

碳纳米管冷阴极 Pierce 电子枪

孙利民¹, 袁学松^{1*}, 张宇², 黎晓云¹, 杨欢¹, 鄢扬^{1,2}

(1. 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054;

2. 中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要:为发展场致发射冷阴极毫米波电真空辐射源器件,对利用大面积碳纳米管冷阴极产生大电流、高电流密度电子注的电子光学系统进行了研究.通过在 Pierce 电子枪阴极表面引入栅网结构,解决了碳纳米管冷阴极场致发射所需的强电场和电子聚束问题.在碳纳米管冷阴极实验测试数据的基础上,采用粒子模拟软件对上述电子光学系统进行了仿真.研究了栅网对注电流、注腰半径和电子注散射的影响,分析了阳极电压和外加轴向磁场对电子注的聚束作用.优化后的仿真结果表明在阴极发射面为 3.03 cm^2 时,该电子光学系统能够产生 210 mA、60 kV, 电流密度为 6.7 A/cm^2 , 最大注半径为 1mm 的电子注.

关键词:Pierce 电子枪;碳纳米管;冷阴极;场致发射

中图分类号:TN102 **文献标识码:**A

A Pierce electron gun based on carbon nanotube cold cathodes

SUN Li-Min¹, YUAN Xue-Song^{1*}, ZHANG Yu², LI Xiao-Yun¹, YANG Huan¹, YAN Yang^{1,2}

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. State Key Laboratory Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In order to develop millimeter wave electric vacuum radiation source devices with field emission cold cathodes, the electron-optical system using a large area carbon nanotube cold cathode (CNCC) was investigated, which can generate an electron beam with large current and high current density. By adding a mesh grid on the cathode surface of a Pierce electron gun, problems of the electron bunching and high electric field applied to the CNCC surface have been solved. Based on the experimental results of a CNCC, the field emission model was built, by using PIC simulation software, to simulate the Pierce electron-optical system. The effect of the mesh grid on the electron beam has been analyzed. And the influence of the anode voltage and the axial magnetic field for the electron beam radius has been researched. The simulation results of the electron-optical system showed that when the area of cathode is 3.03 cm^2 , an electron beam with 210 mA at 60 kV can be produced. The current density is 6.7 A/cm^2 and the maximum radius of the electron beam is 1 mm.

Key words: Pierce electron gun; carbon nanotubes; cold cathodes; field emission

PACS: 61.48. De, 79.70. +q, 41.85. -p

引言

碳纳米管作为场致发射性能优异的新型冷阴极材料,具有工作电压低、发射电流大、使用寿命长、可靠性高等特点^[1-2],是当前的研究热点.目前已在场致发射显示器、x 射线管、阴极射线管等领域广泛应

用^[3-4],同时其在毫米波电真空辐射源器件的应用也具有广阔的前景.电真空辐射源器件作为毫米波频段上输出功率能量最大的源器件,是现代空间通讯、雷达、电子对抗、可控热核聚变装置、粒子加速器等电子系统的核心器件,对国家安全和国民经济具有很重要的作用.传统的电真空器件一般采用热阴极

收稿日期:2011-05-21,修回日期:2012-12-02

Received date: 2012-05-21, revised date: 2012-12-02

基金项目:国家自然科学基金(U1134006, 61101041);国家重大科学研究计划(2013CB933603);中山大学光电材料与技术国家重点实验室开放课题(KF2010-ZD-06)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1134006, 61101041); National Basic Research Program of China (2013CB933603); an open-project fund (KF2010-ZD-06) from State Key laboratory of Opto-Electronic Material and Technologies (Sun Yat-sen University, Guangzhou, China)

作者简介 (Biography): 孙利民(1986-),女,四川广元人,硕士生,主要研究领域为场致发射冷阴极毫米波辐射源研究. E-mail: slm14@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: yuanxs@uestc.edu.cn

