

# 碳纳米管光场致发射新型电子枪的初步方案设计

孙启龙<sup>1,2</sup> 王兴涛<sup>1</sup> 林国强<sup>1</sup> 戴志敏<sup>1</sup>

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 本文给出了一种基于碳纳米管光场致发射机制的新型电子枪的设计方案。该电子枪的枪体采用 Pierce 枪结构,加 200kV 直流高压,阴极材料为碳纳米管,驱动激光波长 800—850nm,脉冲峰值电流为 6A,平均电流为 12mA。与传统的光阴极电子枪相比,这种基于碳纳米管光场致发射机制的新型电子枪具有结构简单、量子效率高等优点。此外,本文还介绍了正在搭建的该电子枪实验平台。电子枪的性能,特别是阴极寿命和量子效率将在实验深入研究。

**关键词** 光场致发射,电子枪,碳纳米管,量子效率  
**中图分类号** TL503.3

近年来,X射线自由电子激光器、能量回收型直线加速器光源(ERL)、高功率太赫兹辐射源(THz波或 T-ray)等基于高性能电子束的先进光源,引起人们的极大兴趣。这些先进光源对电子束的要求几近苛刻,而决定电子束品质的关键是产生电子束的电子枪。目前,通常采用光阴极电子枪以获得高性能电子束,其阴极可为金属型光阴极<sup>[1]</sup>或半导体型光阴极<sup>[2]</sup>。这两种类型的光阴极都被广为采用,但它们都存在一定的局限性。

较为常用的金属型光阴极<sup>[1]</sup>有铜阴极和镁阴极。铜的量子效率在 $10^{-5}$ — $10^{-4}$ ,镁则在 $10^{-4}$ — $10^{-3}$ ,它们的量子效率均低,这就要求有很高激光功率的激光器。如 ERL,其电子枪平均流强>100mA,如此之大激光器功率,现有激光技术难以实现。

半导体型光阴极<sup>[2]</sup>的量子效率通常可达 1%左右,但该电子枪结构复杂,且寿命不高,须在使用中及时制备,它也不能承受强电压,故须高真空。

作为一种新兴的电子发射材料,碳纳米管受到人们越来越大的关注。碳纳米管的光学性能良好,在光学和光电子学等领域有广泛应用。作为一种新型的电子发射源,碳纳米管已应用于平板显示器、阴极射线管等领域。碳纳米管的量子效率为 1.5%左右<sup>[3]</sup>,作为光阴极材料具有明显优势。

2005年,我们开始了基于碳纳米管光场致发射的电子枪<sup>[4]</sup>的实验研究。通过测定碳纳米管的发射能力实验及其束流实验,得到了碳纳米管光场致发射电子枪的有关参数,为将来碳纳米管光场致发射电子

枪研制提供了条件。我们用 100kV DC 电子枪<sup>[5]</sup>平台作为实验平台,将其阴极更换为碳纳米管阴极,电子枪阴极高压为 45kV 时,可得到 0.27mA 束流,电流发射密度为 0.54mA/cm<sup>2</sup>,并可稳定运行 2 周。

日本高能加速器研究组织(KEK)的碳纳米管阴极<sup>[6]</sup>,采用脉冲高压,获得 480mA 的电流,在真空度为 $10^{-6}$ Pa 下可稳定运行 3 周。

本文介绍我们的碳纳米管光场致发射电子枪研制进展。

## 1 光场致发射理论概述<sup>[7]</sup>

照射于物体表面的激光,被物体部分吸收,在物体内产生大量电子,其一部分克服表面势垒而逸出,成为发射电子,此即光电发射。作为光电发射的一种,光场致发射是发射体处于电场强度接近场致发射阈值场强的条件下,输入激光脉冲激发电子发射的现象,其电子流受人射激光脉冲的控制。

Schwartz 等<sup>[8]</sup>用自由电子模型给出了光场致发射电流与激光频率和电场强度的关系,如式(1):

$$J(E) = \frac{4\pi me}{h^3} f(W - \hbar\omega) \int_{-W + \hbar\omega}^W d\omega D(\omega, E) P(\omega, E) \quad (1)$$

其中 $f(W - \hbar\omega)$ 是 Fermi-Dirac 分布函数, $D(\omega, E)$ 是带有能量 $\omega$ 的电子穿过表面势垒的透射概率。

