

文章编号: 2095-4980(2016)01-0148-08

冷阴极技术及其在大功率真空电子器件中的应用

于彩茹¹, 刘京¹, 王琦龙^{1*}, 狄云松^{1,2}, 朱卓娅¹, 张晓兵¹, 雷威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)

摘要: 场致发射阴极作为重要的电子源之一, 在真空电子器件的发展进程中扮演了重要的角色。在与固态器件的竞争中, 真空电子器件朝大功率高频方向持续发展, 场致发射阴极的应用使其在器件尺寸、可靠性、功耗和工作频率等方面具备了较大的改进空间。本文综述了近年来大电流场致发射阴极技术进展, 特别介绍了碳纳米管场致发射阴极的发展。试验表明在直流测试条件下, 该类型场致发射阴极发射电流密度已可达到 A/cm^2 量级, 且可以实现长寿命高稳定发射, 未来在场致发射阴极微波放大器、自由电子激光器和新型中子源等方面将有广泛的应用前景。

关键词: 场致发射阴极; 碳纳米管; 大功率; 真空电子

中图分类号: TN146^{+.2}

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0148

Cold cathode technology and its application in high-power vacuum electronic devices

YU Cairu¹, LIU Jing¹, WANG Qilong^{1*}, DI Yunsong^{1,2}, ZHU Zhuoya¹, ZHANG Xiaobing¹, LEI Wei¹

(1.Development of Electron Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2.School of Physics, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210097, China)

Abstract: Field emission cathode plays an important role in the development of vacuum electron devices. In competition with solid-state devices, vacuum electron devices develop sustainably towards high frequency and high power. Field emission cathodes make it more practical to improve the size, the reliability, the power consumption and the operating frequency, etc. This article reviews the recent development of the high-current-density field emission cathodes. Especially, experimental results show that the emission current density of carbon nanotube field emission cathode is up to A/cm^2 stably during a long time, which confirms the possibility to realize the applications in field emission microwave amplifier, free electron lasers and novel neutron source.

Key words: field emission cathodes; carbon nanotubes; high power; vacuum electron

真空电子器件自诞生以来, 已历经了百余年的发展历程, 对近现代科技的进步, 尤其是国防科技有着重大贡献。但自20世纪60年代以来, 半导体产业与集成电路技术的飞速发展使得真空器件在相当多的电子信息应用系统中失去了主导地位, 并逐步被固态电子器件所取代^[1]。尽管固态功率器件不断发展, 但是包括GaAs在内的半导体器件目前在能量效率、最大功率、工作频率、可靠性方面仍存在大量不足, 以GaN器件为代表的新型半导体器件仍不成熟, 目前也不具有完全克服固态器件弊端的可能性^[2]。固态器件在高频大功率方面的发展受限主要因为: a) 电子在固态电子器件内的运动为非弹道输运, 载流子速率远不如在真空中的电子速率; b) 半导体器件的工作电压受到材料击穿电压的限制, 大功率固态器件的工艺难度较大, 且在大功率应用中其器件优势, 如尺寸、功耗等并不突出; c) 大功率应用方面, 真空电子器件中的电子注能量可以被回收, 效率比固态器件更高。除此之外, 强辐射、高温等因素也限制了固态器件在高频、大功率、高辐射等极限条件下的应用。在国防、航天等尖端科技领域, 真空电子器件仍将被广泛应用并有所发展。美国国防部先进计划管理局(DARPA)就曾强调在2030年之前仍将真空电子器件作为军用装备的核心部件, 可见这种技术仍然值得发展, 甚至在2030年之后仍具有很大发展潜

收稿日期: 2015-06-02; 修回日期: 2015-06-24

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科技基金资助项目(CAEPHTZ201203); 国家自然科学基金资助项目(51120125001)

