

Research Progress of Carbon Nanotubes Field-Emission Current Saturation

Chen Lin^{1,2}, Jinwen Zhang^{2*}, Yufeng Jin^{1,2}

¹Peking University, Shenzhen Graduate School, Shenzhen Guangdong

²National Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing

Email: *zhangjinwen@pku.edu.cn

Received: Jul. 22nd, 2017; accepted: Aug. 3rd, 2017; published: Aug. 9th, 2017

Abstract

Since the first report of CNT (Carbon Nanotube) field emission in 1995 [1], CNT has shown the most application potential and research value as field emission source because of its unique structure, outstanding electrical properties, nano-scale and great aspect ratio. Meanwhile, the CNT field-emission current shows self-saturation feature under high electric field, which is a promising advantage for energy saving of FED (Field Emission Display) technology. This paper introduced five mechanisms responsible for CNT field-emission current saturation including field desorption, contacting resistance, space charge effect, neighboring nanotube interaction and non-metallic local states, which are very important for the analysis and improvement of CNT FE devices.

Keywords

Carbon Nanotube, Field-Emission, Current Saturation

碳纳米管场发射电流饱和特性的研究进展

林 晨^{1,2}, 张锦文^{2*}, 金玉丰^{1,2}

¹北京大学深圳研究生院, 广东 深圳

²北京大学微电子学研究院, 微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 北京

Email: *zhangjinwen@pku.edu.cn

收稿日期: 2017年7月22日; 录用日期: 2017年8月3日; 发布日期: 2017年8月9日

*通讯作者。

摘要

从1995年碳纳米管电子场发射实验研究的首次报道到现在[1], 因为结构独特, 电学特性突出, 尺寸微小以及长径比大, 碳纳米管被认为是最具应用潜力和研究价值的场发射电子源之一[2]。同时, 在较高场强下碳纳米管场发射电流表现出自饱和特性, 这对于场发射显示技术是可遇不可求的优异特性, 能够进一步降低功耗。本文主要从碳纳米管场发射的电流饱和特性入手, 介绍了场解吸、接触电阻、空间电荷效应、临近碳纳米管间的互相作用和非金属局域态等五种可能导致场发射电流饱和的物理机理, 对于分析和改进碳纳米管场发射器件性能具有重要意义。

关键词

碳纳米管, 场发射, 电流饱和特性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

从1991年日本科学家 Iijima 首次发现一维碳纳米管结构以来, 单壁碳纳米管(SWCNTs) [3]和多壁碳纳米管(MWCNTs)结构相继被发现。在25年时间里, 因为其多方面独特的性质, 伴随纳米尺度科学的不断探索发展, 碳纳米管成为了最大的研究热点之一。随着对于碳纳米管的理化特性的了解不断深入, 人们发现其在电磁学、力学、化学以及光学等方面均表现出许多独特的性质。碳纳米管在力学上的高强度、高弹性模量和超塑性等, 使其可以在纳米复合材料[4]、纳米探针[5]等方面被广泛应用。根据卷曲方向的不同, 碳纳米管具有不同的电学特性, 可以分为金属性碳纳米管和半导体性碳纳米管, 在微电子与集成电路系统中具有重要应用价值[6] [7] [8]。而微小的尺寸和极大的长径比, 使碳纳米管拥有显著的场增强效应, 可作为高效的场发射电子源, 在显示技术等方面具有极大的应用价值[9] [10]。随着对碳纳米管的探索逐步深入, 其应用领域和潜在应用领域也不断拓展, 如作为催化剂载体[11]和构建新型电池[12]等。

过去主要的电子发射的方式是热发射, 即材料在高温下电子获得高能量逸出而实现电子发射[13]。场发射电子源则不同, 它是一种冷电子源, 利用电极在大电场作用下尖端势垒变窄, 电子从势垒中隧穿逸出的原理, 可以高效稳定地发射电子。从1968年 Spindt 型场发射阵列(FEA, field emitter array)被提出之后[14], 场发射电子源作为场发射显示技术(FED, field emission displays)的重要部分, 其研究也不断拓展和深入。当碳纳米管被发现, 它展现出优异的大场增强因子, 可以在低电场下获得高场发射电流的能力, 从而使利用其作为场发射电子源的应用研究迅速展开。一方面, 由于碳纳米管的一维尺寸特征、电学特性和超塑性特点, 它可以具有非常大的场增强因子, 比金属更容易在低压下获得大的场发射电流(实验中单个 MWCNT 的发射电流可达 10^{-7} A) [15]。再加上理化性质稳定, 碳纳米管可以作为稳定的、低压下运作的电子发射源。另一方面, 在较高场强下碳纳米管场发射电流表现出饱和特性, 这对于场发射显示技术是可遇不可求的优异特性。

然而, 在对于碳纳米管场发射的研究中存在着很多不完善的地方。目前, 对于场发射的研究普遍使用 Fowler-Nordheim 理论[16], 该理论是建立在金属-真空接触的假设基础上的。金属场发射电流随电压

呈指数型持续上升, 较为稳定, 但电极的损坏情况视金属和工艺特点决定。虽然金属性碳纳米管的电学特性与金属相似, 但在机械性能、场发射能级特性、化学性质等方面与金属都有不可忽略的差别。研究发现, 一方面碳纳米管的场发射特性不能完全符合 Fowler-Nordheim 理论中的 F-N 曲线; 另一方面, 当电场较大时, 其 I-V 曲线出现类似于电流饱和的现象。这一现象显示出 F-N 理论应用在碳管场发射研究中的局限和不足。虽然饱和性特征使得碳纳米管场发射的电流特性难以预测和解释, 但这一特点在部分领域又存在尚未开发的应用价值(例如 FED)。针对碳纳米管场发射特性, 相关工艺、性能、应用前景等方面已被广泛关注[9] [17] [18]。本文重点调研并讨论了碳纳米管场发射的电流饱和现象, 分别从解吸附、接触电阻、空间电荷、临近碳管间相互影响以及非金属局域态的存在这几个方面来解释该现象, 并分析它们的特点及其导致场发射电流饱和的物理机理。

