

文章编号: 2095-4980(2014)03-0339-06

碳纳米管冷阴极电子枪的电子光学设计

刘京¹, 陈心全¹, 王琦龙¹, 狄云松^{1,2}, 崔云康^{1,3}, 张晓兵¹, 赵健¹, 黄倩倩¹

(1.东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2.南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097;
3.南京工程学院 基础部, 江苏 南京 211167)

摘要: 基于皮尔斯电子枪设计理论, 提出了一种碳纳米管场致发射阴极电子枪的电子光学设计方案。电子枪阴极半径为 0.5 mm, 保持阴阳极电压不变, 动态调整栅极电压, 并利用计算机技术仿真软件(CST)对其进行仿真优化研究; 结果表明, 栅极最佳电压值为 -14 kV, 对应阴极发射电流为 15.08 mA, 阳极处电子束半径约为 0.1 mm。研究为碳纳米管冷阴极栅极结构的设计提供了一种新的思路。

关键词: 碳纳米管; 场致发射; 电子枪; 电子光学

中图分类号: TN102; O462.4

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201403.0339

Electron optical design of cold cathode based on carbon nanotubes

LIU Jing¹, CHEN Xin-quan¹, WANG Qi-long¹, DI Yun-song^{1,2}, CUI Yun-kang^{1,3}, ZHANG Xiao-bing¹,
ZHAO Jian¹, HUANG Qian-qian¹

(1.Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China; 2.School of Physics, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210097, China; 3.Department of Basic Courses, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu 211167, China)

Abstract: A new design of a Carbon Nanotube(CNT) cathode electron-gun is put forward based on Pierce-gun theory. With a radius of 0.5 mm for electron-gun, and keeping the cathode-anode voltage a constant, the gate voltage is regulated dynamically. The simulation and optimization are performed by using particle-studio modulation in Computer Simulation Technology(CST). The results indicate that: corresponding to the best gate voltage of 14 kV, a total cathode current of 15.08 mA is obtained; and the waist radius is about 0.1 mm. This fundamental research has laid a foundation for subsequent design and production.

Key words: carbon nanotubes; field-emission; electron-gun; electron optics

微波真空电子器件作为最重要的真空电子器件之一, 被广泛应用于微波电子系统中, 并且在可以预见的未来20~30年中, 以行波管、速调管、磁控管和回旋管等为代表的微波真空电子器件, 将仍然是军事装备中最重要的核心器件之一^[1]。电子枪作为微波真空电子器件的核心部件, 其发射电子注的质量很大程度上决定了器件性能的优劣。传统的微波管主要采用的是热阴极电子枪, 限制了器件向微型化和集成化方向的发展; 与传统的热阴极相比, 场致发射阴极具有体积小^[2]、瞬时启动、电流密度大和室温工作等优点, 因而备受关注^[3], 其中半导体或金属微尖阵列阴极已取得了一系列成果^[4-6], 但是其加工难度大, 成本高, 因此至今仍未获得广泛应用。碳纳米管^[7]场致发射阴极以其易加工、制备成本低、阈值场强低、发射电流密度大和使用寿命长等诸多优点而倍受青睐, 并且已取得一系列重要进展^[2,8-9]。

为实现碳纳米管场致发射阴极在真空微波功率器件中的应用, 本文在前期研究^[3,10-14]的基础上, 根据皮尔斯电子枪设计理论^[15], 利用 CST 软件对碳纳米管场致发射阴极电子枪进行了初步电子光学设计与研究。

1 设计与仿真

1.1 皮尔斯电子枪

所有线性注微波管电子枪的工作原理几乎相同, 且大部分为皮尔斯电子枪, 其主要差别在于不同功率要求下

收稿日期: 2013-11-22; 修回日期: 2014-01-24

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科技基金资助项目(CAEP THZ201203); 国家自然科学基金资助项目(51002031, 61007036, 61101023)

电子枪的尺寸、工作电压和发射电流存在差异。在微波管中,电子枪用于产生适于与微波电路互作用的电子注,主要由阴极、控制电极(聚焦极或控制极)和阳极等几部分组成,是微波器件的核心部件。皮尔斯电子枪的结构示意图见图 1。