*通信作者: 王琦龙 northrockwql@seu.edu.cn

力。我国的自然科学基金、欧洲的OPTHER计划等都含有对真空电子器件的重要研究项目^[3-4]。

目前真空电子器件正向高功率、高频率、高可靠性、高效率和小型化的方向发展^[5],这对在与微波小信号相互作用过程中将电源能量转变成高频振荡能量的电子注提出了更高的要求。电子注质量一定程度上决定了电真空器件的效率、增益、噪声特性和工作稳定性等关键参数。

真空电子器件中,电子注来自于电子源,目前有 4 种获得方式:a) 热电子发射;b) 光电子发射;c) 二次电子发射;d) 场致电子发射。场致发射电子作为一种新型电子源,具备电流密度高、瞬时开启、单色性、稳定性好和功率密度大等特点,可实现高相干性和高亮度电子源,极具研究开发前景。

1 阴极概述

真空电子器件中,电子束把能量转化给微波,微波得到激励放大,才能够输出微波功率。因此要产生高功率微波的关键技术就是产生高功率的电子束。电子束的功率就是电压和电流的乘积,因而可以从 2 个方面来提高微波功率:提高电子注的电压或提高电子注的电流。阴极作为发射电子注的载体,其电流密度、寿命、易用性、功率以及制造成本等都是阴极技术需要考虑的主要问题。

现有阴极技术大致可分为氧化物阴极、钨钨阴极、光电阴极、次级发射体和场致发射阴极等^[6],在航天电推进器、显示器件、X 射线管以及功率微波放大器等有广泛的应用^[7-9],在传统的真空电子器件中,热阴极一直以来被广泛采用。

回顾微波真空电子器件的发展历程,自 1937 年产出第一支速调管之后,磁控管、行波管、返波振荡管等在第二次世界大战期间得到迅速发展^[10-11];20 世纪 60 年代以后,脉冲技术的成功引入,使考虑相对论理论电子束技术得到迅速发展;至今,回旋管、自由电子激光器、虚阴极振荡器、填充等离子体的相对论微波器件、快速光导开关等微波真空电子器件相继发展。上述微波真空电子器件多采用热阴极作为电子发射源^[12]。热阴极能够输出寿命长且稳定性可靠的空间电荷限制流,产生的电子束重复性较好,并在一定的温度条件下,材料的逸出功越低,获得的电流密度就越高。但热阴极也存在显著缺点,如阴极及电子枪系统工作温度极高,对阴极组件的耐热性提出了很高的要求,导致成本高,且结构较为复杂;高温工作环境极易导致热子灯丝的断裂或短路,器件易损坏且寿命短;阴极系统启动时间长,即需要较长的时间才能达到额定工作温度,这使得它在特种设备上的使用受限。

2 以 Spindt 阴极为代表的阵列型场致发射阴极

相比于热阴极,由于场致发射阴极不需要加热,可室温工作,大幅简化了阴极的结构,并且启动速度显著加快。场致发射阴极,电子在强电场的作用下,隧穿金属或半导体的表面势垒进入真空中。主要代表为 Spindt 型阴极,具有室温工作,瞬时启动和电流密度大等优点。

1973 年 Spindt 等提出并成功制备了阵列型场致发射阴极^[13-15],其后被广泛应用于场致发射显示、微波放大器和 X 射线源等方面,如图 1 所示。随着薄膜技术和现代微纳加工工艺的进步,Spindt 阵列阴极有了较大的发展,Makishimia 等人成功地将该类型阴极应用于行波管中,实现了 10.5 GHz 的微波信号放大,对应输出功率为 27.5 W,增益为 22 dB^[16]。2000 年,美国 Northrop 公司研制的 C 波段行波管采用了金属钼微尖阵列,在 4.5 GHz 频段时输出功率 55 W,饱和增益 23 dB^[17]。2009 年,美国 L-3 通信公司(L-3 Company)和斯坦福研究院(Stanford Research Institute, SRI)合作设计组装完成了一个基于钼微尖阵列阴极的低压高跨导 C 波段行波管,实现了 5 GHz 频段内的 100 W 功率输出,电子束电流 121 mA,阴极电流密度可达 15.4 A/cm²,工作电压可低至 100 V 以下^[18]。2013 年,美国 L-3 Company 和 SRI 在此基础上合作设计组装了一个 X/Ku 波段行波管,在 6 GHz~18 GHz 波段中