2. F-N 理论的介绍

1928 年, Fowler 和 Nordheim 二人尝试构建了金属场发射理论。经过 1956 年 Murphy 和 Good 的工作, 才有了较为严格的数学表达, 形成了现在所使用的 F-N 公式。F-N 理论建立在如下假设的基础上:

- 1) 金属中电子的状态采用自由电子气近似;
- 2) 外电场为均匀平面电场并垂直于半无限大金属表面, 发射电子只考虑垂直表面的一维状况, 忽略其他边界条件;
- 3) 金属表面具有确定的功函数;
- 4) 金属表面电场诱导电荷产生的经典镜像力对表面势垒有所影响。

图 1 给出了半无限大金属在均匀平面外电场作用力 F 下的势场分布图。外电场产生的电势能为:

$$V_F = -eE \quad (2.1)$$

其中, V_F 为电势能, $-e$ 为单电子电荷, E 为平面外电场的电场强度, x 为电子移动并做功的距离。该势能函数为一条直线。此外, 还需考虑镜像力势场。假设一个电子在距离金属表面 x 处, 则表面诱导电荷的像产生电势能为:

$$V_i = -\frac{e^2}{4x} \quad (2.2)$$

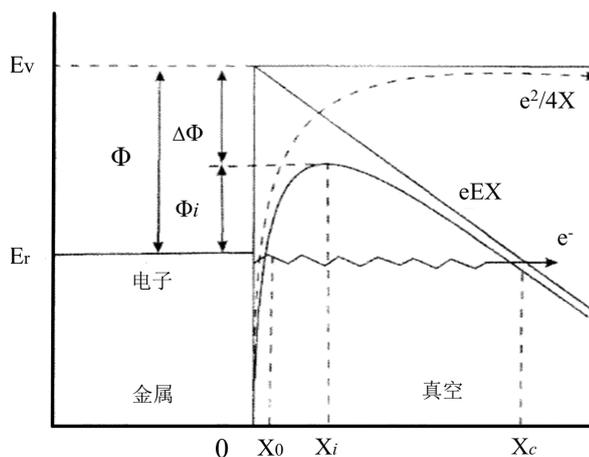


Figure 1. A diagram of potential field distribution of semi-infinite metal under uniform electric field F [19]

图 1. 半无限大金属在均匀平面外电场 F 作用下的势场分布图[19]

综合考虑以上两部分,可以得到总的势场表达式:

$$V = V_F + V_i = -eEx - \frac{e^2}{4x} \quad (x > 0)$$

$$V = -\varphi \quad (x < 0) \quad (2.3)$$

需要指出的是,当 x 的尺度可以与原子尺度相比时, (2.3)式失效,此时需要对公式进行修正。

如之前假设,此处所用的模型是电子气模型,即认为金属中的电子是自由的电子气。用简单的经典模型考虑,即金属表面附近的电子气运动时总有部分电子具有垂直金属表面方向的速度。由于金属表面有势垒阻挡,这些电子的能量不足以让它们越过势垒逸出。但是量子理论告诉我们,由于势垒宽度有限,电子具有一定几率能够隧穿势垒逸出。对于能量介于 $\varepsilon \rightarrow \varepsilon + d\varepsilon$ 的电子,其中能够隧穿过势垒进入外界的数量($dN(\varepsilon)$)应该为能够到达金属表面的电子密度($n(\varepsilon)$)与发生隧穿的几率($p(\varepsilon)$)的乘积。综合考虑不同能量的电子可以得到隧穿电流密度:

$$J = e \int_{-\infty}^{+\infty} dN(\varepsilon) = e \int_{-\infty}^{+\infty} n(\varepsilon) p(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.4)$$

基于电子的费米-狄拉克分布、电子气模型假设以及量子理论对三角形势垒的贯穿几率计算,并且考虑温度 $T \rightarrow 0$, 积分区间取 $(-\infty, E_F)$, 便得到了 Fowler-Nordheim 电流密度计算公式:

$$J = \frac{e^3 F^2}{8\pi h \varphi} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m}\varphi^{\frac{3}{2}}}{3heF}\right) \quad (2.5)$$

其中: J 为电流密度(A/cm²); F 为电场强度(V/cm); φ 为材料功函数(eV)。

值得一提的是,将(2.5)式两边同时除以 F^2 再取对数之后可以看出, $\log \frac{J}{F^2}$ 与 $\frac{1}{F}$ 成正比。也就是说, F-N 理论预测, $\log \frac{J}{F^2}$ 与 $\frac{1}{F}$ 的曲线是一条直线,因此我们常以 F-N 图像是否是一条斜率为负的直线作为判据,来判断电流是否是场发射电流。图 2 给出了典型的金属场发射特性图像。

