

### 真空度对碳纳米管场发射显示器的影响研究

田昌会<sup>1,2</sup>, 朱长纯<sup>2</sup>, 王琪琨<sup>2</sup>, 刘兴辉<sup>2</sup>, 王小力<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学理学院, 陕西西安 710051; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西西安 710049)

摘要: 建立了碳纳米管场发射环境下电子与气体碰撞的数理模型。通过实验观察和理论分析说明: 碳纳米管场发射显示器在常规阴阳极间距下, 在不同真空度下的显示均为电子轰击荧光粉发光所致, 在低真空度下也无气体放电产生紫外光致荧光粉发光; 当真空度太低时, 气体电离会降低实际加在阴阳极间的电压, 致使电子无法发射。通过电子与气体分子的碰撞频率计算可以说明, 用气体压力与阴阳极间距的乘积作为标准衡量气体对场发射的影响比仅用真空度来衡量更为合理。场发射显示器阴阳极间距越大, 对真空度的要求越高。

关键词: 碳纳米管; 场发射; 真空度; 电子碰撞频率

中图分类号: TN304.18; TN104.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)05-0033

-03

在碳纳米管<sup>[1,6]</sup>场发射环境下的阴极和阳极之间, 虽处于真空环境下, 但从微观角度来看, 仍存在大量气体分子。电子从阴极发出到阳极轰击荧光粉的运动过程中, 会与气体分子发生碰撞。这些碰撞可能产生以下影响: 改变电子运动方向, 降低电子的定向能量, 使气体电离, 或使气体发射紫外光(等离子体特征), 这些紫外光再使荧光粉发光等。故计算电子与气体的碰撞频率对分析实际环境的发光机理、气体分子对场发射的影响以及确定封装器件真空度的要求有着重要的指导意义。

本文通过实验观察了在不同真空度下的碳纳米管场发射性能, 根据实验测试的典型条件推导计算了场发射环境下的电子碰撞频率和电子流密度。进一步分析了真空度对场发射的影响原因。

## 1 实验观察

碳纳米管场发射的实验模型如图1所示, 图中的碳纳米管阴极用涂敷法制作, 碳纳米管比例约为90%, 低温玻璃粉10%, 具体制作过程可参阅文献[2]。实验中的阴阳极间距为200 mm。发光观察在真空室进行, 真空度在器件工作期间用热偶规和电离规连续监测。

在 $10^{-4}$  Pa到5 Pa的真空度范围内, 在相同电压下观察不同真空度下的碳纳米管场发射显示器的荧光粉发光可知, 无论气压为多大(小于5 Pa), 荧光粉都不会全亮, 具有明显的点状发光特征, 如图2所示。可以断定为电子直接碰撞荧光粉所致, 并不存在气体放电(等离子体)引起荧光粉发光。当气压高于5 Pa时, 由于放电气体数量增大, 电压无法加上去(阴阳极间出现了一定的短路特征), 无法观察到荧光屏变亮。当气压低于5 Pa时, 在5 Pa到0.1 Pa气压范围内, 随着真空度降低(气压增大), 光亮点闪烁程度增大, 指针式电流表表头指针摆动明显增加。在真空度 $0.1 \sim 10^{-4}$  Pa范围内观察, 气压的变化对场发射电流、光亮度的影响不大。

从以上的观察事实说明, 在碳纳米管场发射环境下, 无论气体压力如何, 显示器发光均为电子轰击荧光粉发光所致。不存在电子引起气体放电(等离子体)发射紫外光致使荧光粉发光的问题。真空度较低时气体电离会降低实际加在阴阳极间的电压, 使电子无法发射。

收稿日期: 2004-12-07

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60036010); 教育部博士点基金资助项目(2000069823)