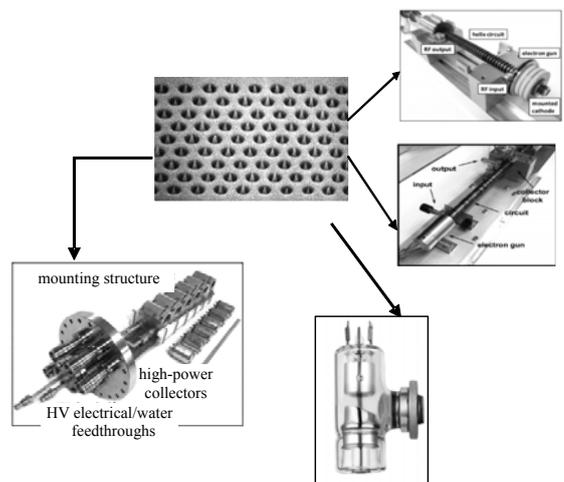


Fig.1 Field emission cathode of Spindt type and its applications
图 1 Spindt 型场致发射阴极及其应用

可以获得射频增益和功率输出, 最大电流可达 200 mA; 在发射电流为 50 mA 时, 可在 10 GHz 频段下输出 10 W 功率并获得 13.5 dB 增益^[19], 如图 2 所示, 其采用的阴极由 6 个独立的 Spindt 阵列阴极组合而成, 在水冷条件下进行了超过 100 h 的测试, 测试电流可达 100 mA。同样, 在 X 射线管中采用场致发射电子源, 可以获得较高的空间分辨力和对比度, 有望在微型化的电子计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)中使用^[19]。

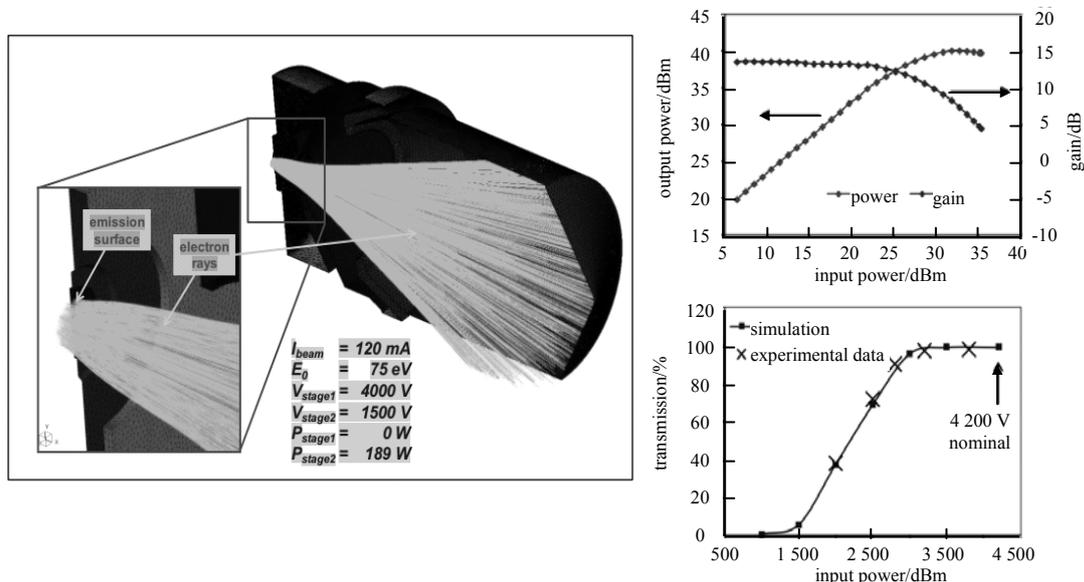


Fig.2 Test results of X/Ku-band traveling wave tube developed by L-3 company and SRI in 2013
图 2 2013 年 L-3 Company 和 SRI 合作研制 X/Ku 波段行波管测试结果