(2.5)式采用了温度近似为零的假设,考虑了温度因素之后的表达式为:

$$J(T) = J(0) \cdot \frac{\pi kT/d}{\sin(\pi kT/d)} \quad (2.6)$$

经计算发现,虽然室温下温度影响仅为 3%,但在 1000 K 时影响变为 50%。所以,在较高温度下应采取(2.6)式来计算更准确。

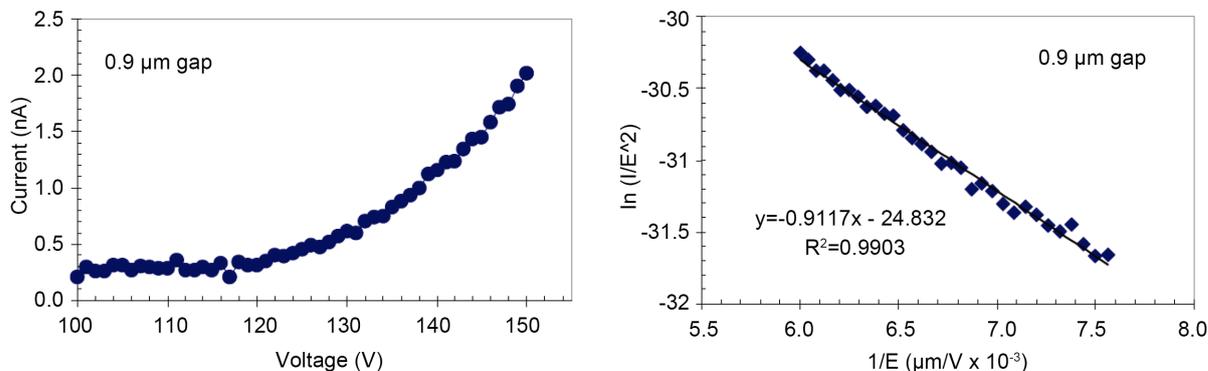


Figure 2. Typical curves of metal field emission. Left: The I~V curve; Right: The $1/E \sim \ln(I/E^2)$ curve [20]

图 2. 典型的金属场发射特性图像(左图:场发射 I~V 图像;右:场发射 $1/E \sim \ln(I/E^2)$ 图像) [20]

3. 碳纳米管场发射电流饱和机制

碳纳米管场发射在低电压下较好地符合 F-N 理论,而在相对较高的电压下出现电流饱和现象,这是一个较为普遍的情况,无论研究对象是单根碳纳米管(单壁碳纳米管或多壁碳纳米管),或者是碳纳米管管束,又或者是碳纳米管阵列。然而,对于不同的器件结构,其高电压下电流饱和特征并不相同,说明导致饱和的原因或机制不是单一的。调研显示,碳纳米管场发射电流饱和有五种不同机理,在此将逐一给予介绍。值得一提的是,碳纳米管场发射过程是由多方面因素共同影响的结果,不同的饱和机理并不一定是矛盾和对立的,有时可能是若干机理同时存在、同时起作用。因此,分析时需要针对具体情况建立模型,或者设计专门的实验来确定和突出主要因素。

1) 场解吸

1999年,摩托罗拉公司平板显示部门发表的一篇文章中报道了单根单壁碳纳米管在场发射电流达到100nA以上的时候显示出场发射电流饱和的现象[21],这种现象伴随着电流的波动出现。高真空下 I-V 曲线如图 3 中实线所示,虚线是 F-N 理论预测电流。可以看出,在低压下碳纳米管场发射较好地符合 F-N 曲线规律。但是,在高压下 F-N 曲线预测电流比测得的实际数据大 100~10,000 倍。

针对这一饱和现象,该研究组提出了粒子吸附假设。由于碳纳米管尖端是一个自组装的类似于半球形的封闭结构,因此尖端不可能像管壁一样拥有石墨烯的六元环结构,而是充满了五元环和七元环的缺陷结构。这些缺陷结构导致碳纳米管的尖端极容易吸附其他粒子,产生新的能态,并增强了碳纳米管尖端场发射的能力。因此,粒子吸附会导致碳纳米管在相同电压下具有更大的场发射电流。为了验证这一假设,他们设计并实施了对比试验,即使用去吸附后干净碳纳米管做了同样的场发射实验,结果如图 4(a)所示,有吸附情况的碳纳米管在场发射过程中出现了明显的饱和现象,而干净的碳管则并无这一现象,而是较好地符合 F-N 理论预测的规律。

图 4(b)展示了碳纳米管场发射过程中的 FEM 图像。从图 4(b)的(i)中可看到干净碳纳米管在场发射过程中的 FEM 图像稳定地随电压增加而变化。而图 4(b)的(ii)是有吸附粒子的碳管 FEM 图像,其随电压增加变化明显且不规律,说明吸附粒子对场发射有显著影响。在场发射过程中,吸附粒子不断解吸附,且随着电场增加解吸附程度增大,从而引起 FEM 图像不断变化。当电压到 2200~2300 V 时, FEM 图像变得稳定。此时,再让电压从 2300 V 逐渐降低,结果如图 4(b)的(iii)所示,可以看出 FEM 图像始终保持稳定,与干净的碳管很接近。这说明在 2200 V 时吸附粒子全部解附,其影响基本消失。因此,该研究组确定实验中出现的单根碳管场发射电流饱和现象的主要原因来自碳管尖端的粒子吸附。随着场发射电压的升高,吸附粒子在电场作用下不断解吸附,导致发射电流上升趋势减缓,甚至降低。

2) 接触电阻

在研究碳纳米管场发射特性时,重点往往都集中于碳纳米管尖端所受到的影响,却很少有人将除了碳管以外的因素纳入考虑范围内。众所周知,碳纳米管与加电衬底的接触电阻往往比较大。从电路角度来说,该接触电阻会分得一部分电压。随着电场强度增大,场发射电流也增大,这部分分压就变得显著,不可忽略。最终,这一分压会导致碳纳米管尖端与阳极间的电势差减小,表现在 I-V 曲线上则为电流的上升小于理论值,即场发射电流出现饱和现象。