发射系统作为电子发射源,但随着器件频率向毫米波、亚毫米波频段的发展,器件的尺寸越来越小,需要电子注的注半径也越来越小,这使得热阴极电子光学系统的加工难度不断加大.另一方面传统热阴极还存在结构复杂、功耗大、易损坏等问题,是电真空器件难于集成化的一个关键.碳纳米管场致发射冷阴极则是解决上述问题的最佳方案.与热阴极相比,碳纳米管冷阴极具有反应速度快、效率高、尺寸小、可靠性高等一系列优点,能极大的提高电真空器件的性能.目前通过优化生长工艺以及采用不同方式制备阵列形式的碳纳米管冷阴极虽可获得较高的场发射电流密度,但对于大面积情况下的碳纳米管冷阴极,其发射电流密度通常仍在 mA/cm^2 数量级^[5,6].另一方面根据器件输出功率与电流成正比可知,要实现器件的大功率输出,电子注的电流应越大越好,为了获得较大的发射电流采用大面积的碳纳米管冷阴极是必须的.尽管采用强流脉冲爆炸式工作方式的大面积碳纳米管冷阴极已可以产生 $200 \text{ A}/\text{cm}^2$ 以上的发射电流密度,但由于其采用爆炸式的场发射方式,阴极在发射电子过程中会释放大量的等离子体气体^[7-9],导致器件的真空度下降,影响电真空器件正常工作.因此解决如何从大面积碳纳米管冷阴极上采用非爆炸式工作方式获得大电流、高电流密度的电子注就成为发展碳纳米管冷阴极毫米波电真空辐射源器件的关键所在.

围绕这一关键问题,文中对利用大面积碳纳米管冷阴极产生大电流、高电流密度的 Pierce 电子枪进行研究. Pierce 电子枪由阴极、聚焦极和阳极组成,通过电聚焦和磁聚焦系统对电子注进行聚束,可获得注电流密度远大于阴极发射电流密度的电子注,但其用于研究碳纳米管冷阴极电子枪还存在一定问题,因为要在 Pierce 电子枪阴极面产生均匀的强电场难度较大.为此文中在阴极面引入了一层与之平行栅网,其作用是在阴极面产生均匀的强电场,并利用粒子模拟软件研究了栅网对注电流、注腰半径和电子注散射的影响,同时还分析了阳极电压和外加轴向磁场对电子注聚束的作用.

1 电子枪的结构

为使得碳纳米管冷阴极电子枪的研究更具参考价值,文中采用中山大学光电材料与技术国家重点实验室制备的碳纳米管冷阴极对电子枪进行研究,该碳纳米管冷阴极在实验测试中最大发射电流密度为 $127 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ^[10]. 电子枪的阴极是轴对称结构的

球面阴极,该结构的电子枪具有良好收敛性,其阴极半径 $r_k = 9.6 \text{ mm}$,发射面积 $s_k = 3.03 \text{ cm}^2$,电子枪结构如图 1 所示. 图 1 中电子枪的栅网与聚焦极连为一个整体,栅网与聚焦极同电位,此时枪区的电势等位面是一组具有相同角度的同心球面,更益于电子注的聚束.当然栅网结构的引入会截获一部分电流,根据文献[11]仿真中设置栅网的电流通过率 $\eta = 70\%$. 另一方面栅网必须与大规模阵列碳纳米管精确对中和紧贴,这对栅网的加工和装配提出了较高精确度.为此可采用激光精确打孔对栅网进行加工,利用多个对中定位模具进行精确装配.

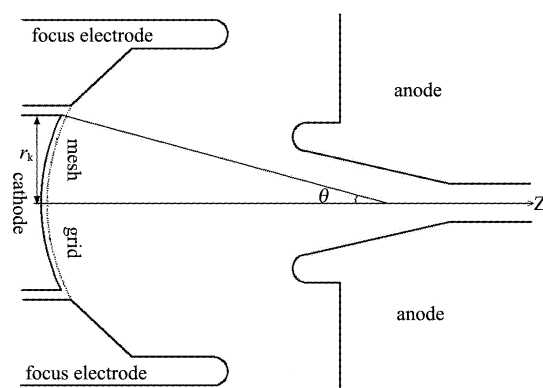


图 1 电子枪结构图
Fig. 1 Structure of electron beam gun

2 电子枪的模拟研究

对于电子枪的研究通常可采用 CHIPIC 粒子模拟软件进行仿真,但该软件的场致发射模型是针对金属的场致发射模型所编写的,若用于模拟碳纳米管冷阴极电子枪很难真实的反应出碳纳米管冷阴极的场发射电流密度,存在很大的误差.为解决此问题,文献[10]中提出通过实验测试结果指导建立碳纳米管冷阴极仿真模型并获得相关仿真参数,采用此模型参数对该电子光学系统中碳纳米管冷阴极的场发射特性进行研究.图 2 给出了间距为 0.5 mm 时,电子枪阴极的仿真电流密度与碳纳米管冷阴极场发射电流密度的对比图.由图 2 知,采用该模型参数的粒子模拟软件能较真实的反应碳纳米管冷阴极的场发射电流密度,因此可以利用该模型参数对产生大电流、高电流密度的电子光学系统进行研究.

