的大电流密度发射,并已在实验得到 6 A/cm² 的发射电流密度^[3]。由于碳纳米管发射体在生长过程中的可控性较差,且对生长环境有着极为苛刻的要求,目前还没有成功制备出应用于各种大功率微波电子器件的合适的阴极阵列。同时,由于实际碳纳米管在场致发射过程的复杂性,需要考虑场屏蔽效应、器件放气、发射体过热烧毁等因素,需要对制备的阴极从衬底、图案到制备环境等都提出新的要求。

本文通过热丝-化学气相沉积的方法^[4],在传统热阴极表面生长碳纳米管发射体阵列(实验中使用了束调管中的阴极)。运用堆栈式催化剂结构,实现碳纳米管在小区域的定向可控生长;同时,采用热阴极自加热的方式,实现了生长过程中局部加热,温度可控。通过在原有热阴极表面制备场致发射用碳纳米管阵

收稿日期: 2012-04-07.

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,讲师,研究方向: 物理电子学. E-mail: 06171@njnu.edu.cn

列,使得阴极具有一定的场致发射电流的能力,在不改变原有的器件结构和阴极材料等各方面参数的情况下,使阴极由原来的热发射向冷发射过渡。

1 碳纳米管发射层的制备

生长用热阴极使用了束调管中的阴极作为生长衬底,材料为钼,表面不经过浸盐工序,直接抛光处理后即可作为生长的衬底。阴极表面为圆形平面结构,直径为 5.54 mm,总阴极面积为:24.09 mm²,如图 1 所示。阴极经过清洗后,首先在其上面制作厚度约为数十纳米的二氧化硅隔离层,以防催化剂的扩散,然后通过磁控溅射过程在其表面制备铁催化剂颗粒,如图 2 所示。

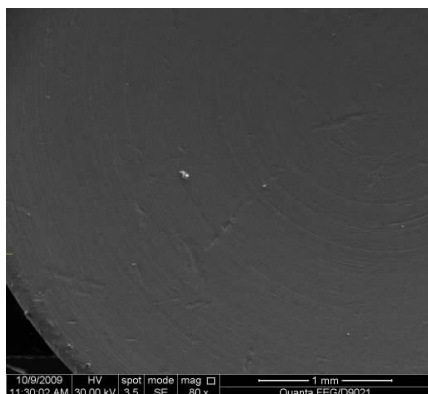


图 1 抛光后钼阴极表面照片

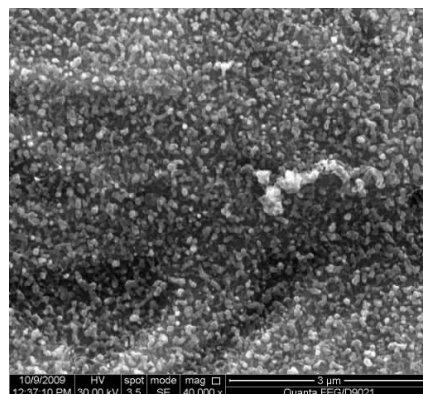


图 2 制备 Fe 催化剂颗粒后的阴极表面

Fig.1 Surface picture of Mo cathode after polishing

Fig.2 Surface morphology of the cathode after depositing Fe catalyst

制备好催化剂的阴极放置于如图 3 所示的生长系统中,首先通入氢气,流量为 100 cm³/min,并通过电流加热回路进行加热,温度控制在 600℃ 左右,还原阴极表面可能被氧化的 Fe 颗粒,还原时间为 1 ~ 3 min。其后,通入乙炔气体作为碳源气体,流量为 100 cm³/min,生长温度控制在 800℃,生长时间为 3 ~ 10 min。

利用高分辨电子显微镜(SEM,Quanta FEG/D9021)对阴极表面进行表征,阴极表面上覆盖了直径约为 20 nm 的碳纳米管,如图 4(a)、(b)所示。

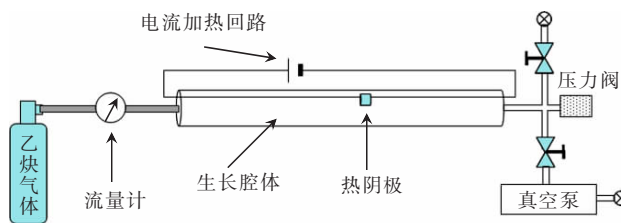


图 3 在热阴极表面生长碳纳米管发射阵列的过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of synthesizing CNTs array on the thermal cathode surface