$P(\omega, E)$ 是包含物体初始状态和最终状态的物理量。

碳纳米管的长径比好,表面电场强度大,易于获得很高的场强(GV/m 量级)。

国家重点基础研究发展计划(2002CB713600)资助

第一作者:孙启龙,男,1978年出生,2002年毕业于聊城大学,现为中国科学院上海应用物理研究所在读博士研究生,核技术应用专业

收稿日期:2007-02-09,修回日期:2007-05-28

## 2 电子枪设计

### 2.1 设计参数

表 1 给出了以碳纳米管作为阴极材料的新型电子枪的技术指标。

表 1 电子枪主要技术指标  
Table 1 Main parameter of the electron gun

阴极有效半径 Cathode radius/mm	8
能量 Energy /kV	200
阴极表面最大场强 Maximum field /MV·m <sup>-1</sup>	5
脉冲电荷量 Charge /pC	60
脉冲宽度 Pulse width /ps	10
重复频率 Repetition rate /MHz	200
峰值流强 Peak current/ A	6
平均流强 Average current /mA	12

### 2.2 碳纳米管阴极

图 1 和图 2 分别为该碳纳米管阴极及其扫描电镜(SEM)照片,碳纳米管由本所核分析实验室生长,其生长条件和制备过程可参见文献[4]。

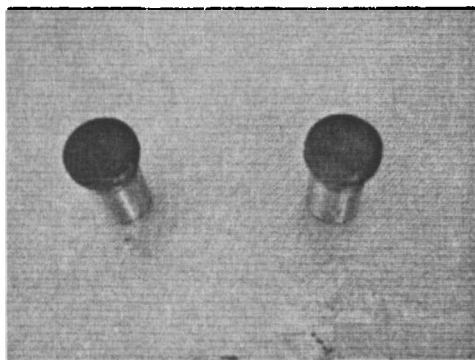


图 1 生长在不锈钢表面的碳纳米管

Fig. 1 Carbon nanotubes grown on stainless steel substrate

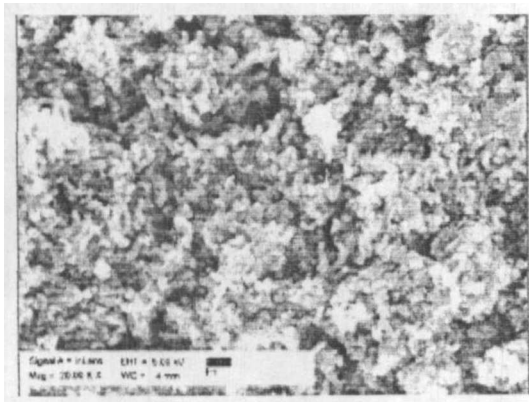


图 2 碳纳米管的扫描电镜图片

Fig. 2 SEM image of the carbon nanotubes

### 2.3 电子枪本体结构及数值模拟

2.3.1 电子枪结构 电子枪本体结构采用常规的 Pierce 枪结构<sup>[4,5]</sup>。该结构由上海光源研制的 100kV 电子枪<sup>[5]</sup>本体结构放大 2 倍而成,电子枪阳极为 0 电位,阴极处于-200kV 高压,故该电子枪需用 0.3MPa 的 SF<sub>6</sub> 气体作绝缘保护。电子枪内真空度为 10<sup>-7</sup>Pa,由一台 200L 离子泵提供。

2.3.2 数值模拟 采用 SLAC 的电子枪模拟程序 EGUN<sup>[9]</sup> 进行了该电子枪的模拟计算。图 3 给出了阴极、聚焦极和阳极间距离,图 4 为电子枪束流轨迹的模拟结果。阴极-阳极间距为 5cm,场强约为 4MV/m,电子枪阳极出口处电子束的束腰半径约为 1.7mm,束流为 6A,发射度约为 1.58πmm·mrad。图 5 给出了电子枪束流发射度以及电子枪出口处束腰半径随电子枪流强的变化。随着电子枪流强的增大,电子枪的束流发射度逐渐减小,而电子枪流强 >6A 时,电子枪阳极孔出口处的电子束束腰半径会变大。因此,该电子枪的设计流强为 6A。