表 1 所示分别为斯坦福研究院、麻省理工学院、北卡罗来纳微电子中心制备的阵列型微尖的发射性能。斯坦福研究院制备的钼阵列型阴极微尖, 微尖密度和微尖数目分别为 $10\ 000$ 和 $1.3 \times 10^6/\text{cm}^2$, 在直流测试条件下, 最大发射电流可达 180 mA(电流密度 $23\ \text{A}/\text{cm}^2$); 麻省理工学院制备的钼阵列型阴极微尖, 脉冲测试条件下, 最大发射电流可达 22 mA(电流密度为 $310\ \text{A}/\text{cm}^2$); 北卡罗来纳微电子中心制备的硅阵列型阴极微尖, 直流测试条件下, 最大发射电流为 21.25 mA(电流密度 $2.1\ \text{A}/\text{cm}^2$)^[20]。

表 1 阵列型场致发射体的发射性能
Table1 Field-emission data from large arrays of field emitters

FEA material	organization	No. of Tips	Tips/cm ²	max current/mA	current density/(A·cm ⁻²)
Mo	SRI	10 000	1.3×10^6	180(DC)	23
Mo	MIT	6 000	10^9	15(pulsed)	2 400
Mo	MIT	70 300	10^9	22(pulsed)	310
Si	MCNC	3 300	3×10^6	6(DC)	6
Si	MCNC	28 074	3×10^6	21.5(DC)	2.1

然而, Spindt 型场致发射阴极在实用化的过程中仍暴露出较多的瓶颈, 如为降低开启电场, 阴极阵列中发射体需要足够纤细, 在大电流发射条件下, 阴极温度上升较快, 真空中电子发射产生的热量难以迅速传导, 易导致发射体熔化变形; 另外, Spindt 型阴极的有效发射面积非常小, 很难进一步提高发射电流; 该类型阴极大量采用微纳加工工艺, 加工难度大, 成本高。此外, 对于传统材料阴极来说, 它们具有较高的功函数, 电子从这些材料制成的尖锥中发射出来时所需要的控制电压就相对较高, 因此寻找一种容易加工的新材料就显得尤为重要。在新型场致发射阴极材料的探索中, 金刚石薄膜、一维碳纤维、表面传导发射材料等一度成为研究的热点, 工艺多采用常见的化学气相沉积法(Chemical Vapor Deposition, CVD)、激光烧蚀法和真空镀膜工艺等, 制造成本相对较低。但工艺流程仍然较复杂, 并且阴极材料性能较 Spindt 型场致发射阴极并没有很大的提高, 因此没有得到广泛的市场认可。随着大面积均匀场致发射材料和丝网印刷工艺的大量采用, 碳纳米管场致发射阴极逐渐成为研究的热点, 器件材料制备过程大量采用厚膜工艺, 制造流程大大简化, 成本急剧降低, 并且理化特性相对稳定, 对器件的真空度要求不高, 使得器件的可靠性和寿命大大提高。进一步的研究结果表明: 碳纳米管具有低场致发射开启电场和高场致发射电流密度, 并且具有很好的发射稳定性, 所以碳纳米管场致发射阴极被认为是 Spindt 型场致发射阴极的最佳替代者, 逐渐成为当今的研究热点。