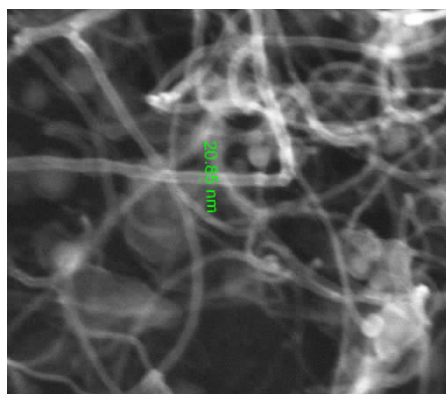
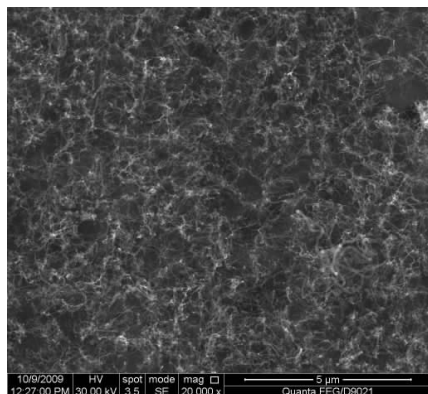


图 4 (a) 阴极表面覆盖的碳纳米管层;(b)直径约为 20 nm 的碳纳米管及 Fe 颗粒

Fig.4 (a) SEM picture of cathode surface covered with CNTs layer;(b) SEM picture of CNTs with diameter of 20 nm and Fe particles

通过显微照片可知,表面的碳纳米管取向无规则。这是由于催化剂层制备单一,生长过程中采用局部加热的方式,碳源气体仅在阴极表面受热裂解,且生长过程中没有采用文献报道的微波或磁场辅助的方

式. 从图 4(b) 中可以看出, 碳纳米管管径与 Fe 颗粒大小相当, 说明碳纳米管的管径由 Fe 颗粒度的大小和厚度控制. 大部分碳纳米管较长, 平躺覆盖在阴极的表面, 这样的阴极表面形貌容易使得在场致发射过程中引起严重的场屏蔽效应, 增大了开启电场, 这是对阴极发射极为不利的因素. 需对碳纳米管层进行有效的表面处理, 使得碳纳米管管口能大致保持朝上从而降低屏蔽效应. 采用类似水浴的方法, 将去离子水滴至阴极表面, 使得阴极充分润湿后将阴极置于烘箱中迅速加热至 200℃ 左右, 如此数次, 阴极表面上管口朝上的碳纳米管大大增多, 如图 5 所示. 由于水在高温下的挥发及表面张力的作用, 将碳纳米管管口向上拉动, 使得碳纳米管层的管口趋向一致, 这样的阴极表面形貌较为适合场致发射的要求.



图 5 经过水浴处理后的阴极表面碳纳米管分布
Fig.5 SEM picture of CNTs morphology after bathing process

2 场致发射特性的测试与分析

场致发射测试是在二极管结构下进行的. 将一块表面抛光处理后的不锈钢片作为阳极, 置于阴极的对立面, 并用绝缘支架固定阴阳极. 选用厚度为 500 μm 的石英片确定两极间间距后拆走, 以防止高电压下绝缘介质的击穿. 将位置固定好的二极管结构置于带有离子泵的真空室中, 将真空度保持在 10^{-5} Pa 左右进行阴极的场致发射测试. 大电流测试经过一定老练处理后, 待电流值稳定后记录数据, 得到如图 6(a) 所示的电流-电场 ($I-E$) 曲线, 图 6(b) 为其相应的 Fowler-Nordheim (FN) 曲线. 可以看出, 基本符合场致发射电流规律.

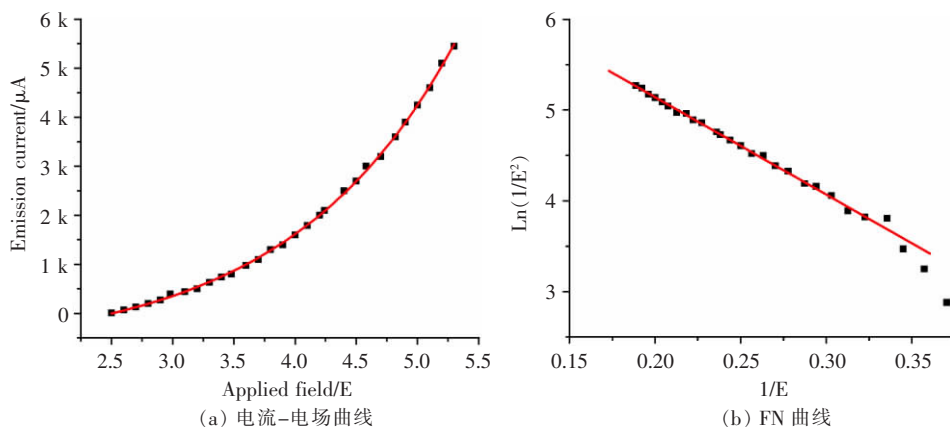


图 6 场致发射电流测试

Fig.6 Field emission test of the sample

从测试数据可以看出, 阴极的开启电场(电流为 10 μA)在 2.5 V 左右, 与文献报道的碳纳米管阴极发射的数据相当. 低开启电场与碳纳米管的管径密切相关, 本文生长得到的碳纳米管的平均管径大致为 20 nm, 因此能获得较小的开启场强.