根据 F-N (Fowler-Nordheim) 理论以及 CHIPIC 粒子模拟软件的金属场致发射仿真模型,碳纳米管冷阴极场致发射电流密度可表示为:

$$J = aE^2 \exp[-b\phi^{3/2}/E]/\phi \quad , \quad (1)$$

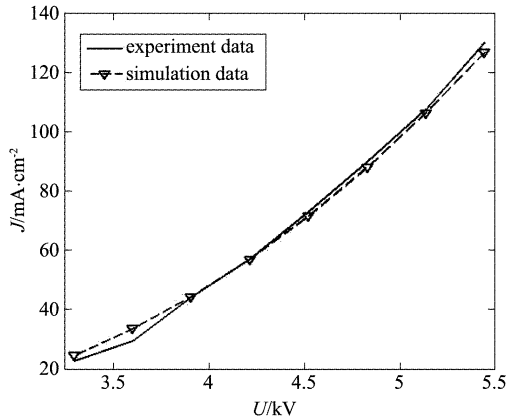


图2 仿真电流密度与实验测试电流密度的对比图
Fig. 2 The simulated emission current density and experimental results

其中 a 为碳纳米管冷阴极场致发射线性因子, 单位为 AeV/V^2 , 为碳纳米管冷阴极场致发射指数因子, 单位为 $\text{V}/(\text{eV})^{3/2}\text{m}$, 是逸出功, 取值为 $4.5\text{eV}^{[12]}$, E 是碳纳米管冷阴极表面场强. 根据公式(1)可知碳纳米管冷阴极的场致发射电流密度随表面场强 E 的增大而增大, 因此若要提高阴极的发射电流以增大电子注的电流, 可通过减小阴栅间距 D_{gc} 来实现. 但工程实际应用中阴栅间距不是越小越好, 其值必须满足在一个合适的范围, 因为间距过小后容易引起打火且工艺的实现难度也随着间距的减小而增大. 考虑到上述要求, 文中对阴栅间距分别为 0.75mm 、 0.5mm 和 0.25mm 的电子枪进行了对比仿真. 图3给出了射程 Z_m 和注腰半径 R_m 随阴栅间距 D_{gc} 变化的曲线图. 由图3可知, 在相同的栅网电压和阳极电压下, 阴栅间距为 0.5mm 时电子枪的射程最大、注腰半径最小, 其面积压缩比最大, 更利于获得目标电子注. 因此文中采用阴栅间距为 0.5mm 的电子枪, 并对其开展进一步的仿真研究.

另一方面为获得较大的注电流, 还可通过增大栅网电压以增强碳纳米管冷阴极的表面场强来实现. 同时仿真中发现栅网电压越高, 射程越大、注腰半径越小, 电子枪对电子注的聚束效果越好. 因此栅网电压应越大越好. 但栅网电压过高又会引起碳纳米管冷阴极的打火和枪区电子散射现象严重. 打火会影响碳纳米管冷阴极的场发射特性, 导致发射电流降低. 若长期的打火, 冷阴极表面的纳米碳管会逐渐的被烧毁, 使得阴极失去发射特性. 另一方面由于栅网的存在, 当电子注穿过栅网时必然出现散射现象, 电压过高, 电子穿过栅网后的初速度较大, 聚焦

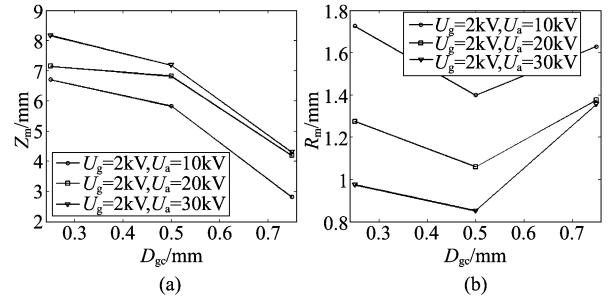


图3 (a) 射程 Z_m 和 (b) 注腰半径 R_m 随阴栅间距 D_{gc} 变化的曲线图

Fig. 3 (a) Z_m and (b) R_m as a function of the spacing between cathode and mesh grid (R_m is the beam waist radius, Z_m is the axial distance from anode to the point where beam radius is R_m)

极和阳极将难以束缚径向速度较大的电子, 造成枪区电子径向散射现象加剧, 降低电子枪的性能. 因此考虑到碳纳米管冷阴极的打火以及仿真中电子枪区的粒子散射情况, 文中确定栅网电压为 5kV . 图4给出了阴极发射电流和电子注穿过栅网后的注电流随栅网电压变化的曲线图, 由图4知当栅网电压为 5kV 时电子注的电流为 210mA , 此时阴极的发射电流密度为 $99\text{mA}/\text{cm}^2$.

