

# 基于铟锡氧化物/Ti 复合电极的高亮度 碳纳米管场致发射冷阴极\*

潘金艳<sup>1)†</sup> 张文彦<sup>2)</sup> 高云龙<sup>3)</sup>

1)(集美大学信息工程学院, 厦门 361021)

2)(西北有色金属研究院, 西安 710016)

3)(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

(2010 年 2 月 21 日收到; 2010 年 8 月 18 日收到修改稿)

通过制作亲碳性铟锡氧化物(ITO)/Ti 复合电极, 改善移植型碳纳米管(CNT)冷阴极的导电电极与 CNT 膜层之间附着性能, 从而消除 CNT 与电极间的界面势垒和非欧姆接触对 CNT 阴极场发射均匀性和稳定性的影响. 采用磁控溅射技术和丝网印刷工艺制作了 ITO/Ti 基 CNT 阴极. 用 X 射线衍射仪和场致发射扫描电子显微镜表征 CNT 阴极结构, 结果显示热处理后的 ITO/Ti 基 CNT 阴极中可能有 TiC 相生成, 从而使得导电电极与 CNT 形成有中间物的强作用体系. 该体系降低甚至消除电极与 CNT 之间的界面势垒, 增加了 CNT 与电极间形成欧姆接触的概率. 用四探针技术分析电阻率, 结果表明 ITO/Ti 复合电极具有电阻并联效果, CNT 阴极导电性能提高. 场致发射特性测试表明 ITO/Ti 基 CNT 阴极的场致发射电流达到  $384 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , 较普通 ITO 基 CNT 阴极的场致发射电流有显著提高, 能够激发测试阳极发出均匀、稳定的高亮度荧光. 制作 ITO/Ti 复合电极是实现场致发射稳定、均匀的低功耗 CNT 阴极的有效途径.

**关键词:** 碳纳米管, 冷阴极, 场致发射, 均匀性

**PACC:** 6148, 7970

## 1. 引 言

碳纳米管(CNT)场致发射冷阴极是制作低功耗、高性能电子器件的重要构件<sup>[1,2]</sup>, 如何制作高性能的 CNT 冷阴极逐渐成为目前一个重要的研究方向. CNT 具有稳定的物理化学特性和优异的场致增强特性, 并且 CNT 冷阴极的制作工艺可以结合成熟的低成本丝网印刷技术, 因而在平板显示器<sup>[3,4]</sup>、高亮光源<sup>[5]</sup>、传感器<sup>[6]</sup>等领域中具有广阔的应用前景. 尽管在 CNT 冷阴极的制作中有传统的丝网印刷工艺可借鉴, 并且高质量 CNT 的制备技术也趋于成熟, 但是使用丝网印刷制作的移植型 CNT 阴极仍旧存在阻碍其产品化的技术瓶颈. 主要表现如下: 第一, CNT 膜层中随机分布的 CNT 间存在间隙, 造成膜层导电性差;

第二, CNT 膜与导电电极是范德瓦耳斯力相互作用的弱作用体系, 导电电极接触性能差; 第三, 膜层与基底间附着性能差, 会造成 CNT 因为静电吸附而脱离基底. 上述三方面原因使得 CNT 阴极存在发射稳定性和均匀性不足, 难以满足器件应用要求.

Ti 具有 d 空轨道, 易与 C 形成化合物或有限固溶体, CNT 阴极若采用 Ti 电极, 则电极可与 CNT 膜形成有中间附着层的强作用体系. 另外, Ti 的功函数与铟锡氧化物(ITO)禁带宽度接近, 将 Ti 溅射沉积到 ITO 基底上, 两者接触面具有较低的界面能. 此外, 虽然 ITO 玻璃的 ITO 膜与玻璃间具有很好的附着性, 但 ITO 有很强的吸水性, 由于 Ti 具有良好的化学稳定性, 制作 ITO/Ti 复合电极可以提高电极稳定性. 本文研究了 ITO/Ti 基 CNT 阴极的制作工艺和场致发射性能.

\* 国家自然科学基金(批准号:60036010, 60476037)和集美大学科研基金(批准号:C609006)资助的课题.

† E-mail: ppxjpjy@sohu.com

## 2. 实 验

### 2.1. ITO/Ti 基 CNT 阴极的制备

实验采用直流磁控溅射方法在 ITO 玻璃衬底上制备 ITO/Ti 复合电极. 将 ITO 玻璃先用丙酮超声清洗 25 min, 再用去离子水冲洗 5 min 后烘干, 放入磁控溅射仪中. 溅射气体采用 Ar(99.999%), 溅射前的本底真空为  $3 \times 10^{-4}$  Pa, 溅射气压为 1 Pa, 直径为 60 mm 的金属 Ti 靶(99.99%) 由直流阴极控制, Ti 沉积速率约为 0.2—0.25 nm/min, 基片温度保持在室温并且采用循环水冷却. 膜的厚度与靶材硬度相关, 通过控制镀膜时间  $t$  就可以粗略控制膜层厚度, 本实验中以镀膜时间  $t$  作为厚度标定. 为比较不同厚度 Ti 电极对场致发射特性的影响, 在同一实验条件下分别制备了  $t = 5, 10, 20, 40$  min 的 ITO/Ti 电极.