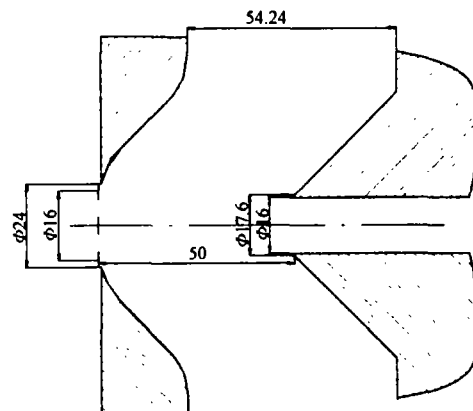


图 3 电子枪尺寸图(单位: mm)

Fig. 3 Dimension (in :mm) of the electron gun

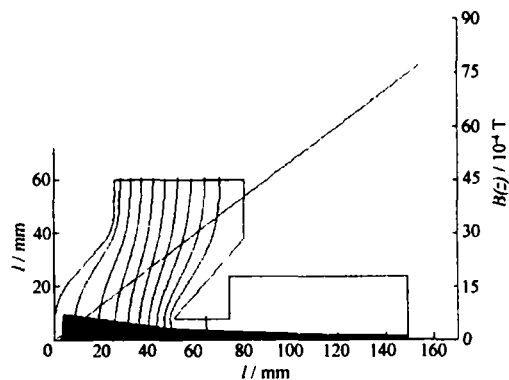


图 4 EGUN 模拟的电子枪的束流轨迹(6A)

Fig. 4 Simulation of electron trajectory of the gun using EGUN (6A)

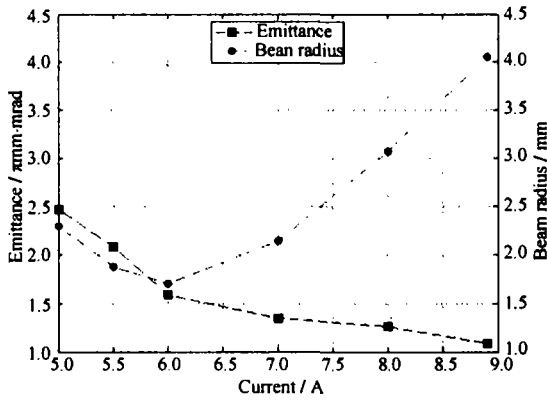


图 5 束流发射度与束腰半径随流强的变化  
Fig. 5 Emittance and beam radius vs. current

2.3.3 电子枪暗电流 在电场作用下，碳纳米管在激光脉冲间隙内会因场致发射而产生暗电流。我们先前的实验表明<sup>[4]</sup>，在 4MV/m 电子枪电场强度下，电子枪的暗电流达 0.3mA。200kV 枪压下 0.3mA 电子束的束流轨迹(图 6)表明，由于空间电荷效应较小，电场聚焦力过大，0.3mA 的暗电流会使电子枪产生过聚焦，电子束在电子枪出口处的束腰半径急剧增大至约 7.7mm。图 7 给出了在不同暗电流情况下电子束束腰随暗电流的变化。暗电流<5mA 时，电子枪出口处的束腰并无太大的变化，基本在 7.7mm 左右，暗电流从 0.1mA 增至 5mA，电子束的束腰半径变化在 1%左右。