3 碳纳米管场致发射阴极

1991 年，日本 NEC 公司的 S IJIMA^[21] 首先发现了多壁碳纳米管(Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)，如图 3 所示，其为由碳原子组成的同轴多层福勒管，与石墨、金刚石、C60 和无定形碳一样为碳的同素异形体。1993 年 S IJIMA 和 D S BETHUNE 几乎同时宣布发现了单壁碳纳米管(Single Walled Carbon Nanotube, SWCNT)^[22-23]。碳纳米管可以看作是石墨烯按照确定矢量方向卷曲而成的空心圆柱，其成键方式主要是 sp^2 杂化；由于桶状弯曲会导致量子限域和 σ - π 再杂化，其中 3 个 σ 键稍微偏离平面，而离域的 π 轨道则更加偏向管外侧，这使得碳纳米管具有高的机械强度、优良的导电性和导热性。碳纳米管由于其自身独特的结构和良好的电学特性和化学稳定性，以及较大的长径比等，使其自被发现之初就受到人们的关注，并成为场致发射阴极材料的研究热点。碳纳米管特殊的共价键结构意味着它们有耐物理溅射和抗化学污染的特性，在大电流条件下，电阻率降低时，它们不会由于强电场而损毁，在应用中能保持稳定的发射性能。

碳纳米管阴极最常用的制备方法主要为化学气相沉积法。化学气相沉积法具有易于实现图形化的特点，通常用于制备碳纳米管场致发射阵列，以减小单元间的电场屏蔽效应，这一类场致发射阴极的应用已有相关报道。2005 年 *Nature* 杂志报道由剑桥大学和法国 Thales 公司合作，将碳纳米管场致发射阴极应用于微波器件(如图 4 所示)，并在 1.5 GHz 下实现输出平均电流 3.2 mA，平均电流密度 1.3 A/cm²，相应的峰值电流 30 mA，对应电流密度 12 A/cm²^[24]。相较于传统热阴极来说，这种碳纳米管阴极具有更小的电容，能够应用于更高功率的场合。