在制备好的电极上, 采用丝网印刷技术制作面积为  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  的 CNT 膜,  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  热处理后制成 ITO/Ti 基 CNT 阴极.

### 2.2. 测试实验

采用 XRD-7000 型 X 射线衍射(XRD) 仪和 JEOL JSM-6700F 型场致发射扫描电子显微镜分析 ITO/Ti 基 CNT 阴极的微观结构及镀膜厚度. 采用 SPI3800-SPA-400 型原子力显微镜(AFM) 表征了不同  $t$  的条件下制备 Ti 膜的表面形貌及其粗糙度. 采用 SX1934 型四探针电阻测试仪分析了不同  $t$  的条件下所制备 Ti 膜的方块电阻特性.

丝网印刷荧光粉在 ITO 玻璃上作为测试阳极, 采用两极结构测试 CNT 阴极的场致发射特性, 测试真空度约为  $1.0 \times 10^{-5}$  Pa, 采用连续直流电源供电, 外接一个  $2 \text{ M}\Omega$  平稳电阻. 采用 Chroma 7100 型色彩分析仪观察 CNT 阴极激发的测试阳极发光亮度, 并用数码相机采集照片.

## 3. 结果及讨论

### 3.1. ITO/Ti 电极与 CNT 膜间的接触性能

Ti 是一种结构比较稳定的元素, 具有 d 空轨道, 在一定温度下易与碳形成特性稳定的化合物或

有限固溶体. 表 1 给出 4 种金属与 CNT 的接触电阻<sup>[7-10]</sup>, 可见 Ti 与 CNT 具有良好的欧姆接触特性.

表 1 4 种金属与 CNT 间的接触电阻

金属	成键	纳米管结构类型	接触电阻/ $\text{M}\Omega$	资料来源
Au	无	—	$>1$	文献[7]
Cu	离子化	—	$\approx 1$	文献[8]
Ti	共价键	金属型	0.01—0.02	文献[9]
Ni	共价键	金属型	0.2—0.4	文献[10]

很多研究表明, Ti 与 CNT 间很有可能产生强作用体系. 如 Menon 等<sup>[11]</sup> 报道了 Ti 与 CNT 间可形成共价键, 接触电阻约为  $15 \text{ k}\Omega$ . Andriotis 等<sup>[12-14]</sup> 用紧束缚原子动力学方法计算了金属与 CNT 间的相互作用, 结果表明 Ni 和单臂 CNT 所处位置不同, Ni 原子与 C 原子或者形成低键能的离子键, 或者在缺陷处形成共价键, 当 Ti 元素代替镍时, 发现在几乎所有位置 Ti 易与 C 形成共价键体系. 由此可以推断 Ti 与 CNT 间很有可能产生强作用体系. 此外, Ti 的功函数为  $4.3 \text{ eV}$ , ITO 是一种 In 基、Sn 掺杂的 n 型半导体材料, 室温时它的禁带宽度为  $3.8 \text{ eV}$ , Ti 膜与 ITO 膜接触面具有较低的界面能, ITO 膜与玻璃基底间有很好的附着性.

综合上述因素, 本文提出并制作了 ITO/Ti 基 CNT 阴极.

### 3.2. ITO/Ti 基 CNT 阴极的场致发射特性

图 1(a) 给出了 ITO 基 CNT 阴极与 ITO/Ti 基 CNT 阴极在不同电场强度  $E$  下场致发射电流  $I$  的变化情况, 其中 ITO/Ti 基 CNT 阴极的电极制作条件为  $t = 5 \text{ min}$ . 从图 1(a) 可以看出, ITO/Ti 基 CNT 阴极的开启电场约为  $2.24 \text{ V}/\mu\text{m}$ , 在  $E = 3.14 \text{ V}/\mu\text{m}$  的电场下该阴极的场致发射电流  $I$  达到  $384 \mu\text{A}$ , 即场致发射电流密度为  $384 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; 而 ITO 基 CNT 阴极的开启电场约为  $3.40 \text{ V}/\mu\text{m}$ , 当  $E$  达到  $4.72 \text{ V}/\mu\text{m}$  时, 场致发射电流密度为  $380 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . 从上述比较可知, ITO/Ti 基 CNT 阴极较之于 ITO 基 CNT 阴极不仅开启电场显著降低, 而且场致发射电流密度明显提高. 图 1(b) 给出了与图 1(a) 对应的 Fowler-Nordheim(F-N) 曲线, 其中  $U$  为形成电场  $E$  的外加电压. 从图 1(b) 可以看出, ITO/Ti 基 CNT 阴极比 ITO 基 CNT 阴极的 F-N 曲线更接近直线, 更符合场致电子发射.