FN 公式的简化形式可表示为:

$$J = \frac{AE^2}{\phi^2} \exp\left(-\frac{Bv(y)\phi^{\frac{3}{2}}}{E}\right) \quad (1)$$

其中 $A = 1.5415 \times 10^{-6}$, E 为发射体表面的电场强度, ϕ 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, $v(y) = 0.95y^2$, $y = 3.79 \times 10^{-5} \times E^{1/2}/\phi$, 以上均为国际单位制^[5].

利用 FN 公式, 对所得到的 FN 曲线进行计算, 其中在公式中取碳纳米管的功函数 ϕ 为 4.8 eV. 计算得到的阴极表面场增强因子利用公式:

$$\beta = \frac{E}{V/d} = 0.95B\phi^{3/2}d/k \quad (2)$$

其中 E 为发射体尖端电场, V 为施加电压, d 为阴阳极间距, k 为 FN 线斜率. 可计算得到样品场增强因子为 1 562. 较大的场增强因子才能在较小的外加电场下获得较大的电流.

本文得到的最大发射电流约 5.5 mA, 此时的外加电压达到 3 000 V, 因此阴极发射的功率约为 15 W, 在不足 1 cm^2 的阴极面积上, 发热严重, 且在真空间隙中伴随着少量串火的显现. 通过极间间隙观察到, 器件打火现象主要来自于圆形面圆周附近, 说明由于边缘场增强效应, 大部分的电流来自于边缘, 而非表面均匀发射.

3 结语

在传统热阴极表面上制备得到碳纳米管发射阵列, 同时在制备过程中只利用原有热阴极的加热装置, 因此不需要对阴极乃至整个器件的结构做出任何调整. 利用器件中已存在的电子枪结构, 实现冷阴极场致发射的电流调节, 得到最大发射电流为 5.5 mA, 为冷阴极应用到现有的大功率微波器件中提供了一种简易可行的方案.

考虑到阴极圆周面上的发射电流占据了总电流的大部分, 本文得到的 5.5 mA 的发射总电流远非该阴极所能达到的最大电流. 因此需要设计相应的阴极图案, 制备点阵状的碳纳米管阵列, 用以改善阴极表面的场屏蔽效应, 期望在相同的外加电场下获得更大的总电流.

本文得到的发射电流还远未达到实际应用的需求, 同时, 电流的稳定性仍是冷阴极所要解决的关键问题. 特别是在大电流的情况下, 阴极周围真空度降低, 势必带来电流严重波动并引起打火现象. 在高电场的情形下, 绝缘介质的耐压和真空击穿等问题仍然需要得到较好的解决.

[参考文献] (References)

- [1] 张红卫, 丁耀根, 白振纲. 大电流阴极的发射性能的研究[J]. 电子器件, 2003, 26(3): 248-252.
Zhang Hongwei, Ding Yaogen, Bai Zhengang. Study of emitting performance of high current cathode[J]. Journal of Electron Devices, 2003, 26(3): 248-252. (in Chinese)
- [2] 丁耀根. 多注速调管技术的新进展[J]. 真空电子技术, 2002(5): 8-13.
Ding Yaogen. Recent progress on multi-beam klystron technology[J]. Vacuum Electronics, 2002(5): 8-13. (in Chinese)
- [3] 陈泽祥, 曹贵川, 张强, 等. 大电流密度碳纳米管场致发射阴极阵列的研制[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(12): 2 070-2 073.
Chen Zexiang, Cao Guichuan, Zhang Qiang, et al. Fabrication of large current density carbon nanotube based field emitters[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(12): 2 070-2 073. (in Chinese)
- [4] 娄朝刚, 朱春晖, 张晓兵, 等. 大电流密度碳纳米管阴极的生长及场发射性能研究[J]. 液晶与显示, 2004, 19(4): 249-252.
Lou Chaogang, Zhu Chunhui, Zhang Xiaobing, et al. CVD growth and field-emission of carbon nanotubes as a large current density cathode[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2004, 19(4): 249-252. (in Chinese)
- [5] Garner D M, Amaratunga G A J. Analytic modelling of the thin-film field-emission triode[J]. Solid-State Electronics, 2001, 45(6): 879-886.

[责任编辑: 严海琳]