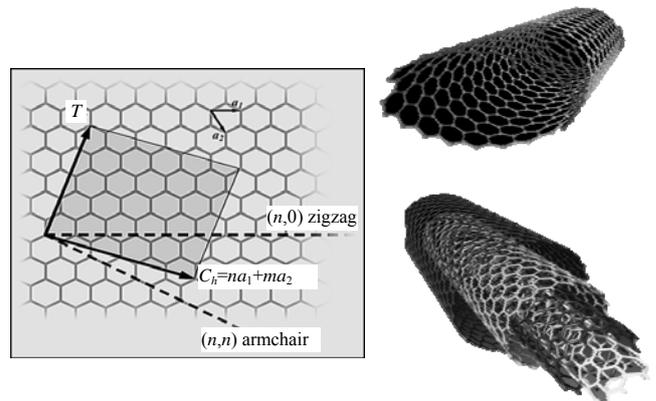


Fig.3 Schematic composition and structure of carbon nanotubes
图 3 碳纳米管的组成及结构示意图

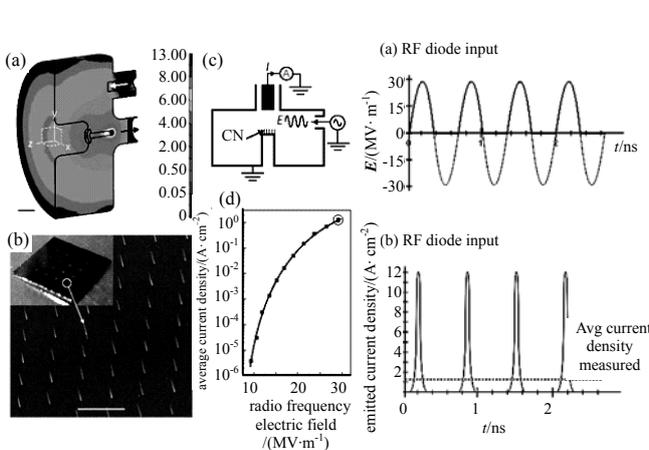


Fig.4 Features of the carbon-nanotube microwave diode
图 4 基于碳纳米管阴极的微波二极管

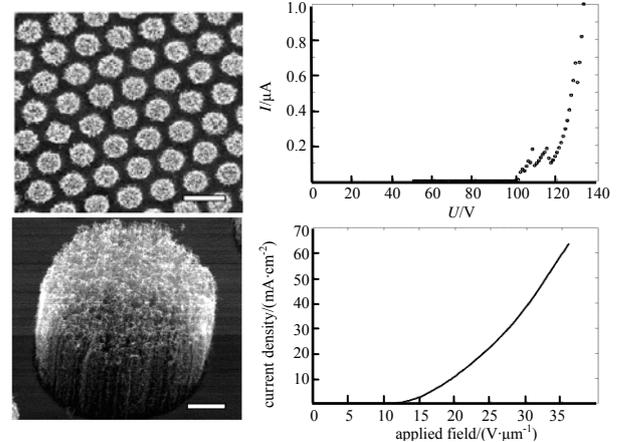


Fig.5 The SEM images and the typical $I-U$ characteristic of CNTs prepared by Darrell.L et al
图 5 Darrell.L 等人制备的碳纳米管发射阵列 SEM 照片及其 $I-U$ 特性曲线

2008 年美国国家航空航天局 L Darrell 等人将垂直碳纳米管簇阵列制备在金属衬底上(如图 5 所示)，开启电场 0.9 V/ μ m，电流密度达到 60 mA/cm²，并且集成了外栅极，基本满足行波管使用要求^[25]。

2010 年法国 Thales 公司的 Fr é d é ric Andr é 等人 与剑桥大学合作，将碳纳米管阵列阴极应用于 C 波段空间行波管和新型 X 射线安检设备(如图 6 所示)，其中应用于 X 射线管的阴极样品发射电流可达 1.3 mA，电流密度 0.2 A/cm²。在 3 个月的持续工作中，该碳纳米管阴极工作电流 0.45 mA，值得注意的是，在前 20 天，为了保持发射电流恒定，阳极电压提高了 20%，并在之后的 2 个月中保持稳定。在应用于 C 波段空间行波管时，可在收集极得到 2.1 mA 的电流，透过率 92%，并有 2.8 dB 的增益^[26]。韩国的 H J Kim 等研究人员利用碳纳米管浆料涂覆在球形行波管阴极表面，二极管结构的发射测试得到在 5 V/ μ m 的电场下，发射总电流为 11 mA，电流密度达到 73 A/cm²。在直流和脉冲条件下，分别测试了碳纳米管阴极的双栅控结构，发射电流分别为 4.2 mA 和 4.6 mA。并采用了双栅控行波管电子枪结构，将该阴极装配到行波管电子枪中^[27]。图 7 为 Kim 等人所使用的电子枪结果及其表面发射体形貌^[27]。

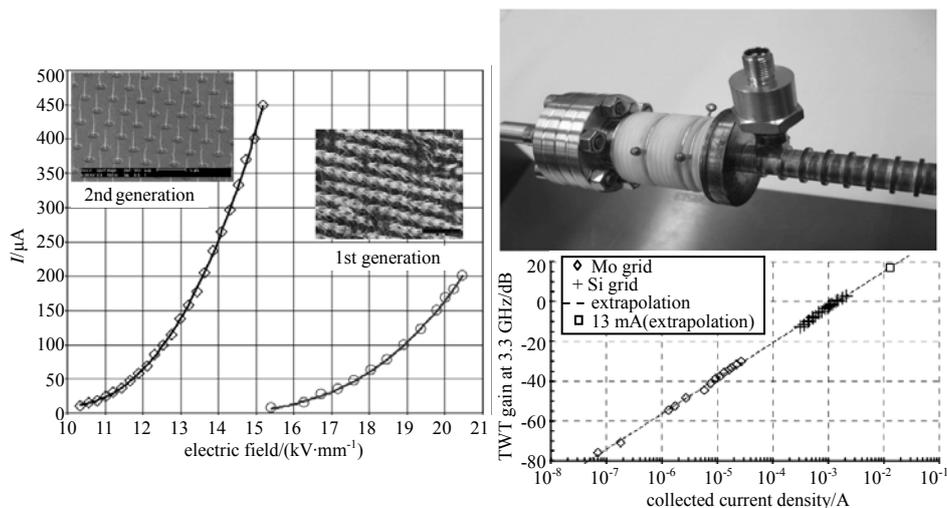


Fig.6 SEM pictures and $I-U$ properties of CNT cathodes, view of the TWT gun and input section and measured TWT gain as a function of the collected current