作者简介: 田昌会(1963-), 男, 陕西合阳人, 副教授, 主要从事碳纳米管场发射显示器研究。

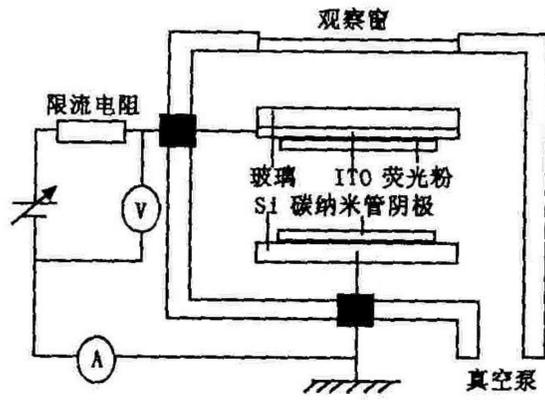


图1 结构和测试示意图

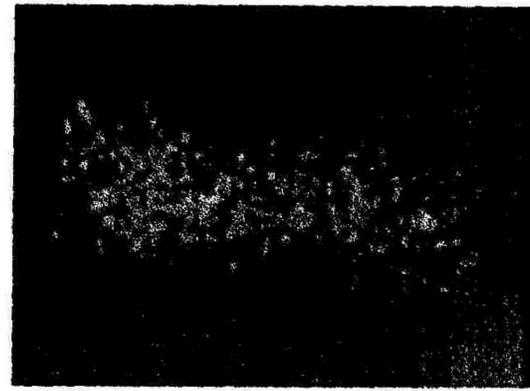


图2 0.1 Pa 压力下的试样发光图

## 2 理论分析

由于气体分子电子逸出功比碳纳米管大的多,气体分子要直接靠电场离化的概率较小,真空度对碳纳米管场发射的影响主要应由电子碰撞引起。这些碰撞会产生以下影响:改变电子运动方向,降低电子的定向能量,使气体电离,或使气体发射紫外光,这些紫外光线再使荧光粉发光。下面通过计算电子与气体分子的碰撞频率分析真空度对场发射的影响。

### 2.1 电子碰撞频率计算

电子从阴极发射运动到阳极的过程中,从理论上分析应发生电子与电子和电子与气体分子两种碰撞。由于电子半径比气体分子小很多,加之电子运动主要为同方向的加速运动,因而电子间的碰撞几率相对电子与气体分子的碰撞完全可以忽略。根据气体分子动理论<sup>[3]</sup>,把电子看作为另一种气体(即考虑两种分子碰撞的模型),并考虑到电子半径比气体分子小的多,而电子速度比气体分子运动速度大的多,可推得一个电子运动的平均自由程:

$$\lambda = 1/[\pi(r_m + r_e)^2 n_m] \approx 1/[\pi r_m^2 n_m] = 1/[\pi r_m^2 \frac{P}{kT}] \quad (1)$$

一个电子与气体分子的平均碰撞频率为

$$z = \pi(r_m + r_e)^2 \sqrt{v_m^2 + v_e^2} n_m \approx \pi r_m^2 v_e n_m = \pi r_m^2 v_e \frac{P}{kT} \quad (2)$$

式中  $r_m$  为气体分子的半径,  $r_e$  为电子半径,  $v_m$  为气体分子运动速度,  $v_e$  电子运动速度,  $n_m$  为气体分子密度,  $p$  为气压,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为气体的绝对温度。式中的近似是考虑到  $r_m \gg r_e$ ,  $v_e \gg v_m$ 。

根据式(1)计算电子平均自由程与气压的关系如图3所示。从图3可以看出在1 Pa气压下电子的平均自由程为0.05 m。而通常场发射显示器的阴阳极间距为200  $\mu\text{m}$ ,故在下面的推导中忽略了由于碰撞激发出来的电子在电场作用下与气体分子的碰撞。在电流密度为  $J$  的情况下,极板间电子密度满足如下关系:

$$n_e = \frac{J}{ev_e}$$

式中  $e$  为电子电量。

对于单位时间、单位面积极板间在  $dx$  间距内的电子的碰撞次数,即  $dx$  间距内单位面积电子的碰撞频率满足如下关系:

$$dN = zn_e dx = \pi r_m^2 v_e \frac{P}{kT} \frac{J}{ev_e} dx = \pi r_m^2 v_e \frac{P}{kT} \frac{J}{e} dx$$

那么,对于间距为  $d$  的显示器在单位时间单位面积总的碰撞次数,即单位面积电子的碰撞频率为

$$N = \int_0^d zn_e dx = \pi r_m^2 v_e \frac{P}{kT} \frac{J}{e} d \quad (3)$$

可以看出,对于一定的显示器,电子单位面积的碰撞频率与气压(真空度)、电流密度和阴阳极间距相关,与电子速度无关。据此计算并考虑到电子轰击荧光粉的数量也与电流密度成正比,因此,我认为衡量真空度对显示器的影响用气压与阴阳极间距的乘积( $pd$ )比用气压( $p$ )更合理。阴阳极间距越大,器件要求的真空度应越高。在等离子体平板显示器(PDP)中气体的着火电压就是用  $pd$  来衡量<sup>[4]</sup>。采用空气数据,对于

