

一种基于碳纳米管场发射的发光二极管

田进寿^{1,2,3} 许蓓蕾^{1,2,3} 王俊峰¹ 周军兰² 郭宝平²

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

(2 深圳大学光电子学研究所, 广东省光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060)

(3 中科院研究生院, 北京 100866)

摘要 制作了一个基于碳纳米管场发射的发光二极管, 实验结果表明, 这种发光二极管驱动场强低, 亮度高, 能够满足常用显示器和发光管的亮度要求, 同时也用边界元法讨论了碳纳米管之间的场屏蔽效应.

关键词 边界元法; 碳纳米管; 发光二极管; 场屏蔽效应

中图分类号 TN383+.1 **文献标识码** A

0 引言

分子结构的完整性, 使碳纳米管具有独特的电学、力学性能和化学稳定性, 科学家对碳纳米管的应用作了广泛研究, 如气体储存、量子导线, 电子器件和催化剂载体等. 单根碳纳米管的场增强因子在 30000 ~ 50000 之间, 而碳纳米管膜的场增强因子在 800 ~ 3000 之间^[1], 因而无论是直立的碳纳米管或是横躺的碳纳米管, 都是良好的场发射体. 利用纳米碳纳米管场发射 (CNT-FE) 特性, 研发和生产 CNT-FE 照明灯、发光元件阵列和平面显示器^[2,3]; 它们是新一代照明、大屏幕显示和平面显示产品. 2000 和 2001 年日本和瑞士科学家分别用纳米碳纳米管制作了场发射照明灯, 后者制作的照明灯亮度可达 10^4 Cd/m², 耗电仅 4 W. 1997-98 年美国和日本制作了纳米碳纳米管场发射阴极射线管, 其中日本制作的 CNT-FE-CRT, 亮度可达 6.3×10^4 Cd/m², 寿命超过 8000 h^[4]. 信息化是全球和中国社会的发展方向, 各种显示设备是表达和传播信息必不可少的窗口, 因而它具有极大的市场需求. 随着经济和文化的发展, 特别是国内市场化 and 城市化的加速发展, 照明和显示技术行业的走势是绝对看好的. 据统计, 电能的 10% ~ 15% 用于照明, 可见其市场之广大. 白炽灯正逐步被荧光灯和节能灯所取代, 但是荧光灯和节能灯的制备离不开汞, 造成生产和回收时的环境污染和破坏. 荧光灯和节能灯存在频闪, 有害人眼健康; 近年出现的高频节能灯, 虽解决了频闪, 但却带来了高频辐射, 而且它的价格较高难于普及. CNT-FE 照明灯是环保型 (不含汞)、节能型 (亮度为 10^4 cd/m² 时的耗电仅 4 W) 和健康型 (无闪烁、无电磁辐射) 的新一代产品; 其制作工艺简单、原材料价

格低廉; 当形成规模化生产后, 其价格完全可以与荧光灯和节能灯相竞争, 而成为照明的更新换代产品.

1 实验

实验装置如图 1 所示, 所用荧光屏是 4 英寸影像增强器专用荧光屏, 采用高压荧光粉 ZnS:Cr, 为防止荧光粉脱落, 在荧光粉上镀一层 100 nm 厚的铝膜, 同时起到将向后散射的光反射回去和导电的作用. 该发光管的阴极制备如下: 将加工好的玻璃圆片清洗干净晾干, 然后用丝网印制技术将银浆按照特定的图案印制在玻璃基片上, 电极布线和阴极导电膜可一次印制形成, 然后置于马福炉内在 300℃ 加热半小时使银浆固化并烧掉其中的有机成分. 我们所用碳纳米管是用化学气相沉积法 (CVD) 制备的, 在电子显微镜下观察, 其纯度很高, 作为场发射体不需要进行提纯 (如图 2), 但碳纳米管往往聚集、缠结在一起, 因此需要用超声的办法将其分散开. 用洁净的镊子夹取适量碳纳米管粉末倒入酒精溶液中, 然后超声半小时以上, 用吸管吸取碳纳米管悬浮液滴在事先准备好的阴极导电膜上面, 就会发现碳纳米管吸附在银浆上面. 将样片再次放入马福炉内, 在 300℃ 加热半个小时, 尽可能清除掉碳纳米管表面的吸附物. 然后将样片和荧光屏平行装配到聚