为测试场致发射稳定性, 采用  $1000 \text{ V}$  稳压直流

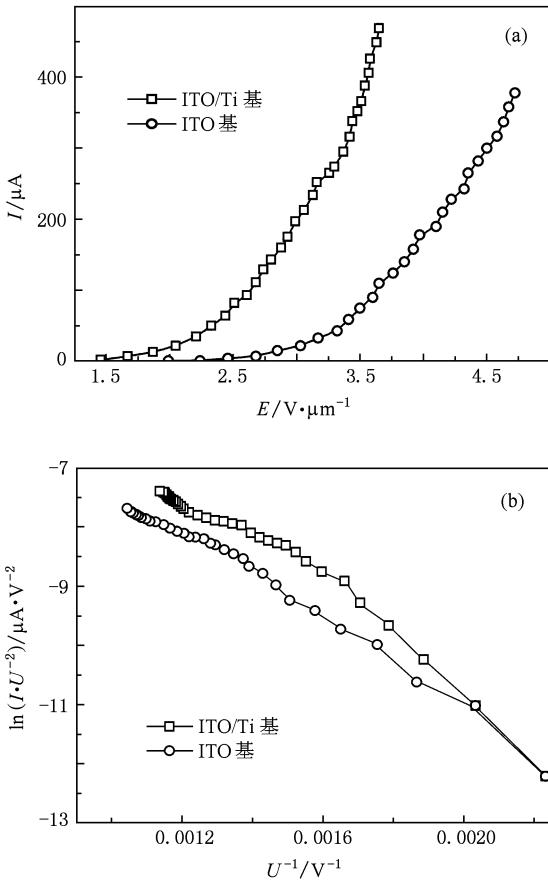


图1 ITO/Ti基与ITO基CNT阴极的场致发射特性比较  
(a)不同电场强度下的发射电流变化,(b)F-N曲线

电源供电,测试350 min内的Ti基CNT阴极的场致发射电流.图2为 $t = 10\text{ min}$ 的ITO/Ti基CNT阴极的场致发射电流稳定性测试结果.从图2可以看出,在前80 min内场致发射电流有一个明显的下降过程,通常称此为电老化过程,经过电老化之后,ITO/Ti基CNT阴极的场致发射电流趋于稳定,波动

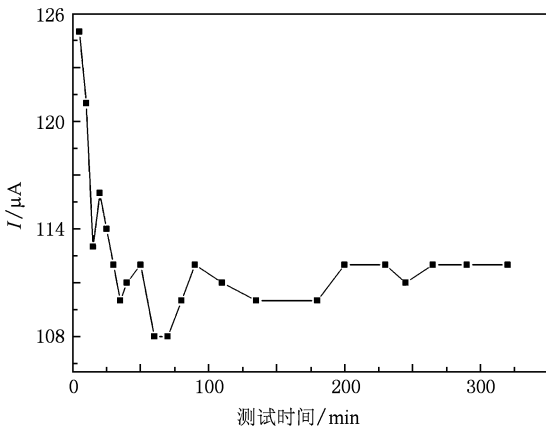


图2 ITO/Ti基CNT阴极的场致发射稳定性

仅有1—2  $\mu\text{A}$ ,只占总发射电流的1%.

CNT阴极具有良好的场致发射重复性是其用作电子器件阴极的一个必要条件.图3给出了ITO/Ti基CNT阴极膜的场致发射重复性测试结果,图中曲线a、曲线b和曲线c分别为电老化之前的3次测试,曲线d、曲线e和曲线f分别对应于电老化之后的3次测试.从图3可以看出,经过电老化后,Ti基CNT阴极的场致发射具有良好的重复性,3次测试中相同电场下场致发射电流偏差仅为2  $\mu\text{A}$ .这为CNT阴极在电子器件中的应用奠定了良好的基础.