由于本实验中碳纳米管场致发射阴极为平板阴极,所以这里仅讨论平板阴极形成电子注的情况。如图 2 所示,当不存在电子时,平板二极管中的等位线是平行的,且对于相等的电压增量,间隔相等,对应图中虚线;当大量电子存在时,等位线发生右偏,对应图中的实线。当电子离开阴极后,由于电子的相互排斥作用,电子轨迹呈发散状。

根据以上分析,假如靠近阴极的电极向阳极倾斜一定的角度,如图 3 所示,等位线将被拉直;而不存在电子时,等位线将向阴极弯曲。Pierce 表明,与电子注边缘成 67.5° 角,且处于阴极电位的平板电极,与处于阳极电位 V_a 的曲面电极,可形成平行电子流,如图 3 所示。与电子注边缘成 67.5° 角的电极称为皮尔斯电极, 67.5° 角称为皮尔斯角。

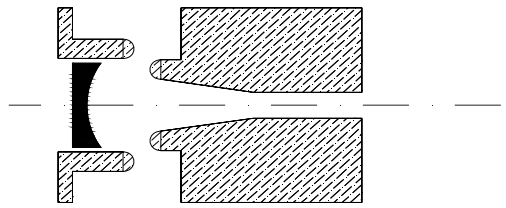


Fig.1 Schematic diagram of Pierce-gun
图 1 皮尔斯电子枪示意图

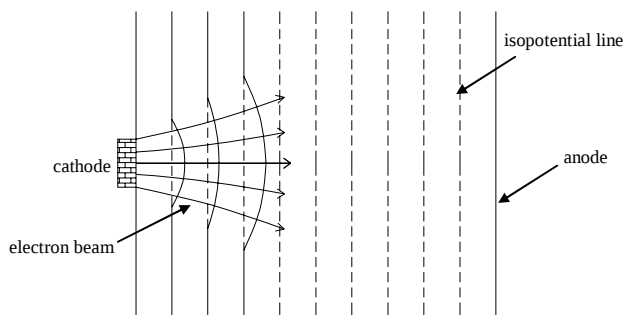


Fig.2 Space-charge effect to the isopotential line
图 2 不存在电子(虚线)和存在电子(实线)的等位线

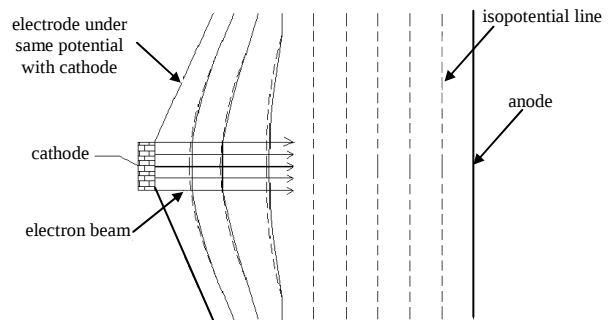


Fig.3 Stretching of the isopotential line
图 3 将电子注中等位线伸直的示意图

1.2 碳纳米管场致发射阴极模型的建立

在 CST 仿真模拟中,粒子源模型选择 Field-induced 模型,其遵循经典 F-N 公式^[16-17],对应发射电流密度的具体解析表达式为:

$$J = aE^2 \exp(-bE) \quad (1)$$

式中: J 为电流密度; E 为阴极表面的电场强度; a 为场致发射阴极场致发射线性因子,单位为 A/V^2 ; b 为指数因子,单位为 V/m 。由于不同的 a, b 参数对应不同的场致发射曲线,所以模拟仿真中,通过调整 a, b 参数的值来具体确定不同的发射源。在仿真实验前,根据前期直流二极管测试结果^[3]计算得到 a, b 参数,求解过程如下:

$$\ln(J/E^2) = \ln a - bE \quad (2)$$

在已知 J, E 参数的情况下,可利用实验数据对参数 $\ln a$ 以及参数 b 作线性拟合,求得,

$$\ln a = 8.84, b = 3.3104 \times 10^7 \quad (3)$$

进而求得,

$$a = 1.4482 \times 10^{-4}, b = 3.3104 \times 10^7 \quad (4)$$

对应的电场强度 $E = 2.9 \times 10^6 V/m \sim 3.0 \times 10^6 V/m$, 最大电流密度为 $2.1 A/m^2$ 。由于该组参数由实验数据拟合而来,在实际的仿真过程中由其得到的发射电流密度可能与实际实验有一定的误差,因此在具体仿真过程中可以对二者进行微调,以与实际情况尽可能吻合。