2006年,Zhang 等研究人员提出了“双势垒”模型[22],从理论和实验两个方面分析了接触电阻对于碳纳米管场发射的影响。该模型认为场发射电子在发射过程中穿过了两个势垒,一个是碳纳米管尖端与真空空间的势垒,而在此之前还存在另一个碳纳米管与衬底的接触势垒。

他们测量了不同材料(Al、Cu、Ti 和 SiO₂)为电极的碳纳米管场发射特性(如图 5(a)所示),可以看出不同金属作为电极时碳纳米管场发射特性有所不同,这说明碳纳米管场发射特性会受到碳纳米管和电极接

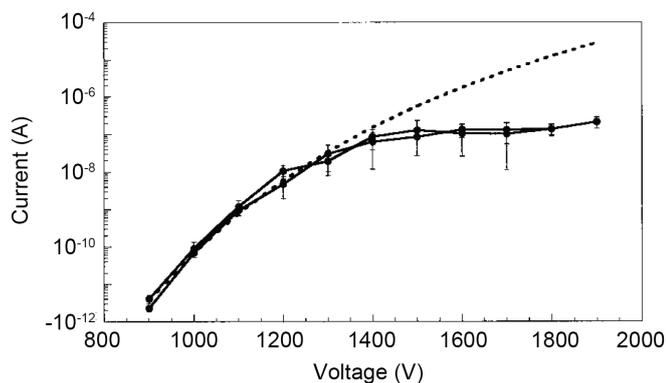


Figure 3. The FE current under high voltage is far less than predicted [21]

图 3. 高电压下场发射电流远小于预测值[21]

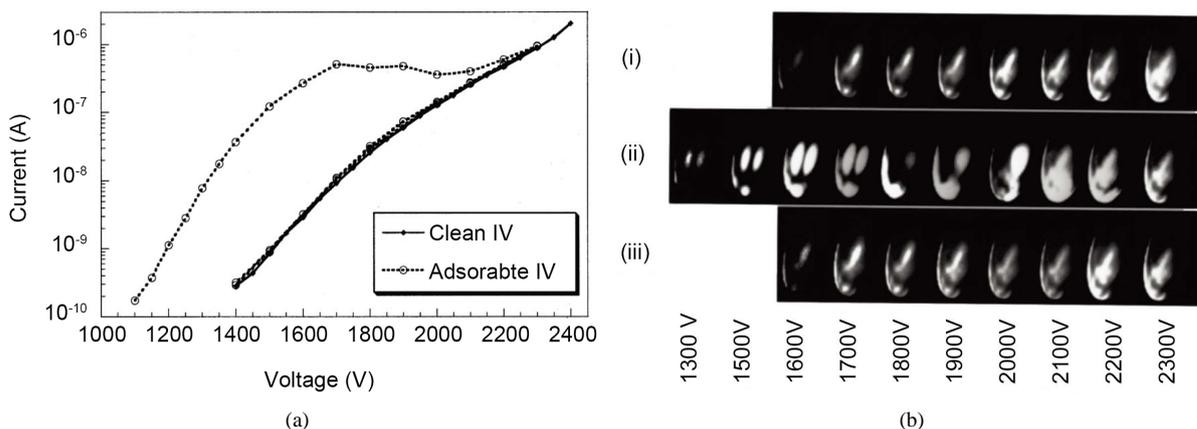


Figure 4. (a) The comparison of the FE I-V curves of CNT with adsorbate and the clean CNT; (b) The FEM (Field Emission Microscope) image of the CNT during field emission process [21]

图 4. (a) 有吸附的碳纳米管与干净碳纳米管场发射 I-V 图; (b) 碳纳米管场发射过程中的场发射显微镜图(FEM, Field Emission Microscope) [21]

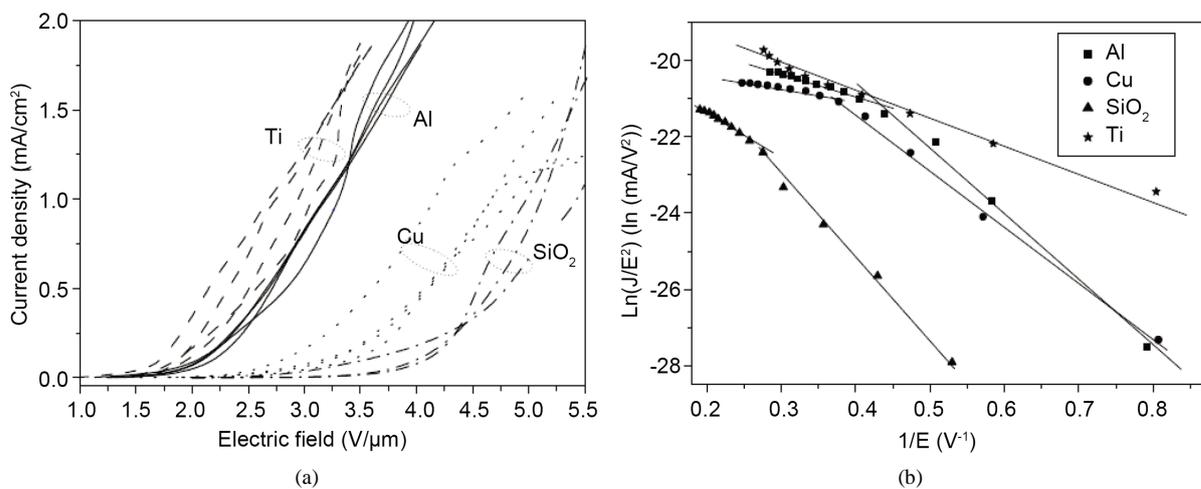


Figure 5. (a) FE characteristic curves with different materials as electrode; (b) F-N curves with different materials as electrode [22]