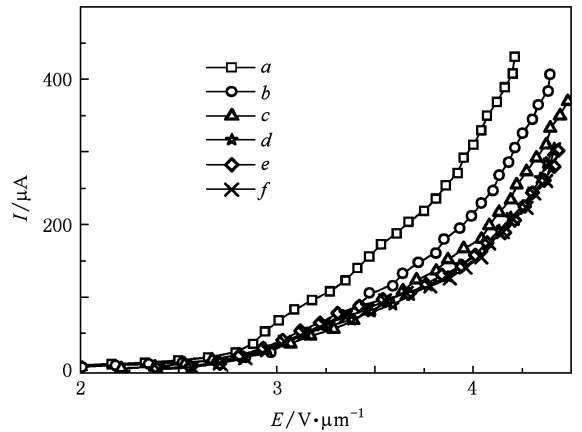
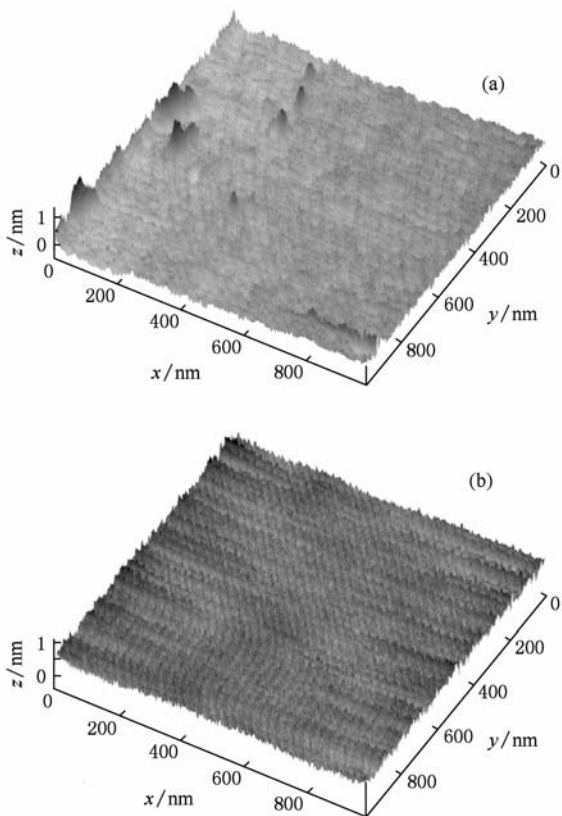


图3 ITO/Ti基CNT阴极的场致发射重复性

### 3.3. Ti膜厚度对场致发射特性的影响

采用AFM表征Ti膜表面的结果如图4所示.从图4可以看出, $t = 5\text{ min}$ 的膜层有明显小凸起,而 $t = 10\text{ min}$ 的膜层表面突起减小.表2给出了 $t$ 不同时Ti膜的表面粗糙度,其中 $R_z$ 为表面10点平均粗糙度, $R_{\text{RMS}}$ 为均方根粗糙度, $R_{\text{p-v}}$ 为最大高低差.由表2可知, $R_z$ 随 $t$ 的增加而减小, $t \geq 10\text{ min}$ 后, $R_{\text{RMS}}$ 也显著减小.不同镀膜时间 $t$ 的ITO/Ti电极的导电特性测试结果如表3所列.由表2可知:当 $t = 5\text{ min}$ 时,ITO/Ti电极电阻比较大,结合图4和表2中的 $R_{\text{p-v}}$ 值可以推断,此时Ti膜比较薄,表面可能还是一些分离的小岛;当 $t = 10\text{ min}$ 时,Ti膜厚度达到一定程度,所有岛连通,薄膜逐步转变为连续膜,方块电阻减小了36%;继续增加镀膜时间 $t$ ,ITO/Ti电极的方块电阻变化明显变小,比较 $t = 40\text{ min}$ 和 $t = 20\text{ min}$ 条件下的ITO/Ti电极,镀膜时间 $t$ 增加一倍,而电阻变化仅为2.63%.此外,ITO/Ti复合电极的双层电极间产生并联效果,电极的方块电阻减小,对CNT阴极的寿命有积极作用.

图4 Ti膜的AFM照片 (a)  $t = 5$  min, (b)  $t = 10$  min表2 不同镀膜时间  $t$  得到的Ti膜表面粗糙度

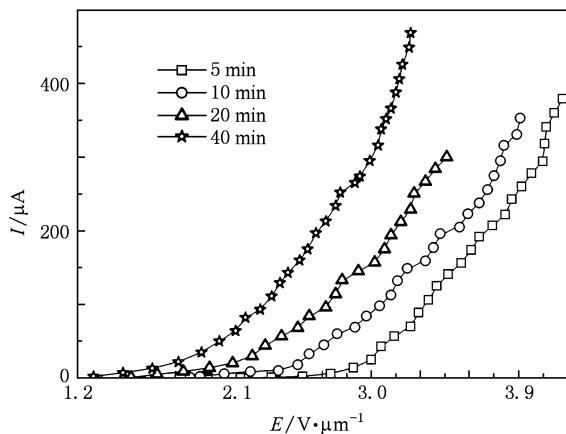
$t$ / min	$R_z$ / nm	$R_{RMS}$ / nm	$R_{P-V}$ / nm
5	12.110	0.6469	37.880
10	1.692	0.1507	2.948
20	1.452	0.1549	2.200