图 1 基于碳纳米管的发光二极管装置
Fig. 1 Prototype of light emitting diode based on carbon nanotube

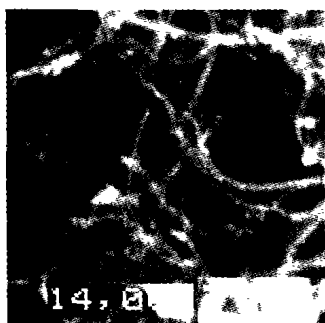


图2 用于制作阴极的碳纳米管

Fig.2 Carbon nanotubes used as cathode material

四氟乙烯支撑架上, 荧光屏和阴极平面之间的距离为 1.06 mm, 逐渐增大阳极上所加电压, 观察荧光屏发光现象.

2 结果与讨论

当阳极电压 V_a 增大到 3000 V 时, 能够观察到微弱的发光现象, 此时电流表的读数为 1.25 μA (电路中串联有 14 $\text{M}\Omega$ 的限流电阻), 当阳极电压 V_a 进一步增大到 3700 V 时, 荧光屏上的光斑增多, 如满天星斗, 同时光斑亮度增大, 最先发光的光斑中心颜色从绿色变为耀眼的白色 (如图 3). 图 5 是图 3 对应光斑的灰度图像, 通过读取各个光斑的亮度值, 发现光斑的最大亮度值为 255, 可见光斑本身的灰度范围很可能超过了 CCD 的灰度分辨能力. 小的光斑有时会出现闪烁现象, 而较大的光斑则很稳定, 此时电流表的读数为 2.5 μA , 在观察的十几分钟时间内没有发现电流有波动或衰减现象. 可见碳纳米管的确是一种很好的场发射体, 能够满足或超过一般显示器以及发光管的亮度要求. 当电压增大到 4800 V (如图 4) 时, 按照 Fowler-Nordheim 场发射理论, 一般金属发射体要有较大的场发射电流, 发射体尖端的局部电场强度 E_{loc} 要求达到 $2 \sim 3 \times 10^7 \text{ V/cm}$, 而实验中阴极和阳极之间的平均电场强度 $E_a = 3.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ (阳极电压取 3500 V), 按照 $E_{loc} = \beta E_a$, 得到碳纳米管膜的场增强因子 β 在 570 ~ 857 之间, 和文献 [1] 中的结果相比稍微有点小. 分析原因主要有以下几点: 首先是文献 [1] 中提到的碳纳米管是直立的, 而我们实验中的碳纳米管一般都是平躺在导电基底上; 其次是碳纳米管之间存在较强的场屏蔽效应.



图3 荧光屏上的光斑 ($V_a = 3700 \text{ V}$)

Fig.3 Emission spots on screen ($V_a = 3700 \text{ V}$)

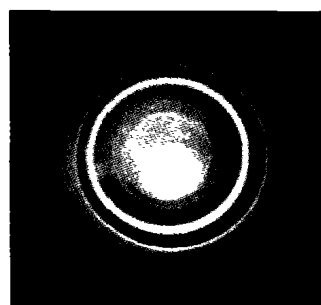


图4 荧光屏上的光斑 ($V_a = 4800 \text{ V}$)

Fig.4 Emission spots on screen ($V_a = 4800 \text{ V}$)

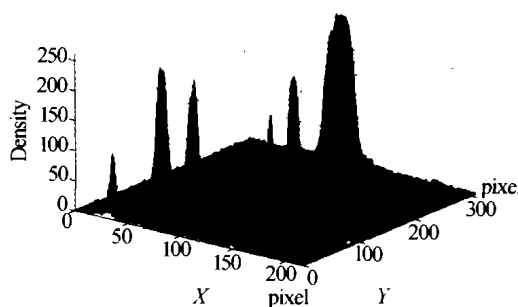


图5 光斑的强度分布 ($V_a = 3700 \text{ V}$)

Fig.5 Light intensity of the emission spots ($V_a = 3700 \text{ V}$)

为了讨论碳纳米管之间的场屏蔽效应, 我们建立如图 6 所示的模型, 利用边界元法计算中间碳纳米管 d 尖端的局部电场强度, 首先假设只有一根碳纳米管 d 存在, 然后分别在其两侧间隔 0.5 μm 依次放置两根、四根、六根碳纳米管时, 计算碳纳米管 d 的场增强因子如表 1.