图 5. (a) 不同材料作为电极时的场发射 FE 特性曲线; (b) 不同材料作为电极时的 F-N 曲线[22]

触电阻的显著影响。从图 5(b)中可以看出,除了 Ti 作为电极的曲线之外,其他三条曲线均明显偏离典型的 F-N 曲线,表现为在电场强度较高的时候电流密度均低于 F-N 理论预测值。这些实验数据证实了碳纳米管与电极接触电阻确实对碳纳米管场发射具有显著影响,是引起碳纳米管场发射电流饱和的原因。

3) 空间电荷效应

在对传统金属和半导体场发射的多年研究中,科学家们很早就发现了场发射 I-V 曲线明显偏离传统 F-N 曲线的现象,并且对其做出了推算和公式修正。C.D. Child 很早便发现了空间电荷对场发射有明显影响,并在计算中考虑了电极温度的因素[23]。但是, J.P. Barbour 等人通过将实验数据和 Child 公式预测值对比之后发现,二者偏差还是很明显,即 Child 公式只能解释大电流、高温下的偏离现象,在低电流范围内无法使用,局限性很大。

此后, Barbour 等人又提出了新的电流密度公式修正,即空间电荷效应修正[24]。空间电荷效应是指当场发射阴阳极间电荷运输显著时,在场发射阴极的发射端附近会积累一定量的空间电荷,它们会改变阴极发射端实际的电压和电场强度。这些空间电荷积累越大,则这种改变的幅度越大。此时阴极发射端的电场强度与通常计算时所使用的人为施加的电场强度并非同一个数值,因此场发射电流密度会显著偏离 F-N 理论预测值。

考虑空间电荷效应修正的条件有两个:① 发射间隙的空间电荷运输须占一个电极上电荷运输的较大比例;② 阴极附近积累的空间电荷须占该区域总电荷的较大比例。简单来说,即空间电荷积累的数量要足够大,空间电荷效应的影响才足够明显,才需要做出这项修正。当不满足这两个条件时,空间电荷效应往往可以忽略。

如图 6 所示,曲线 ACE 是传统 F-N 曲线(一条直线),曲线 BD 是 Child 理论曲线,而曲线 ACD 是空间电荷效应修正曲线。可以看出,在较高的电场强度下 ACD 曲线的电流密度低于 F-N 曲线的预测值,因此在高场强情况下空间电荷效应也会引起场发射电流的饱和现象。

碳纳米管在场发射过程中也同样受到空间电荷效应的影响。Xu 等人在研究中发现碳纳米管薄膜场发射的 F-N 图像中出现了明显的偏离理论预测的直线的状况[25],如图 7 所示。研究者们认为,空间电荷的积累主要来自于:① 解吸附气体在间隙中的极化;② 阴极碳纳米管发射出的电荷。在第一部分时电流太低,不足以让电极上的气体解吸附,空间中并没有太多电荷,空间电荷效应不明显;第二部分时,随着电场强度的上升,电荷密度变大使得空间电荷效应起主导影响。此时阴极附近的电荷使得等效场增强因子增强。在第三部分时,场发射电流密度已经很高,发射出的电子在场发射尖端积累形成空间电荷区,限制了场发射过程,对电流发射产生抑制作用。

4) 临近碳纳米管间的互相作用

不仅单根碳纳米管具有良好的场发射特性,碳纳米管的阵列和碳纳米管薄膜也同样在场发射领域被广泛研究和应用。1996 年,加州大学伯克利分校的 Philip. G. Collins 等人在研究碳纳米管薄膜作为场发射冷阴极时发现了一种独特现象[26]。如图 8 所示,从碳纳米管场发射的对数图中可以明显看到,以某个临界电压 V_{knee} 作为分界,该电压前后的场发射特性并不相同。依照传统的 F-N 理论,同一发射源的场发射电流应该保持指数增长的趋势。因此,碳纳米管薄膜的某种特性使得其表现出在较高电压下的场发射电流被抑制的特点,即出现饱和现象。

经过研究者们抽丝剥茧的分析,最终认为出现饱和的原因是碳纳米管薄膜中临近碳纳米管之间的相互作用。从图 9 中可以看到,临界电压 V_{knee} 前后的场发射图像分别符合不同的 F-N 曲线斜率。我们知道碳纳米管的发射尖端并非完美的半球形,而是六元环、五元环、七元环或其他缺陷结构的微小界面,每个微小界面都拥有自己不同的功函数。单根碳纳米管场发射一旦开始后,由于电场等作用,其场发射会保持稳定。但若碳管尖端存在两个极为相似的临近界面,在其受到扰动的时候便有可能切换发射界面,

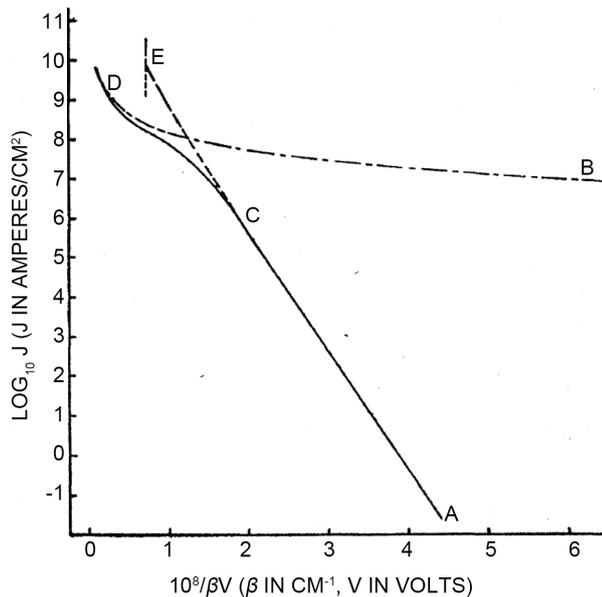


Figure 6. Theoretical FE I~V curve: ACE section is acquired by F-N theory; ACD section is correction curve considering space-charge effect; BD section is the curve by Child theory [24]