在具体确定了阴极发射模型及其参数后,根据直流二极管测试结果,得到电子枪具体结构,如图 4、图 5 所示,阴极半径 $r = 0.5 mm$, 聚焦极边缘与阴极平面法向夹角为 67.5° , 栅极处于二极管测试结构中阳极的位置。

根据实验,在仿真中设置阳极电压(U_{a2})为 $0 V$, 阴极电压(U_c)为 $-20 kV$, 栅极电压(U_{a1})初始值为 $-13.5 kV$ 。仿真过程中保持阳极电压(U_{a2})和阴极电压(U_c)不变,动态调整栅极电压(U_{a1}),以观察其对阴极发射电流大小和电子注注形的影响。

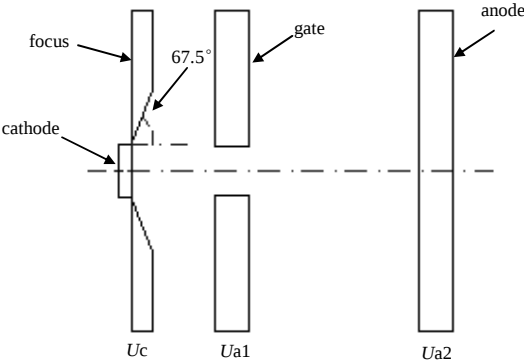


Fig.4 Plane sketch
图 4 平面二维结构示意图

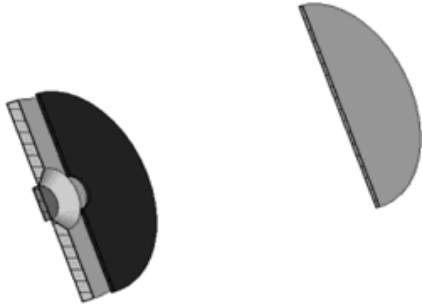


Fig.5 Profile map of electron gun
图 5 碳纳米管场致发射电子枪三维剖面图

2 实验结果及分析

2.1 调制特性分析

由于阴阳极之间采用负压供电,阴极电压为-20 kV,碳纳米管阴极属于边缘发射,对于中心的场强要求更高,那么不妨取栅极电压为-18 kV,-17 kV,-16 kV,-15 kV,-14.5 kV,-14 kV,对电子源中心点做静电仿真,得到中心场强,如表 1、图 6 所示。

由于碳纳米管场致发射阴极要求完全开启时表面场强须达到 3×10^6 数量级,而碳纳米管为边缘发射,边缘由于场增强效应的影响,其电场强度大于中心部分,故考察中心场强大于 3×10^6 V/m 时,可以确定为完全开启状态,小于 1.5×10^6 V/m 时则基本处于关闭状态。

表1 不同栅极电压下的电子源表面场强

Table1 Surface <i>E</i> -field under different gate voltage						
<i>V_g</i> /kV	-18	-17	-16	-15	-14.5	-14
<i>E_{surface}</i> /(V·m ⁻¹)	-6.57×10^5	-1.15×10^6	-1.31×10^6	-2.62×10^6	-3.27×10^6	-3.95×10^6