表3 镀膜时间  $t$  不同时 ITO/Ti 电极的导电性与相应 CNT 阴极场致发射特性

$t$ / min	5	10	20	40
方块电阻/ $\Omega$	147.6	94.5	79.9	77.8
开启电场强度/ $V \cdot \mu\text{m}^{-1}$	2.92	2.72	2.45	2.24
$3 V/\mu\text{m}$ 场强下的场致发射电流/ $\mu\text{A}$	72	128	174	354

图5给出了  $t = 5, 10, 20, 40$  min 的 ITO/Ti 基 CNT 阴极的场致发射特性曲线. 从图5可以看出: 随着电极膜层厚度增加, ITO/Ti 基 CNT 阴极的场致发射性能提高, 表现为随着镀膜时间增加开启电场逐渐降低; 同一电场下的场致发射电流随着  $t$  和厚度的增加而显著增大, 这与金属电极膜层厚度与基底导电性的关系相同.

大的发射电流密度是保证 CNT 阴极激发测试

图5 镀膜时间  $t = 5, 10, 20, 40$  min 的 Ti 基 CNT 阴极的场致发射特性

阳极发出高亮度荧光的前提. 图6给出在 1500 V 外电压作用下, 基于不同镀膜时间  $t$  的 ITO/Ti 基 CNT 阴极的发光照片. 从图6可以看出,  $t = 5, 10, 20, 40$  min 的 ITO/Ti 基 CNT 阴极均能激发很高的发光亮度, 结合此时外加电压、阴极和阳极的间距以及外电路的电阻可以推算出 ITO/Ti 基 CNT 阴极的电场强度为  $3.92 V/\mu\text{m}$ . 如果采用光刻工艺制作阴阳极板间的支撑, 则阴阳极间距可以从  $280 \mu\text{m}$  降低至  $60\text{--}80 \mu\text{m}$ , 那么采用该阴极的显示器件得到同样的高亮度, 驱动电压仅为  $200\text{--}300 V$ . 基于 ITO/Ti 基 CNT 阴极的高亮度特性以及可实现的低电压、低功耗驱动, 该研究对基于 CNT 阴极显示器件产品化具有重要参考价值.

采用色彩分析仪对测试阳极的发光特性进行了测量. 在忽略测量室内光吸收、反射等因素的条件下, 发光亮度  $L$  可表示为

$$L = L_1 S_p / S_c,$$

式中  $L_1$  为亮度测量值,  $S_p$  为探头的光窗面积. 由于色彩分析仪的探头光窗是半径为  $1 \text{ cm}$  的圆形, 正方形阴极的面积  $S_c$  为  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ , 因而发光亮度  $L = L_1 \times 3.14$ .

表4列出了基于不同镀膜时间  $t$  的 ITO/Ti 基 CNT 阴极在 1500 V 外电压作用下激发的发光亮度、有效发光面积比和有效发光亮度比. 在该系列 ITO/Ti 基 CNT 阴极的场致发射特性研究中, 测量得到该阴极的场发射电流随电场的变化与观察结果相似,  $t = 40$  min 的 CNT 阴极激发的发光亮度最高,  $t = 20$  min 时略低, 而  $t = 5$  min 的 ITO/Ti 基 CNT 阴极激发的亮度约为  $t = 40$  min 的 CNT 阴极所激发