图 6. 理论预测 I~V 曲线: ACE 为 F-N 理论曲线; ACD 为空间电荷修正曲线; BD 为 Child 理论曲线[24]

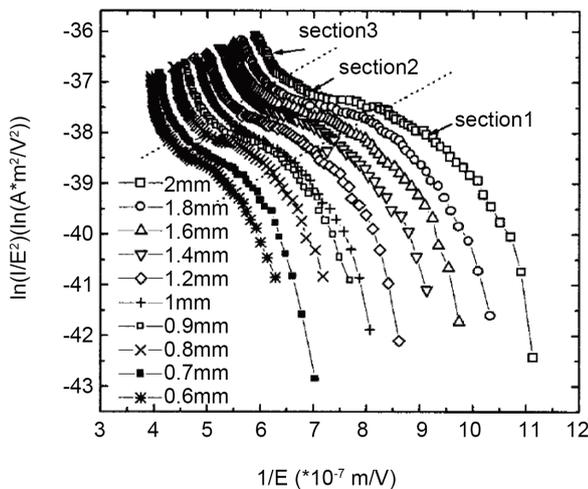


Figure 7. F-N curves of CNT films field emission with different gaps [25]

图 7. 不同间隙碳纳米管薄膜场发射 F-N 图像[25]

这种现象被称为管尖内切换(intra-tip switching)。当碳纳米管薄膜作为场发射电子源时,并非所有的碳纳米管都参与场发射,只有部分有效发射源。因此类似的,在一定条件下有效发射源碳管也可能会改变,这种现象被称为管尖间切换(inter-tip switching)。通过对 I-V 数据对数图像、F-N 图像以及 I-T 图像的分析,他们得出如下假设理论,即在碳纳米管薄膜中同时存在管尖内切换和管尖间切换两种现象。低电压下以管尖内切换为主;在某个临界电压以上时,管尖间切换变得显著,众多碳管的管尖间切换共同作用使得碳纳米管场发射电流出现饱和现象。

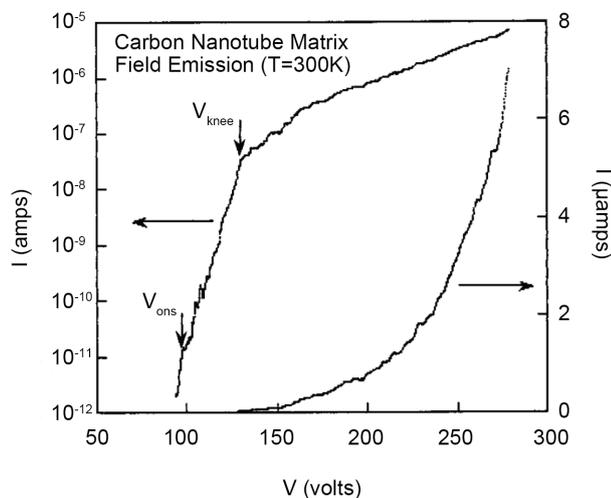


Figure 8. The I-V curve of CNT film field emission [26]

图 8. 碳纳米管薄膜的场发射 I~V 图像[26]

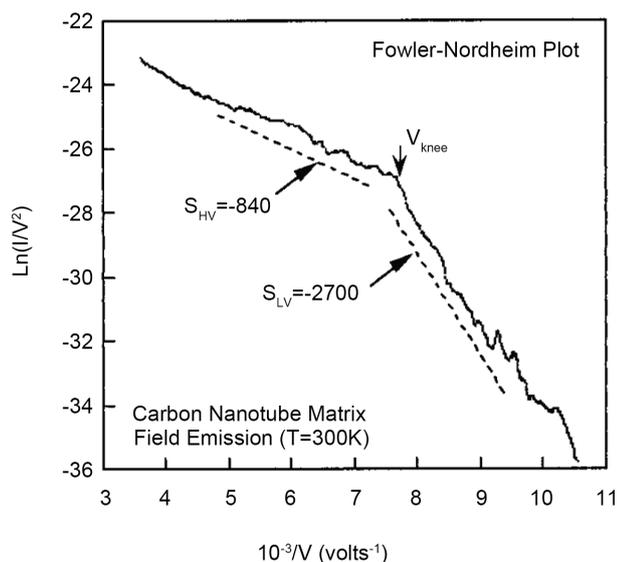


Figure 9. The F-N curve of CNT film field emission [26]

图 9. 碳纳米管薄膜场发射的 F-N 曲线[26]

5) 非金属局域态

以上所讨论的碳纳米管场发射偏离 F-N 曲线的可能原因多种多样,但最终归根结底,还是由于传统的未经修正的 F-N 理论是针对金属场发射所提出的理论,虽然金属性碳纳米管有着类似于金属的导电特性,但毕竟与金属不同,这决定了 F-N 理论在碳纳米管的场发射研究中是一定会存在偏差的。