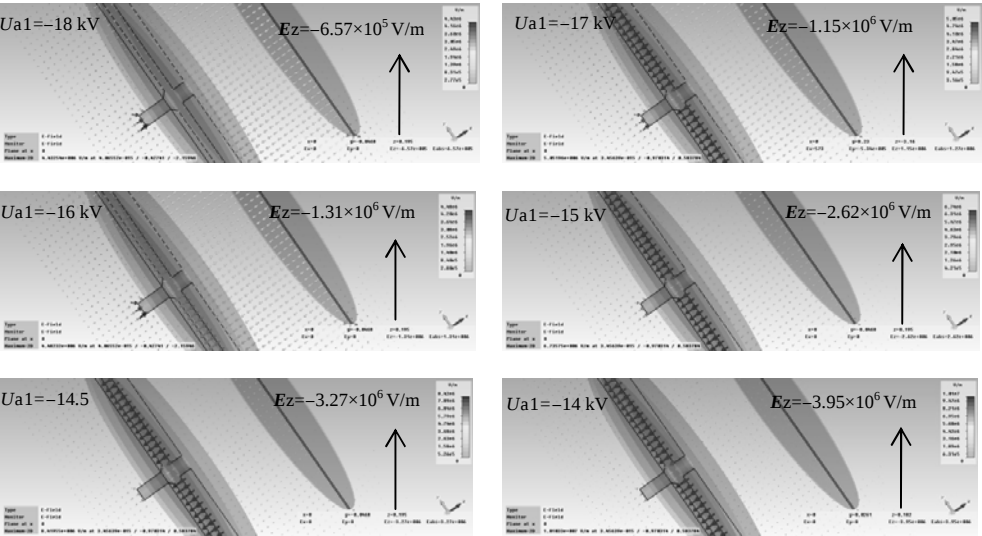


Fig.6 Results of *E*-static solver for surface *E*-field
图 6 表面电场的静电仿真结果

2.2 最佳栅压的选取

由上节分析可以确定最佳栅压应当在-14 kV~-16 kV 之间,那么不妨以 0.5 kV 为步进,分析电子注的包迹图。不同栅极电压下电子注的包迹线见图 7,纵轴表示电子注半径,横轴为电子注轴向距离阴极的距离,单位均为米(m)。

从图 7 可以看出,随着栅极与阳极之间电压差的减小,透过栅极后的电子注整体呈发散的趋势,当二者之间电压差为-13.5 kV 时,电子注发散角最大;但是,栅极和阳极之间电子注的包迹并不是绝对随着二者电势差的减

小而呈发散趋势,当阳极—栅极电压差为 14.5 kV 时,后期电子注的发散角大于电压差为 14 kV 和 15 kV 时,即栅极电压存在一个最佳值。由以上分析和图 7 可以初步得到栅极的最佳取值存在于-16 kV,-15.5 kV, -15 kV 和-14 kV 之间。