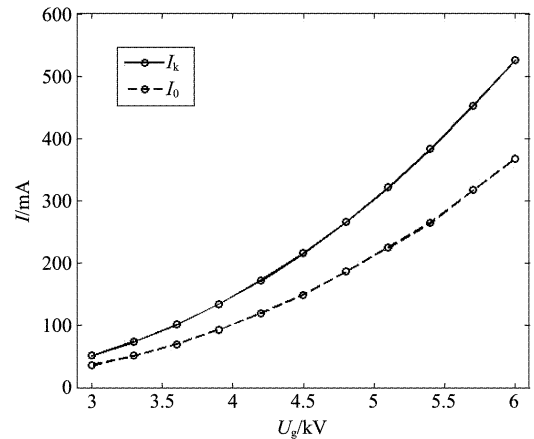


图4 阴极发射电流 I_k 和注电流 I_0 随栅网电压 U_g 变化的曲线图

Fig. 4 The emission current of cathode and the beam current as a function of mesh grid voltage

为获得高电流密度的电子注, 阳极的聚束作用不可忽略, 因此文中分析了阳极电压对注腰半径的影响. 图5给出了注腰半径随阳极电压 U_a 变化的曲线图, 由图5可知在阳极电压为 20kV 到 60kV 时, 注腰半径随阳极电压的增加成线性减小, 当阳极电压大于 60kV 后, 注腰半径的大小趋于稳定, 约为

0.6 mm. 考虑到注腰半径越小越利于实现较高的注电流密度以及较大阳极电压能获得更高的注功率这两个因素,文中确定阳极电压为 60 kV,此时电子注的注腰半径为 0.63 mm.

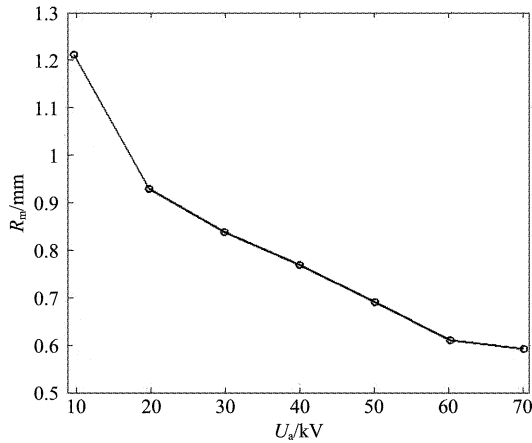


图 5 注腰半径 R_w 随阳极电压 U_a 变化的曲线图

Fig. 5 The waist beam radius as a function of anode voltage

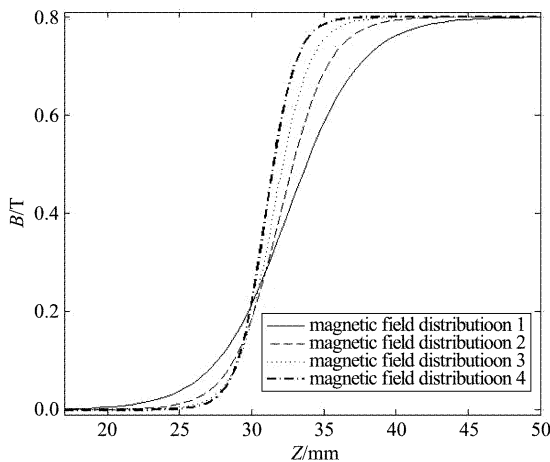


图 6 不同的轴向磁场随轴线的变化曲线图

Fig. 6 Different axial magnetic field profile on axis

电子注进入漂移区后,不再受外加电场力的作用,此时空间电荷力便占了主导作用.若不借助磁场的束缚,电子注便会在空间电荷力的作用达到最小截面后,开始向外发散,打向阳极壁,不可能获得目标电子注.因此文中针对外加磁场的幅值和轴向变化对电子注聚束的影响进行研究.仿真中发现若采用在注腰位置由 0 突变到 B_b 的理想磁场,磁场幅值为 0.5 T 时便可获得最大注半径为 1 mm 的电子注.但实际的磁场很难实现突变,必然存在一个缓慢变化的区域,导致注半径增大.根据实际磁场在轴向的分布情况,文中将磁场幅值增大到 0.8 T,采用轴