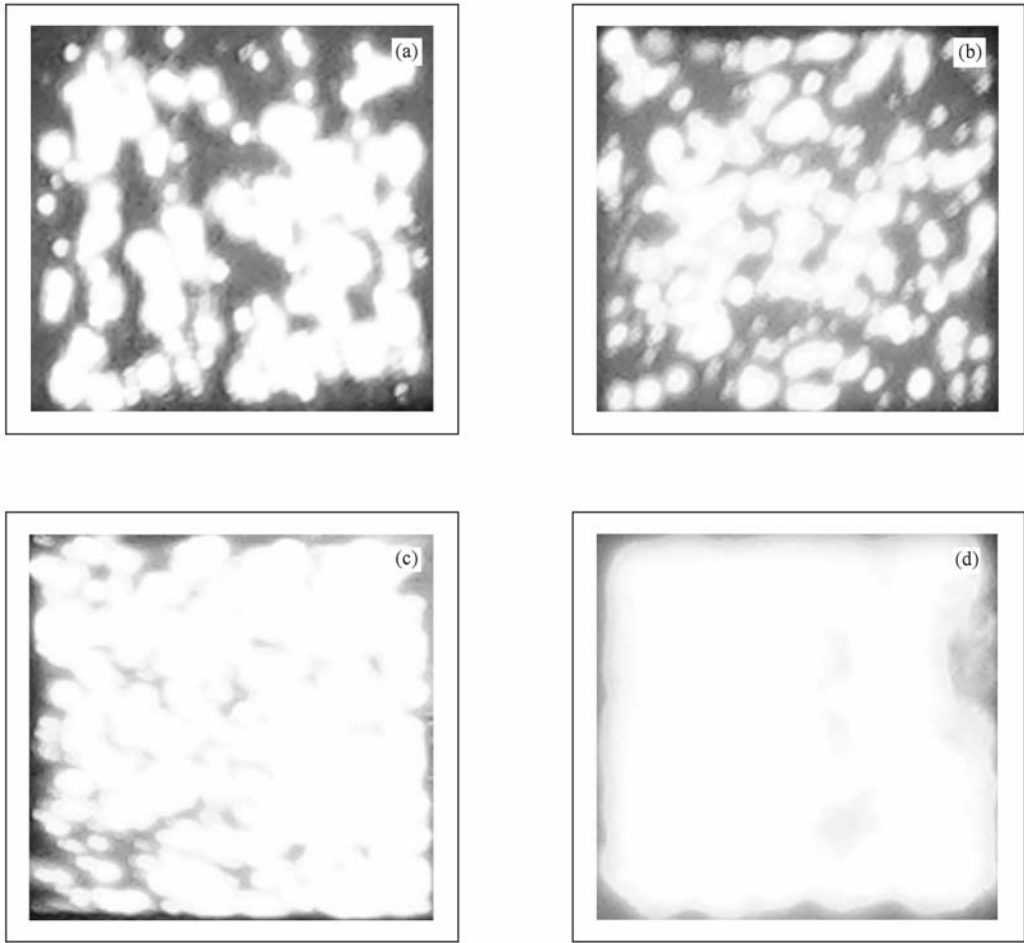


图6 不同镀膜时间  $t$  的 ITO/Ti 基 CNT 阴极激发测试阳极的发光照片 (a)  $t = 5$  min, (b)  $t = 10$  min, (c)  $t = 20$  min, (d)  $t = 40$  min

表4 镀膜时间  $t$  不同时 ITO/Ti 基 CNT 阴极激发测试阳极的发光亮度特性

$t/\text{min}$	5	10	20	40
测量亮度 $L_1/\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$	0.18	0.21	0.28	0.35
计算亮度 $L/\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$	0.57	0.66	0.88	1.10
有效发光面积比/%	32.56	33.24	47.67	65.68
有效发光亮度比/%	83.54	90.07	96.46	98.88

亮度的  $1/2$ . 从图6也可以看出,膜的厚度对场致发射有显著影响. 当  $t = 40$  min 时, ITO/Ti 基 CNT 阴极激发测试阳极的发光亮度有良好的均匀性,几乎整个阳极表面完全受激发光,已看不出分立的发光点,整个发光表面有均一的高亮度. 当  $t \leq 20$  min 时, ITO/Ti 基 CNT 阴极激发的发光面均匀性明显下降. 为进一步比较发光均匀性,计算了有效发光面积与总印刷面积之比(有效发光面积比)和有效发光面积产生亮度与总发光面积产生亮度之比(有效发光

亮度比), 所得结果也列于表4. 采集的阳极发光照片为256级灰度像素图,以大于128级灰度的像素点为有效发光点. 从表4可知,  $t = 40$  min 的发光照片的有效发光面积比达到65.68%,有效发光亮度比大于98%.

### 3.4. ITO/Ti 基 CNT 阴极的特性分析

导电电极与 CNT 膜的界面势垒大小和欧姆接触方式对 ITO/Ti 基 CNT 阴极场发射特性有重要影响,为了观察微观结构,采用 XRD 表征  $500^\circ\text{C}$  热处理后的 ITO/Ti 基 CNT 阴极,图7给出了 ITO/Ti 基 CNT 阴极的 XRD 谱和 ITO 基 CNT 阴极的 XRD 谱. 从图7(a)可见, ITO/Ti 基 CNT 阴极的 XRD 谱中在  $2\theta = 42^\circ$  附近有一个小衍射峰出现,这与  $\text{TiC}(200)$  衍射峰对应,说明在  $500^\circ\text{C}$  热处理后, ITO/Ti 基 CNT 阴极中可能有少量 TiC 生成. 根据 Tachibana 等<sup>[15]</sup>的研究,在金刚石表面沉积 Ti 后, Ti 和 C 在高

于 400 °C 时通过固态扩散可形成 TiC. 其他报道中 TiC 生成的热处理温度都比较高, 如秦玉香等<sup>[16,17]</sup> 在电泳生成的 CNT 膜顶层溅射厚度约为 4—8 nm 的 Ti 膜, 在真空环境下 900 °C 烧结 2 h 后有 TiC 生

成, 其 XRD 谱如图 7(c) 所示<sup>[16]</sup>. 本研究中 ITO/Ti 基 CNT 阴极的 CNT 膜层厚度约为 2—6 μm, 而 Ti 膜厚度仅为十几纳米, 相对而言 Ti 的含量很少, 这可能是 TiC 峰值较低的原因.