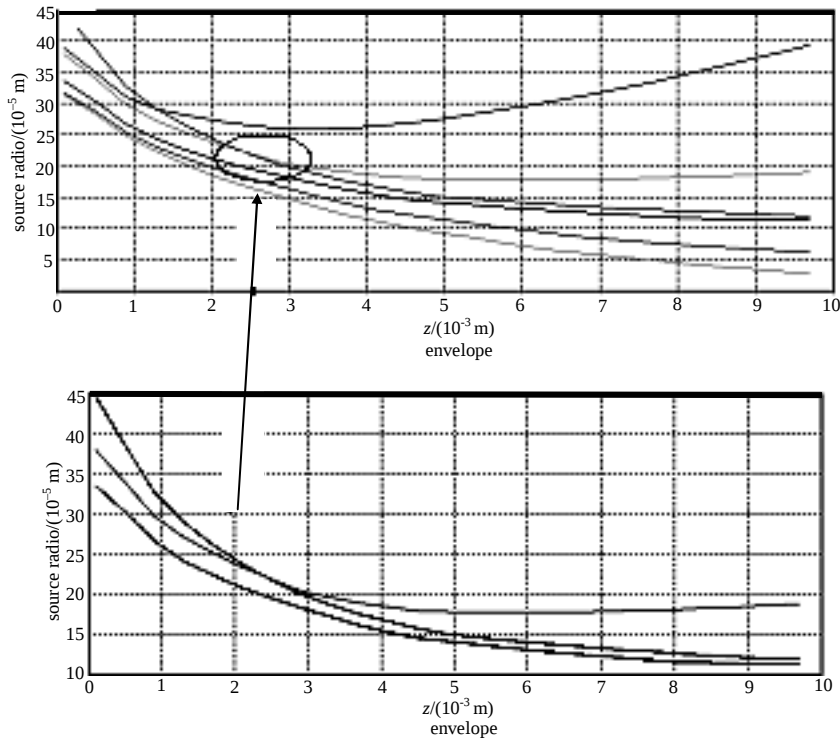


Fig.7 Envelope of electron beams under different gate voltages
图7 不同栅极电压下电子注的包迹图

在上述分析的基础上,由图 8~图 9 可得,当栅极电压为-14 kV 时,阴极发射电流为 15.08 mA,对应电流密度约为 2.01 A/cm^2 ,阴极边缘场强为 $1.92 \times 10^6 \text{ V/m}$,中心处场强为 $3.46 \times 10^6 \text{ V/m}$,与实测数据基本相符;当栅极电压为-16 kV,-15.5 kV 和-15 kV 时,测得阴极表面中心处电场强度远大于 $3.46 \times 10^6 \text{ V/m}$,这也与实际实验中的测试环境有较大出入,所以排除以上 3 个电压值。同时电子枪内的电势分布和电子束分别如图 10(a)、(b)所示,图 10(c)、(d)、(e)分别为距阴极表面 0.1 mm,4.5 mm,9.3 mm 处电子束的横截面,可以求得阴极表面附近电子束直径约为 1 mm,由于聚焦电极的作用电子束被迅速压缩,在轴向距阴极表面 4.5 mm 时,电子束直径约为 0.3 mm,在轴向 9.3 mm 处接近阳极表面时,电子束直径约为 0.2 mm。

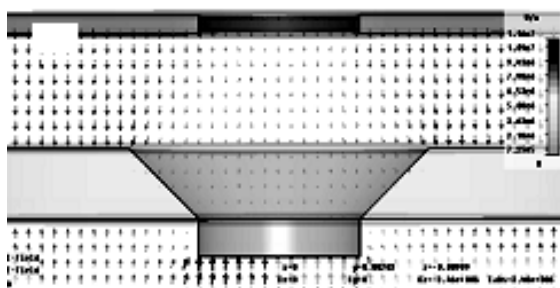


Fig.8 Electric field distribution
图8 阴极、聚焦极与栅极之间电场分布

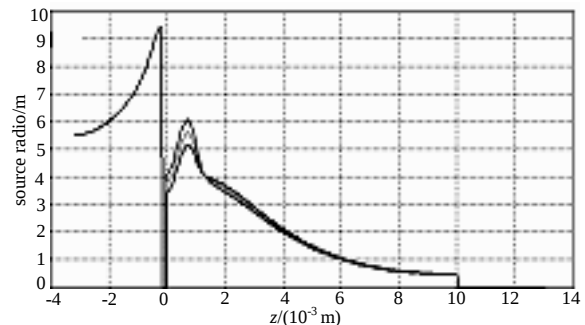


Fig.9 Electric field distribution of axial direction under different gate voltages
图9 栅极电压分别为-14 kV,-14.5 kV 和-15 kV 时电子注轴向的场强分布

综合以上分析,在保持阴极电压和阳极电压不变的情况下,当栅极为-14 kV 时,该电子枪达到了较好的聚焦效果,且发射电流与实际二极管结构中所得基本相符,于是可得该电子枪栅极最佳电压值约为-14 kV。研究