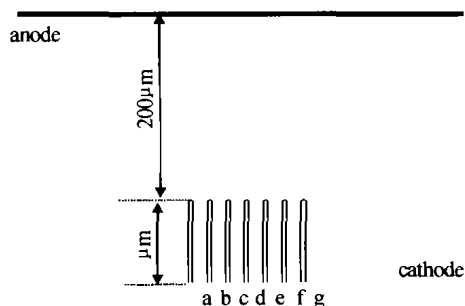


图6 碳纳米管阵列模型图

Fig.6 Mode of carbon nanotube array

表1 碳纳米管 d 的场增强因子随两侧碳纳米管数目的变化

碳纳米管总数	碳纳米管 d 的场增强因子
1	51577.65234
3	10045.73438
5	5725.67090
7	4040.93970

从表 1 的计算结果看, 碳纳米管之间的确存在场屏蔽效应. 对于给定的某一根碳纳米管来说, 周围碳纳米管对它的屏蔽效应有一个作用范围, 当碳纳米管之间的间距减小时, 进入该碳纳米管屏蔽作用范围内的碳纳米管数越多, 对该碳纳米管产生的屏蔽效应越明显. 可见: 场屏蔽效应主要是由进入屏蔽作用范围内的碳纳米管数目决定. 我们的计算模型只是考虑了碳纳米管两侧存在其它碳纳米管时

的情况,而实际的每一根碳纳米管四周各个方向上都有碳纳米管存在,屏蔽效应会更强.因此我们估算的碳纳米管膜的场增强因子是合理的.

3 结论

从实验结果来看,这种基于碳纳米管膜场发射的发光二极管具有亮度高,驱动电场低,稳定性好;寿命长,但这种阴极制作技术有待于提高发射的均匀性,最好采用原位生长技术在导电阴极(硅)上生长直立的碳纳米管,以进一步提高发射均匀性和降低驱动电压.

参考文献

- 1 Jo S H, Tu Y, Huang Z P, *et al.* Effect of length and spacing of vertically aligned carbon nanotubes on field emission

properties. *Applied Physics Letters*, 2003, **82** (20): 3520 ~ 3522

- 2 田进寿,李冀,李岩,等. 栅极和阴极的相对高度对电子传输比的影响. *光子学报*, 2003, **32**(8): 928 ~ 932

Tian J S, Li J, Li Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32** (8): 928 ~ 932

- 3 田进寿,李冀,许蓓蕾,等. 一种基于碳管场发散的大面积平板显示器结构分析. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1343 ~ 1348

Tian J S, Li J, Xu B L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32** (11): 1343 ~ 1348

- 4 Saito Y, Uemura S, Sashiro. Field emission from carbon nanotubes and its application to electron source. *Carbon*, 2000, **38**(1): 169 ~ 182

A Light Emission Diode Based on the Field Emission of Carbon Nanotubes

Tian Jinshou^{1,2,3}, Xu Beilei^{1,2,3}, Wang Junfeng¹, Zhou Junlan², Guo Baoping²

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

² Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Guangdong Province Key Laboratory of Optoelectronic Device and System, Shenzhen 518060

³ Graduate School of CAS, Beijing 100688

Received date: 2003-08-11

Abstract A light emitting diode has been manufactured based on the field emission of carbon nanotubes. The experiment results indicated that its brightness could meet with the need of almost all the light emission tubes or display devices. The field shielding effect between nanotubes has also been discussed with boundary element method.

Keywords BEM (Boundary Element Method); Carbon nanotube; Light emitting diode; Field shielding effect



Tian Jinshou was born in January 1970. He got his B. S. (Physics) degree from Northwest Normal University in 1993 and M. S. (Physical Electronics) degree from Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics of CAS in 1999 respectively. Now he is a Ph. D. candidate in the Joint Laboratory of Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics of CAS and Institute of Optoelectronics, Shenzhen University. His current research interest is field emission display and nanoscience.