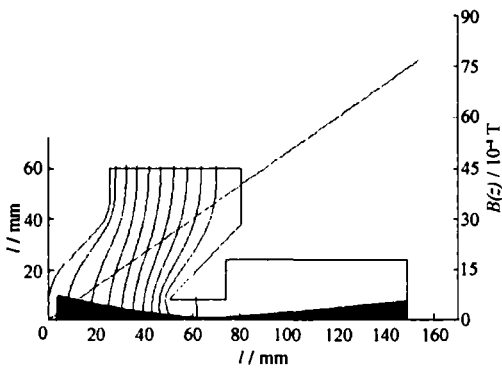


图 6 0.3mA 电子束束流轨迹  
Fig. 6 Trajectory of the beam of 0.3mA

由前文的 6A 电子枪的模拟，若在电子枪出口法兰上加上一个半径为 3mm 的限束孔，可将暗电流降为 0.1mA 以下。

### 2.4 激光器主要参数要求

量子效率(Q.E.)是表征光电阴极特性和深入理解发射机理的重要参量。研究量子效率可进一步了

解光电子发射物理过程，提出对材料的性能要求，为制造工艺指明方向。光阴极的量子效率定义为光阴极发射出来的光电子数量和入射光子数量的比值。

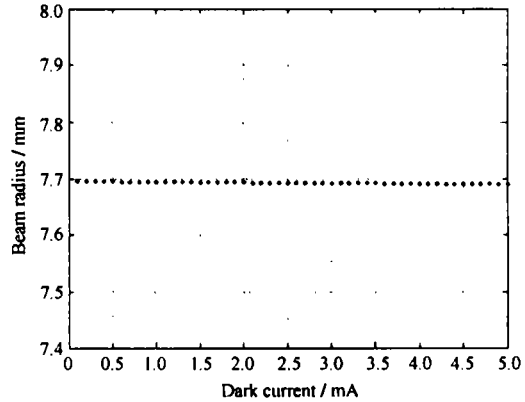


图 7 电子束束腰半径随暗电流的变化  
Fig.7 Beam radius vs. dark current

由此可得到量子效率、脉冲电荷量以及激光器平均功率的关系，如式(2):

$$P = \frac{q}{Q.E. \times \frac{\lambda}{hc}} \times f \quad (2)$$

式中  $q$  为脉冲电荷量,  $P$  为激光器的平均功率,  $f$  为激光器的重复频率,  $\lambda$  为激光波长。

电子枪用 800nm 激光驱动，激光脉冲长度 10ps，脉冲重复频率 200MHz，参考[3]的实验结果，碳纳米管的量子效率可达 1.5%。本文暂以 1%的量子效率估算对激光器的功率要求。在脉冲电荷量为 60pC 的情况下，由式(2)可大致估算出，实验所需激光器的平均功率约为 2W，具体功率将由实验确定。

## 3 原理性样机实验方案

### 3.1 实验平台

上海光源 100kV 电子枪测试平台的大致布局如图 8。其包括阴极( $\phi 8$ mm)、聚焦极、阳极( $\phi 8$ mm 孔)、短透镜、四极透镜、荧光靶，以及一个法拉第筒。激光器到试验台的激光传输光纤为 Nufern PM-780 HP 光纤(30m)。实验中，碳纳米管发射的光电流测量用该法拉第筒进行，荧光靶测量电子束的束斑则用 CCD 相机。

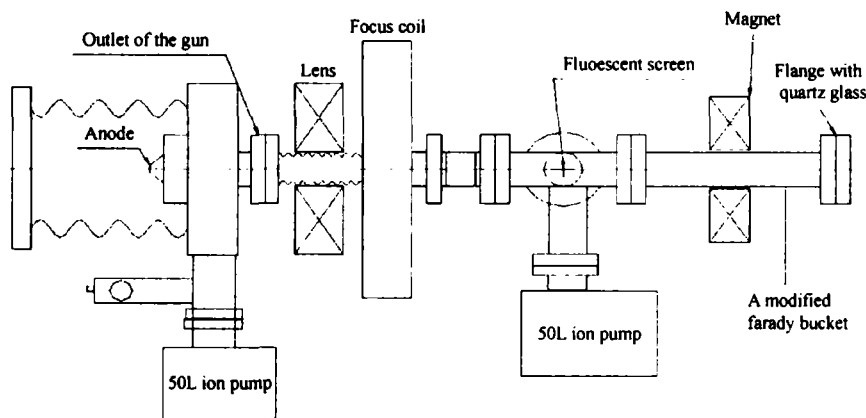


图 8 电子枪实验台布局示意图  
Fig.8 Layout of the test platform of electron gun

### 3.2 激光传输与诊断

驱动激光器选用 Mai Tai Diode-pumped 锁模激光器(光谱物理公司, 激光波长, 800—850nm; 平均功率>650mW; 峰值功率, >82kW; 脉冲宽度, <100fs; 调节范围, 750—850nm, 780—920nm; 重复频率, 80 MHz; 噪声, <0.2%; 稳定性, <2%)。激光器到电子枪实验平台的激光传输示意图见图 9。激光经透镜耦合进入光纤, 输入电子枪实验室, 由透镜耦合输出, 再经过一系列的传输后入射到阴极表面。激光入射阴极前, 用功率计测量激光功率, 入射到阴极处的光斑大小, 由安放在与阴极有相同光程处的紫外光 CCD 相机测量。