结果表明该电子枪结构已初步达到了设计要求。

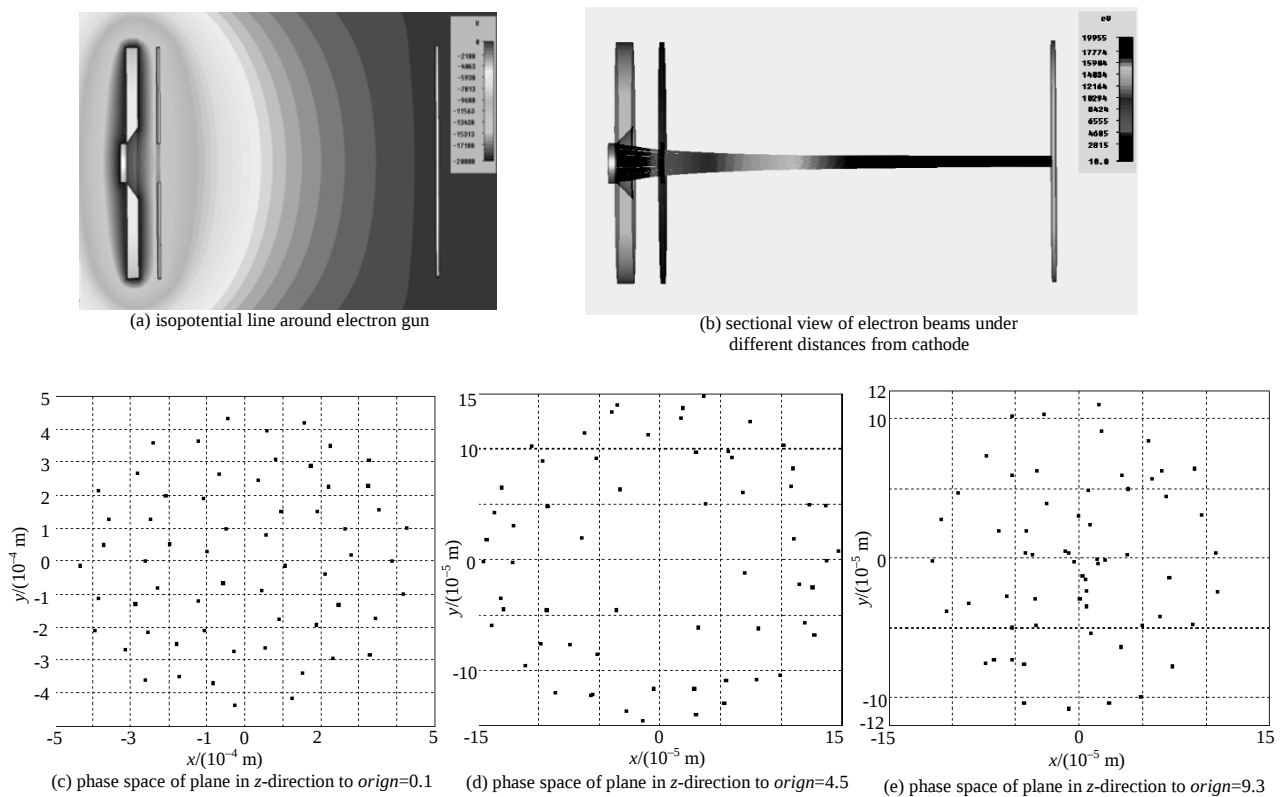


Fig.10 Isopotential line around electron gun and Particle Monitors under different distances to the cathode

图 10 电子枪周围的电势分布以及不同截面下的电子束束斑

3 结论

本文在前期二极管结构碳纳米管场致发射阴极实验的基础上,依据 Pierce 电子枪理论,初步设计得到了碳纳米管场致发射阴极电子枪,并利用 CST 软件对该结构进行了电子光学研究,获得了较好的电子束预聚焦效果,并初步确定了在阴极半径为 0.5 mm,电压为-20 kV,同时阳极接地情况下栅极的最佳电压约为-14 kV。这项研究为传统栅极结构的改进提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] 廖复疆. 大功率微波真空电子学技术进展[J]. 电子学报, 2006,34(3):513-516. (LIAO Fu-jiang. High-power microwave vacuum electronics technology progress[J]. Acta Electronica Sinica, 2006,34(3):513-516.)
- [2] Ulisse G, Ciceroni C, Brunetti F, et al. Carbon nanotubes electron source: Vacuum Electronics Conference (IVEC)[C]// 2013 IEEE 14th International. Paris, France: [s.n.], 2013:21-23.
- [3] 陈心全, 王琦龙, 崔云康, 等. 大电流密度场致发射阴极的获得及其特性分析[C]// 中国电子学会真空电子学分会第十九届学术年会. 中国安徽, 黄山: [s.n.], 2013:244-247. (CHEN Xin-quan, WANG Qi-long, CUI Yun Kang. High current density and characteristics of field emission cathodes obtained Analysis[C]// Nineteenth Annual Conference of Vacuum Electron Branch, Chinese Institute of Electronics. Huangshan, Anhui, China: [s.n.], 2013:244-247.)
- [4] 廖复疆. 真空微电子和微真空电子器件技术进展[C]// 中国电子学会真空电子学分会第十四届年会. 中国北京: [s.n.], 2004:86-89. (LIAO Fu-jiang. Vacuum microelectronics and micro-vacuum electron device technology progress[C]// Fourteenth Annual Conference of Vacuum Electron Branch, Chinese Institute of Electronics. Beijing, China: [s.n.], 2004:86-89.)
- [5] Whaley D, Duggal R, Armstrong C, et al. High average power field emitter cathode and testbed for X/Ku-band cold cathode TWT[C]// 2013 IEEE 14th International. Paris, France: [s.n.], 2013:1-2.
- [6] Whaley D R, Gannon B M, Smith C R, et al. Application of field emitter arrays to microwave power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000,28(3):727-747.
- [7] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. Nature, 1991,354(7):56-58.