研究者们在对单壁碳纳米管薄膜场发射特性进行测量和研究时,发现了类似于空间电荷效应引起的饱和特性(如图 10 所示),F-N 曲线中间部分(图 10 中的(b))出现波动,与图 6 的 ACD 曲线形状相似。但实验得到的电压数值却与空间电荷效应所预测的饱和现象的电压数值偏差很大。依照理论分析,在这么低的电场强度下空间电荷效应并不明显,这引起了 J-M Bonard 等人的注意[27]。他们认为,此时导致场发射偏离 F-N 规律的原因是因为碳纳米管发射尖端并非完全金属性,而是存在缺陷结构和非金属局域态,因此不能再用 F-N 理论来分析。

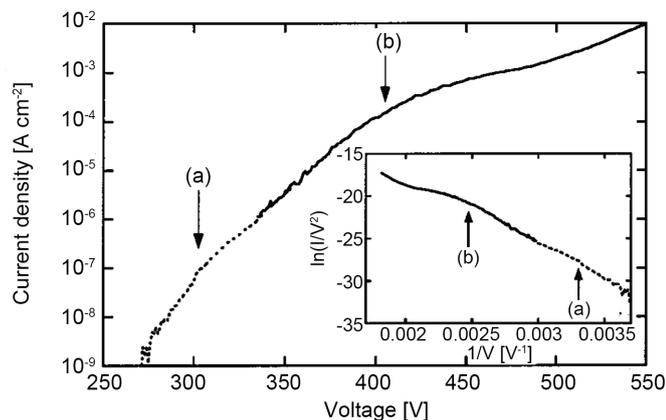


Figure 10. The I~V curve of SWCNT film field emission [27]

图 10. 单壁碳纳米管薄膜场发射 I-V 图像[27]

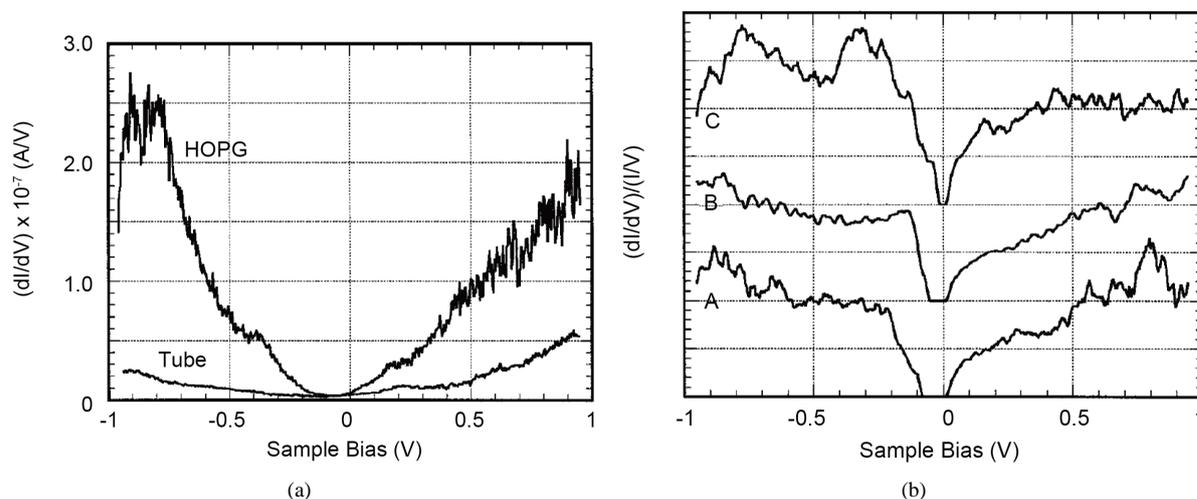


Figure 11. (a) The conductivity of CNT tube wall; (b) The conductivity of the CNT cap (acquired by tunneling energy spectrum) [28]

图 11. (a) 碳纳米管管壁电导; (b) 碳管尖端电导(由隧穿能谱得到) [28]

金属性碳纳米管管体表现出石墨烯的金属性电学特性，但尖端却存在许多五元环和七元环的缺陷结构。如图 11 所示，D. L. Carroll 等人的研究表明碳纳米管尖端存在着部分区域与碳纳米管管身的结构和能量状态不同[28]，称为非金属局域态。Bonard 等人在实验过程中也发现了与场发射同时出现的发光现象[29]，说明场发射尖端确实存在不同电子能态，证实了非金属局域态的存在。当这些位置参与场发射时，碳纳米管尖端便不能再符合传统金属的 F-N 理论，此时尖端的手性、尺寸、曲率半径以及缺陷的存在是决定场发射特性的主要因素。这些非金属局域态的存在使得发射尖端电场增强的速率比外界施加的电压要慢，这也解释了实验数据中存在的饱和现象。

4. 总结

碳纳米管作为新型、有效的高质量场发射电子源，其发射特性近年来被广泛研究，也成为了电子科学界最具热度的课题之一。本文介绍了主要的五种不同的导致碳纳米管场发射电流饱和现象的原因，解吸附主要应用于在特定气氛或空气中经过处理的初次场发射样品，接触电阻和空间电荷效应主要发生在场发射电流较大的情况下，邻近碳管相互作用主要用于分析碳纳米管薄膜或者管束场这类碳管密集器件

的场发射的情况, 非金属局域态则是从根本上说明了碳纳米管与金属的本质区别。这五种机理并未涵盖学术界的所有理论, 而这些理论自身也尚有不够完满之处, 很多有待于进一步的理论考证和实验数据支持。另外, 不同的机理并不一定是矛盾和对立的, 有时碳纳米管场发射电流饱和可能是若干机理同时存在、同时作用的结果。因此, 分析时需要针对具体情况建立模型, 或者设计专门的实验来确定和突出主要因素。随着测量手段的不断发展, 分析方法的不断进步, 相信关于碳纳米管场发射饱和的机理还会有进一步的进展和完善。