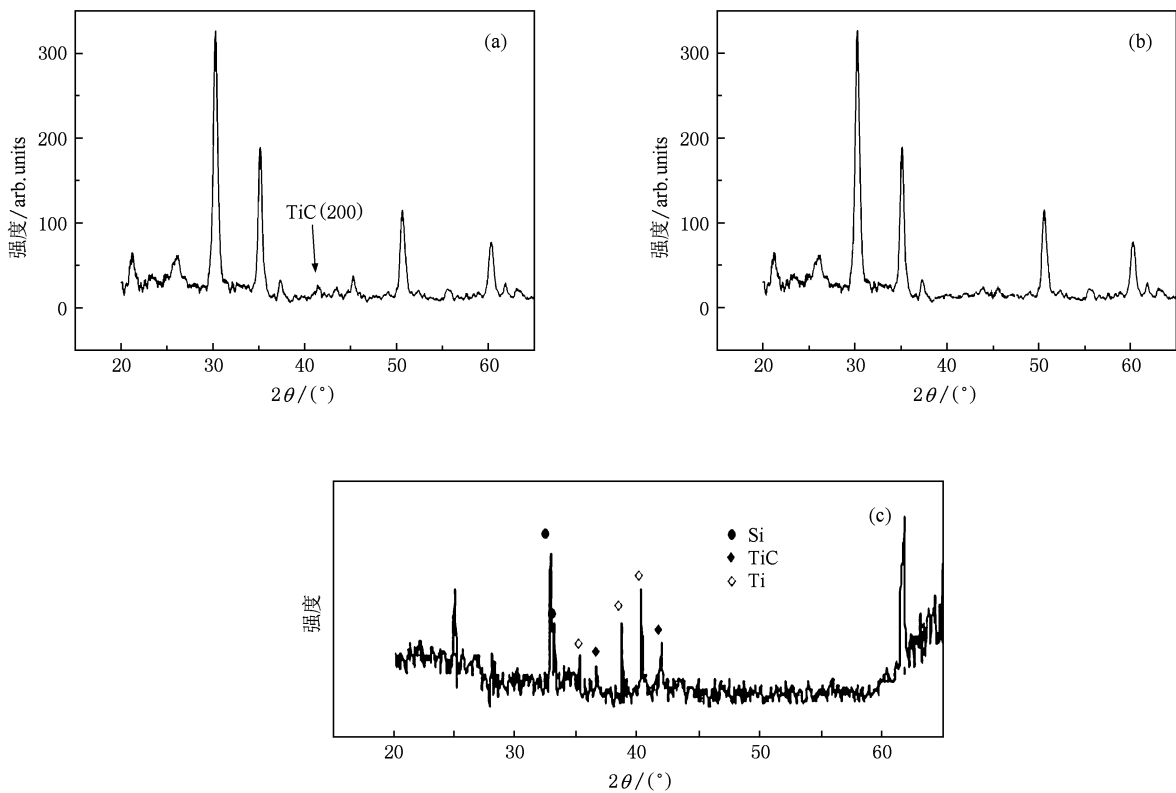


图7 不同 CNT 阴极的 XRD 谱 (a) ITO/Ti 基 CNT 阴极, (b) ITO 基 CNT 阴极, (c) CNT 阴极上镀 Ti 膜<sup>[16]</sup>

Ti 的功函数约为 4.3 eV, TiC 的功函数为 3.8 eV 左右, 无论 Ti 与 CNT 接触, 还是 TiC 与 CNT 接触, 电子传输经过的界面都没有阻碍势垒, 如果紧密接触, 电子就可以很容易从金属基底注入到 CNT 之中. TiC 的生成使 CNT 薄膜与导电电极形成有中间物的强作用体系, 可有效提高 ITO/Ti 基 CNT 阴极形成欧姆接触的概率. 如果简单地将 CNT 阴极的场致发射过程看成是基底-CNT 势垒和 CNT-真空势垒的两个跃迁过程, 那么 ITO/Ti 基 CNT 阴极就只有 CNT-真空势垒对电子产生阻碍作用. 因此, 在电压一定的条件下, 相对于 ITO 电极, ITO/Ti 基 CNT 阴极有更强的场致发射能力.

#### 4. 结 论

本文研究了 ITO/Ti 基 CNT 阴极的制作工艺,

分析了该阴极的场致发射特性. ITO/Ti 复合电极随着 Ti 膜厚度的增加, 电极导电性增强, 当 Ti 膜厚度达到 5—10 nm 后, ITO/Ti 电极具有良好的导电性. 基于 ITO/Ti 电极丝网印刷制作 CNT 阴极, 热处理工艺可能使得 ITO/Ti 基 CNT 阴极形成有中间物 TiC 的强作用体系, 该体系改善了电极与 CNT 间的附着性能, 降低甚至消除了电极与 CNT 之间的界面势垒, 增加了 CNT 与电极间形成欧姆接触的概率. 此外, ITO/Ti 基 CNT 阴极还具有与玻璃基底附着性能好的特点. ITO/Ti 基 CNT 阴极显示出了良好的场致发射特性, 其开启电场低, 场致发射电流密度可达到 384 μA/cm<sup>2</sup>, 能够激发测试阳极发射均匀、稳定的高亮度荧光. 因此, 制作 ITO/Ti 复合电极是实现稳定、均匀的高亮度发光 CNT 阴极的有效途径.