- [8] Ulisse G, Brunetti F, Tamburri E, et al. Carbon Nanotube Cathodes for Electron Gun[J]. Electron Device Letters, IEEE, 2013, 34(5):698–700.
- [9] SUN Q, LIN G, DAI Z, et al. Preliminary study of electron gun based on field emission of carbon nanotubes[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2007, 31(3):296–299.
- [10] 陈心全, 王琦龙, 崔云康, 等. 冷壁法制备大发射电流密度复合阴极及其性能研究[C]// 中国真空学会2012学术年会. 甘肃, 兰州:[s.n.], 2012. (CHEN Xin-quan, WANG Qi-long, CUI Yun-Kang, et al. Cold-wall preparation of large emission current density and properties of the composite cathode[C]// Chinese Vacuum Society 2012 Annual Conference. Lanzhou, Gansu, China:[s.n.], 2012.)
- [11] 高峰. 冷壁法制备碳纳米管及其场发射特性的研究[D]. 南京:东南大学, 2012. (GAO Feng. Prepared cold-wall carbon nanotubes and their field emission properties[D]. Nanjing, Jiangsu, China:Southeast University, 2012.)
- [12] 李驰. 定向碳纳米管阵列的结构设计与场发射性能研究[D]. 南京:东南大学, 2011. (LI Chi. Performance of structural design and field emission aligned carbon nanotube array[D]. Nanjing, Jiangsu, China:Southeast University, 2011.)
- [13] 狄云松. 场发射显示器的阴极分析与结构设计[D]. 南京:东南大学, 2009. (DI Yun-Song. Cathode field emission display analysis and structural design[D]. Nanjing, Jiangsu, China:Southeast University, 2009.)
- [14] 王琦龙. 新型低压驱动碳纳米管场致发射显示的研究[D]. 南京:东南大学, 2005. (WANG Qi-long. Carbon nanotube field emission display of research on new low-voltage drive[D]. Nanjing, Jiangsu, China:Southeast University, 2005.)
- [15] 张芳, 董志伟. 0.22 THz 微电真空折叠波导行波管的聚焦磁场研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(4):522–526. (ZHANG Fang, DONG Zhi-wei. Focusing magnetic field research on 0.22 THz micro-electric vacuum folded waveguide TWT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(4):522–526.)
- [16] Stern T E, Gossling B S, Fowler R H. Further studies in the emission of electrons from cold metals[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1929, 124(795):699–723.
- [17] Fowler R H, Nordheim L W. Electron emission in intense electric fields[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1928, 119(781):173–181.

作者简介:



刘京(1991–), 男, 江苏省盐城市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为冷阴极材料及器件. email:jessrabbit@foxmail.com.

陈心全(1988–), 男, 山东省菏泽市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为冷阴极材料及器件.

王琦龙(1976–), 男, 江苏省淮安市人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为冷阴极材料及器件.

崔云康(1977–), 男, 江苏省溧阳市人, 博士, 主要研究方向为纳米光电材料及器件.

赵健(1989–), 男, 山东省枣庄市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为物理电子学.

黄倩倩(1991–), 女, 江苏省启东市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为物理电子学.

狄云松(1979–), 男, 江苏省溧阳市人, 博士, 主要研究方向为真空纳米电子技术及器件, 已发表论文18篇, 其中SCI 3篇.

张晓兵(1968–), 男, 浙江省温州市人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为电真空器件与质谱检测技术, 目前主持和参与多项国家自然科学基金、科技部 973、863 课题和省部级课题, 发表论文 50 余篇, 申请和获得发明专利授权近 20 项.