向变化如图 6 的 4 种磁场对电子注进行聚束,比较分析发现磁场在轴向变化的区域越短,电子注半径越小,当选择磁场 3 或 4 对电子注进行聚束时,可获得注半径小于等于 1 mm 的电子注.结合工程实际采用磁场 3 对电子注进行磁聚束,经过不断的优化,得到了电子注的轨迹及轴向速度如图 7 所示,电子注的性能参数如表 1 所示.由图 7 和表 1 可知优化后枪区的离散电子较少,电子注波动幅度较小,且电子注的轴向速度离散低至 0.7%.

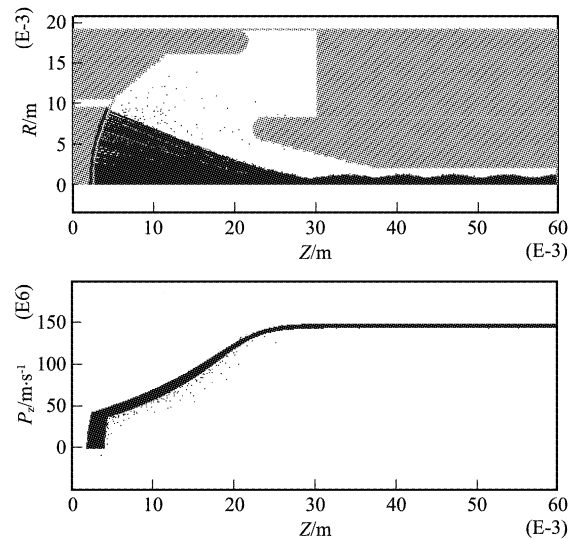


图 7 电子注的轨迹和轴向速度图

Fig. 7 Trajectories and axial velocity of electron beam

表 1 优化后电子注的性能参数

Table 1 Performance parameters of the electron beam

优化后电子注性能参数	
电子注的电流 I_0	210 mA
电子注的电压 U_0	60 kV
导流系数 P	$1.43 \times 10^{-2} \mu p$
射程 Z_m	7.3 mm
注腰半径 R_w	0.63 mm
面积压缩比 M^2	232
电子注的最大半径 R_{0m}	1 mm
波峰处电子注的电流密度 J_0	$6.7 A/cm^2$
电子注的脉动波长 λ	6.6 mm
电子注的脉动幅度 a	0.14 mm
电子注轴向速度离散 α	0.7%

3 结论

文中围绕着获得大电流、高电流密度的电子注为目标,对采用大面积碳纳米管冷阴极栅网结构的 Pierce 电子枪进行了研究.结合碳纳米管冷阴极场发射特性的实验测试数据,采用粒子模拟软件分析

(下转第 430 页)

量在不同探测单元格之间的分配随发射率角度分布的不同而改变。

(3) 提高法向发射率可显著增强目标中心所在像元红外信号强度,增大目标像元间红外信号对比度.反之,降低法向发射率则可降低目标中心所在像元红外信号强度,降低目标像元间红外信号对比度。

REFERENCES

- [1] PIETER A Jacobs. Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds [M]. 2nd^Edition, Washington, SPIE Press, 2006.
- [2] MAHULIKAR S P, SONAVANE H R, RAO G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, **43**(7-8), 218.
- [3] YILMAZ A, SHAFIQUE K, SHAH M. Target tracking in airborne forward looking infrared imagery [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(7), 623.
- [4] HUANG K, MAO X. Novel metric of relative characteris-

tics of small targets and backgrounds in infrared images [J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(10), 103202.

- [5] FEINSTEIN A. Foundations of information Theory [M]. New York, McGraw-Hill, 1958.
- [6] ZHAO Jia-Jia, TANG Zheng-Yuan, YANG Jie, et al. Infrared small target detection based on image sparse representation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵佳佳, 唐峥远, 杨杰等. 基于图像稀疏表示的红外小目标检测算法. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(2), 156.
- [7] GREFFET J J, CARMINATI R, JOULAIN k, et al. Coherent emission of light by thermal sources [J]. *Nature*, 2002, 416, 61.
- [8] Greffet J J. Applied physics controlled incandescence [J]. *Nature*, 2011, 478, 191.
- [9] DREVILLON J, BEN-ABDALLAH P. Ab initio design of coherent thermal sources [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **102**(11), 114305.
- [10] HUANG Yong, DONG Su-Jun, YANG Min, et al. Thermal emission characteristics of a graded index semitransparent medium [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, **92**(12-3), 110.