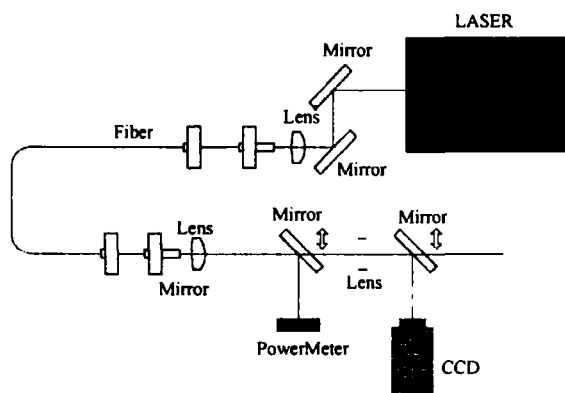


图 9 激光传输与诊断示意图  
Fig.9 Transmission and diagnosis of the laser

### 3.3 预期实验结果

可如下估算实验中可得到的脉冲电荷量、流强等: 碳纳米管的量子效率, 1%; 激光波长, 800nm; 重复频率, 80MHz; 入射到阴极上的激光的平均功率, 300mW(光纤传输损耗在 10%左右, 考虑到传

输过程中光纤的弯曲、镜面反射等的损耗, 我们取入射到阴极上的激光的平均功率为 300mW)。由式(2)可知, 实验中可得到的脉冲电荷量约为 24pC, 即峰值流强约在 300mA, 平均流强约为 2mA, 比我们先前的场致发射电流<sup>[4]</sup>提高近八倍。

### 4 结论

本文给出了一种基于碳纳米管光场致发射机制的新型电子枪设计方案。电子枪枪体采用 Pierce 枪结构, 加 200kV 直流高压, 阴极材料为碳纳米管, 驱动激光波长 800—850nm, 脉冲峰值电流为 6A, 平均电流为 12mA。与传统的光阴极电子枪相比, 该新型电子枪具有结构简单, 量子效率高等优点。电子枪的性能, 特别是阴极寿命将进行实验研究。

致谢 感谢本所核分析实验室俞国军博士和巩金龙研究员在碳纳米管生长上给予的帮助; 感谢本所核分析实验室何绥霞在 SEM 测试上给予的支持。

### 参考文献

- 1 Srinivasan-Rao T, Fischer J, Tsang T. J Appl Phys, 1991, 69(5): 3291—3296
- 2 Christian Travier. AIP Conference Proceedings. 1995, 355: 57—74
- 3 Shaoxin Lu, Balaji Panchapakesan. Nanotechnology, 2006, (17): 1843—1850
- 4 SUN Qilong, LIN Guo qiang, DAI Zhimin. High Energy Phys Nucl Phys, 2007, 31(3): 296—299
- 5 SHENG Shugang, LIN Guoqiang, GU Qiang, et al. Nucl Sci Tech, 2003, 14(1): 20—23
- 6 Hozumi Y, Ohsawa S, Sugimura T, et al. Particle Accel-

- erator Conference, 2005WPAP014
- 7 刘元震, 王仲春, 董亚强. 电子发射与光电阴极, 北京: 北京理工大学出版社, 1995, 154—332
- LIU Yuanzhen, WANG Zhongchun, Dong Yaqiang. Elec- tron emission and photocathode. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. 1995. 154—332
- 8 Schwartz C, Cole M W. Surf Sci, 1982, 115: 290—300
- 9 Herrmannsfeldt W B. SLAC-331, 1988

## Design of a novel electron gun based on photoemission of carbon nanotubes

SUN Qilong<sup>1,2</sup> WANG Xingtao<sup>1</sup> LIN Guoqiang<sup>1</sup> DAI Zhimin<sup>1</sup>

*1 (Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800)*

*2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)*

**Abstract** The paper reports the design of a novel electron gun based on photoemission of carbon nanotubes. The electron gun, using the traditional Pierce structure, can generate 6A peak pulse beam current and average beam current of 12mA when the applied DC voltage is 200kV and the driven laser's wavelength is 800-850nm. This novel electron gun has the simply structure and high quantum efficiency relative to traditional photocathode electron gun. Additionally the electron gun test platform undergoing was introduced in the paper. The electron performance especially the lifetime and the quantum efficiency of the cathode will be studied thoroughly.

**Key words** Photoemission, Electron gun, Carbon nanotubes, Quantum efficiency

CLC TL503.3