通常的显示器,用表1中的参数计算电子碰撞频率与气压的关系如图4所示。

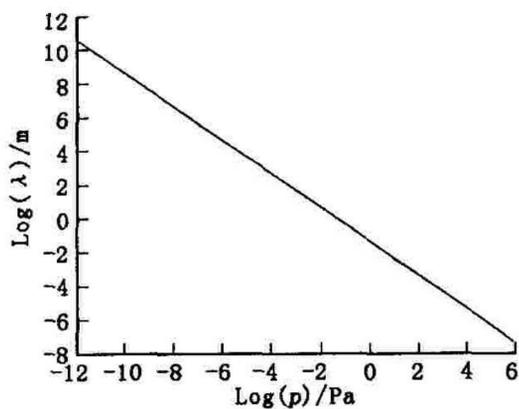


图3 电子平均自由程与气压关系

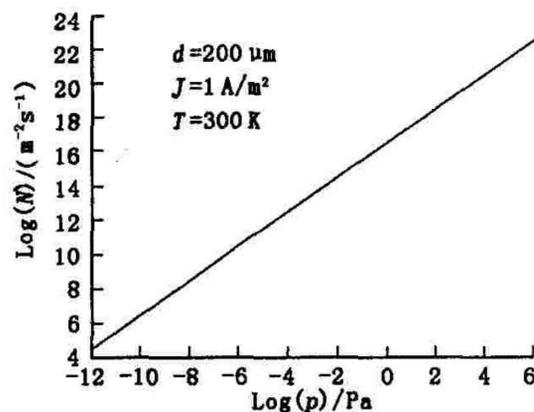


图4 电子与气体的碰撞频率与气压的关系

表1 参量数值表

$e/C$	$r_m/m$	$m_e/kg$	$d/\mu m$	$I/\mu A$	$\Delta S/cm^2$	$U/V$
$1.6 \times 10^{-19}$	$1.75 \times 10^{-10}$	$9.1 \times 10^{-31}$	200	50	0.5	250

### 2.2 电子流密度计算

分析电路可知,电路中的电流为电子运动所产生,图1中单位时间从阴极运动到阳极的电子总数应等于回路中电流表的指示值除以电子的带电量。按照电流密度的定义,计算测试的电流密度  $J = I/\Delta S = 1 A m^{-2}$ ,该值与相关研究报道基本一致<sup>[5]</sup>。根据电流密度  $J$  与电子密度  $n_e$ 、电子的电荷量  $e$  及电子运动速度  $v_e$  的关系式:  $J = n_e e v_e$ ,可求得电子在单位时间、单位面积从阴极射到阳极的电子数为

$$N' = n_e v_e = J/e = 1/(1.6 \times 10^{-19}) = 6.251 \times 10^{18} (m^{-2} s^{-1})$$

从图4可以看出,在200 mm 阴阳极间距下,在5 Pa 大气压下电子与气体分子单位面积的碰撞频率为  $10^{17} \sim 10^{18} m^{-2} s^{-1}$ 。可以看出这个数值与单位时间单位面积从阴极到达阳极的电子数目较接近,这表明大量的电子与气体碰撞使气体电离,降低了阴阳极间的电场强度,致使电子无法发射。

## 3 结论

通过实验观察可以说明,在碳纳米管场发射环境下,无论气体压力如何,显示器发光均为电子轰击荧光粉发光所致,不存在电子引起等离子体发光致使荧光粉发光。真空度太低时气体电离会导致阴阳极间出现短路特征,降低了实际加在阴阳极间的电压,致使电子无法发射。

通过电子与气体分子的碰撞几率计算可以说明,用气体压力与阴阳极间距的乘积作为标准,衡量气体对场发射的影响比仅用真空度来衡量更为合理。场发射显示器阴阳极间距越大,对真空度的要求越高。

### 参考文献:

[1] Chun Wei Chen, Ming-Hsien Lee, Clark S J. Field Penetration Induced Charge Redistribution Effects on The Field Emission Properties of Carbon Nanotubes - a First-Principle Study[J]. Applied Surface Science, 2004, 228:143-150.

[2] Qikun Wang, Chang-chun Zhu, Yong-sheng Shi. Field Emission From Carbon Nanotubes Thick Film on Si Substrate[J]. Surface and Interface Analysis, 2004,36 (5~6): 478-480.

[3] 张三慧. 热学[M]. 北京:清华大学出版社,1999.

[4] Annemie Bogaerts, Erik Neyts, Renaat Gijbels. Gas Discharge Plasmas and Their Applications[J]. Spectrochimica Acta Part B,2002,57(4): 609-658.

[5] Jong Min Kim, Won Bong Choi, Nae Sung Lee. Field Emission From Carbon Nanotubes For Displays[J]. Diamond and Related Materials, 2000, 9(6): 1184-1189.

[6] 王曙钊,李敬社,宋 懋. 纳米技术:研究现状及展望[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2003,4(1):90-94.

(编辑:田新华)

(下转第40页)