参考文献 (References)

- [1] de Heer, W.A., Châtelain, A. and Ugarte, D. (1995) A Carbon Nanotube Field-Emission Electron Source. *Science*, **270**, 1179-1180. <https://doi.org/10.1126/science.270.5239.1179>
- [2] Calderon-Colon, X., et al. (2009) A Carbon Nanotube Field Emission Cathode with High Current Density and Long-Term Stability. *Nanotechnology*, **20**, Article ID: 325707. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/32/325707>
- [3] Iijima, S. (1991) Helical Microtubules of Graphitic Carbon. *Nature*, **354**, 56-58. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- [4] Tran, P.D., et al. (2015) A Noble Metal-Free Proton-Exchange Membranefuel Cell Based on Bio-Inspired Molecular Catalysts. *Chemical Science*, **6**, 2050. <https://doi.org/10.1039/C4SC03774J>
- [5] Ishikawa, M., et al. (2002) Carbon Nanotube as a Probe for Friction Force Microscopy. *Physica B*, **323**, 184-186. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(02\)00973-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)00973-0)
- [6] Johnson, R.C. 以碳纳米管实现真正的 3D 芯片[J]. 集成电路应用, 2015(5): 38-39.
- [7] Zeevi, G., et al. (2016) Automated Circuit Fabrication and Direct characterization of Carbon Nanotube Vibrations. *Nature Communication*, **7**, 12153. <https://doi.org/10.1038/ncomms12153>
- [8] Zheng, J., et al. (2015) Circuit Modeling of Cu/CNT Composite Through-Silicon Vias (TSV). *Proceedings of 2015 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Suzhou, 1-3 July 2015, 1-3. <https://doi.org/10.1109/IMWS-AMP.2015.7325040>
- [9] 史永胜, 等. 碳纳米管场致发射显示器的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(8): 95-98.
- [10] Kim, Y.C., et al. (2015) A 46-Inch Diagonal Carbon Nanotube Field Emission backlight for Liquid Crystal Display. *Carbon*, **91**, 304-310. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.04.093>
- [11] Andersen, N.I., et al. (2015) Metal Oxides/CNT Nano-Composite Catalysts for Oxygen reduction/Oxygen Evolution in Alkaline Media. *Applied Catalysis B: Environmental*, **163**, 623-627. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.08.033>
- [12] Yoon, S., et al. (2015) Carbon Nanotube Film Anodes for Flexible Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **279**, 495-501. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.013>
- [13] Herring, C. and Nichols, M.H. (1949) Thermionic Emission. *Reviews of Modern Physics*, **21**, 185-227. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.21.185>
- [14] Spindt, C.A. (1968) A Thin-Film Field-Emission Cathode. *Journal of Applied Physics*, **39**, 3504-3505. <https://doi.org/10.1063/1.1656810>
- [15] Bonard, J.M., et al. (2002) Field Emission of Individual Carbon Nanotubes in the Scanning Electron Microscope. *Physical Review Letters*, **89**, Article ID: 197602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.197602>
- [16] Fowler, R.H. and Nordheim, L. (1928) Electron Emission in Intense Electric Fields. *Royal Society*, **119**, 173-181. <https://doi.org/10.1098/rspa.1928.0091>
- [17] 王琪琨, 等. 碳纳米管场发射阴极的厚膜工艺研究[J]. 电子器件, 2004, 27(4): 543-546.
- [18] 崔云康, 等. 大电流碳纳米管场发射阴极研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1509-1512.
- [19] 乔宪武. 碳纳米管场发射性质的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.
- [20] Wallash, A. and Levit, L. (2003) Electrical Breakdown and ESD Phenomena for Devices With nanometer-to-Micron Gaps. *Proceedings of SPIE*, **4980**, 87-96. <https://doi.org/10.1117/12.478191>
- [21] Dean, K.A. and Chalamala, B.R. (2000) Current Saturation Mechanisms in Carbon Nanotube Field Emitters. *Applied Physics Letters*, **76**, 375-377. <https://doi.org/10.1063/1.125758>
- [22] Zhang, J.H., et al. (2006) Interaction between Carbon Nanotubes and Substrate and Its Implication on Field Emission Mechanism. *Carbon*, **44**, 418-422. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.09.004>
- [23] Child, C.D. (1911) Discharge from Hot CaO. *Physical Review Series I*, **32**, 492-511. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.32.492>

-
- [24] Barbour, J.P., Dolan, W.W., *et al.* (1953) Space-Charge Effects in Field Emission. *Physical Review*, **92**, 45-54. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.45>
- [25] Xu, N.S., *et al.* (2001) Vacuum Gap Dependence of Field Electron Emission Properties of Large Area Multi-Walled-carbon Nanotube Films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **34**, 1597-1601. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/11/307>
- [26] Collins, P.G. and Zettl, A. (1997) Unique Characteristics of Cold Cathode Carbon-Nanotube-Matrix Field Emitters. *Physical Review B*, **55**, 9391-9399. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.9391>
- [27] Bonard, J.M., *et al.* (1998) Field Emission from Single-Wall Carbon Nanotube Films. *Applied Physics Letters*, **73**, 918-920. <https://doi.org/10.1063/1.122037>
- [28] Carroll, D.L., *et al.* (1997) Electronic Structure and Localized States at Carbon Nanotube Tips. *Physical Review Letters*, **78**, 2811-2814. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2811>
- [29] Bonard, J.M. (1998) Field-Emission-Induced Luminescence from Carbon Nanotubes. *Physical Review Letters*, **81**, 1441-1444. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1441>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org