- [1] Guo P S, Chen T, Cao Z Y, Zhang Z J, Chen Y W, Sun Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6705 (in Chinese) [郭平生、陈 婷、曹章轶、张哲娟、陈奕卫、孙 卓 2007 物理学报 **56** 6705]
- [2] Gu G R, Ito T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4547
- [3] Song J H, Zhang G M, Zhang Z X, Sun M Y, Xue Z Q 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4392 (in Chinese) [宋教花、张耿民、张兆祥、孙明岩、薛增泉 2004 物理学报 **53** 4392]
- [4] Ma Y P, Shang X F, Gu Z Q, Li Z H, Wang M, Xu Y B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6701 (in Chinese) [马燕萍、尚学府、顾智企、李振华、王 森、徐亚伯 2007 物理学报 **56** 6701]
- [5] Park J H, Son G H, Moon J S, Han J H, Berdinsky A S, Kuvshinov D G, Yoo J B, Park C Y 2005 *J. Vac. Sci. Technol. B* **23** 749
- [6] Park G G, Sohn Y J, Yim S D, Yang T H, Yoon Y G, Lee W Y, Eguchi K, Kim C S 2006 *J. Power Sour.* **163** 113
- [7] Bachtold A, Henny M, Terrier C, Strunk C, Schonberger C 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 274
- [8] Xue Y Q, Datta S 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4844
- [9] Tomblor T W, Zhou C W, Alexseyev L, Kong J, Dai H J, Liu L, Jayanthi C S, Tang M J, Wu S Y 2000 *Nature* **405** 769
- [10] Kong K, Han S, Ihm J 1999 *Phys. Rev. B* **60** 6074
- [11] Menon M, Andriotis A N, Froudakis G E 2000 *Chem. Phys. Lett.* **320** 425
- [12] Andriotis A N, Menon M, Froudakis G E 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3890
- [13] Andriotis A N, Menon M 1999 *Phys. Rev. B* **60** 4521
- [14] Andriotis A N, Menon M, Froudakis G E, Lowther J E 1999 *Chem. Phys. Lett.* **301** 503
- [15] Tachibana T, Williams B E, Glass J T 1992 *Phys. Rev. B* **45** 11975
- [16] Qin Y X, Hu M 2008 *Appl. Surf. Sci.* **254** 3313
- [17] Qin Y X, Hu M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3698 (in Chinese) [秦玉香、胡 明 2008 物理学报 **57** 3698]

# High luminance carbon nanotube field emission cold cathode based on indium tin oxide/Ti composite electrode \*

Pan Jin-Yan<sup>1)†</sup> Zhang Wen-Yan<sup>2)</sup> Gao Yun-Long<sup>3)</sup>

1) (College of Information Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

2) (Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

3) (State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 21 February 2010; revised manuscript received 18 August 2010)

## Abstract

Carbon nanotube (CNT) cathode with an indium tin oxide (ITO)/Ti composite electrode is successfully fabricated using both magnetron sputtering technology and screen-printed technology which can improve adhesive performance between electrode and CNT cathode of transplanted-type CNT cold cathode, thus eliminating the effects of interface barrier and non-ohmic contact on field emission uniformity and stability of CNT cathode. Microstructure of ITO/Ti-based CNT cathode is studied by X-ray diffraction and field emission scanning electron microscopy. The results show that TiC phase forms in ITO/Ti-based CNT cathode, thereby a strong interaction system is created between CNT and Ti substrate which reduces, or even eliminates the interface barrier between electrode and CNT, and increases the probability of forming ohmic contact. The resistivity measurement by four probe technology shows that the ITO/Ti-based CNT cathode has performance of resistances in parallel and electric conductivity of CNT cathode increases. Characteristic test of ITO/Ti-based CNT cathode shows that field emission current reaches  $384 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  which significantly increases compared with that of ITO-based CNT cathode, and that the tested anode can be induced to emit stable, uniform and high luminance. So the ITO/Ti composite electrode is an effective way to make a CNT cathode with stable and uniform field emission and low power.

**Keywords:** carbon nanotube, cold cathode, field emission, uniformity

**PACC:** 6148, 7970

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60036010, 60476037) and the Scientific Research Foundation of Jimei University, China (Grant No. C609006).

† E-mail: ppxjjy@sohu.com