(上接 403 页)

了电子枪的阴栅间距、栅网电压、阳极电压、轴向磁场等重要参数.优化后的结果表明该电子光学系统在碳纳米管冷阴极发射电流密度为 99 mA/cm^2 时,能产生 210 mA 、 60 kV 、注电流密度为 6.7 A/cm^2 、最大注半径为 1 mm 的电子注.如果碳纳米管冷阴极的发射电流密度能够达到 1 A/cm^2 ,则该电子光学系统将能产生注电流大于 2 A 、注电流密度大于 60 A/cm^2 的电子注.这为下一步研制碳纳米管场致发射冷阴极毫米波电真空辐射源器件奠定了基础。

REFERENCES

- [1] DE HEER W A, CHATELAIN A, UGARTE D. A carbon nanotube field-Emission electron source [J]. *Science*, 1995, **270**(5239): 1179-1180.
- [2] BONARDJ M, MAIER F, STOCKLI T, et al. Field emission properties of multiwalled carbon nanotubes [J]. *Ultramicroscopy*, 1998, **73**(1): 7-15.
- [3] BAUGHMAN R H, ZAKHIDOV A A, DE HEER W A. Carbon nanotubes—the route toward applications [J]. *Science*, 2002, **297**(5582): 787-792.
- [4] ZHANG Yu, DENG Shao-Zhi, XU Ning-Sheng, et al. Fully sealed carbon nanotube flat-panel light source and its application as thin film transistor - liquid-crystal display backlight [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2008, **26**(3): 1033-1038.
- [5] ZHANG Yu, LIAO Mei-Xiang, DENG Shao-Zhi, et al. In situ oxygen-assisted field emission treatment for improving the uniformity of carbon nanotube pixel arrays and the underlying mechanism [J]. *Carbon*, 2011, **49**(10): 3299-3306.
- [6] CHEN Yi-Ming, ZHANG Hai-Yan, ZHU Qing-Feng, et al.

Synthesis of aligned carbon nanotubes array by radio frequency plasma-enhanced hot filament chemical vapor deposition [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈易明, 张海燕, 朱清锋, 等. 取向碳纳米管阵列的等离子体复合化学气相沉积法制备. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(6): 470-474.

- [7] YUAN Xue-Song, YAN Yang, LIU Sheng-Gang. Study on the dispersion relations of a relativistic annular electron beam guided by a finite axial magnetic field [J]. *Acta Phys. Sin.* (袁学松, 鄢扬, 刘盛纲. 有限引导磁场下相对论环形电子注色散特性的研究. *物理学报*), 2011, **60**(1): 212-218.
- [8] SHIFFLER D, ZHOU O, BOWER C, et al. A high-current, large-area, carbon nanotube cathode [J]. 2004, *Ieee Transactions On Plasma Science* **32**(5): 2152-2154.
- [9] SHEN Yi, ZHANG Huang, XIA Lian-Sheng, et al. Research on intense pulsed emission of carbon nanotube cathode [J]. *Acta Phys. Sin.* (谌怡, 张篁, 夏连胜, 等. 碳纳米管阴极强流脉冲发射放气特性研究. *物理学报*), 2011, **61**(7): 072901-1-072901-7.
- [10] YUAN Xue-Song, ZHANG Yu, SUN Li-Min, et al. Study of pulsed field emission characteristics and simulation models of carbon nanotube cold cathodes [J]. *Acta Phys. Sin.* (袁学松, 张宇, 孙利民, 等. 碳纳米管冷阴极脉冲发射特性及仿真模型研究. *物理学报*), 2012, **61**(21): 216101-1-7.
- [11] ELECTRON TUBE DESIGN HANDBOOK COMPILING COMMITTEES. *A handbook for design of electron optics system in microwave tube* [M]. Beijing: National defense industry press (电子管设计手册编辑委员会. *微波管电子光学系统设计手册*, 北京: 国防工业出版社), 1981: 57-157.
- [12] ZHONG Ding-Yong, ZHANG Guang-Yu, LIU Shuang, et al. Universal field-emission model for carbon nanotubes on a metal tip [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(3): 506-508.