图 6 法国 Thales 公司和剑桥大学合作研究的碳纳米管阵列阴极 $I-U$ 曲线及行波管增益-电流曲线

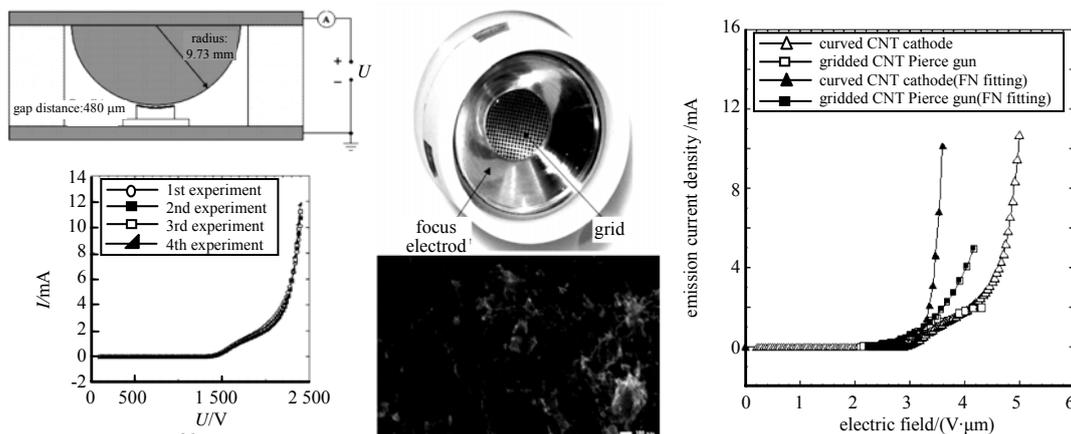


Fig.7 SEM image of the surface morphology of CNT paste by Kim et al.

图 7 Kim 等人制备的碳纳米管浆料阴极及其表面形貌

英国剑桥大学在2011年的一篇报道中指出，利用碳纳米管场致发射阴极，在80 V的支取电压下，得到74 mA/cm²的发射电流密度，这个数据尽管和热阴极的发射能力有一定的差距，但基本满足为太赫兹器件提供电子源的要求。此外，还有一些研究机构也从事场致发射阴极的研究，俄罗斯Almaz设计制作了由7个电子注组成的平面栅控碳纳米管场发射电子枪(如图8所示)，实验结果显示可以实现25 mA电流和2.8 A/cm²电流密度。以及同时模拟19个电子注组成的曲面型带注压缩的栅控碳纳米管场发射电子枪，模拟结果表明，在发射电流为159 mA时，能够得到12 A/cm²的电流密度^[28]。

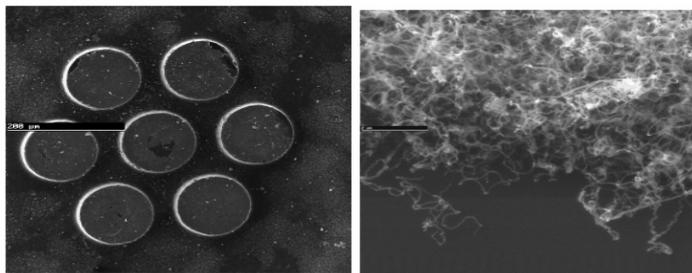


Fig.8 SEM images of seven beams FEC and CNTs by Almaz
图 8 Almaz 制备 7 个电子注碳纳米管场致发射阴极表面形貌

东南大学目前在碳纳米管场致发射阴极的研究上取得了一系列进展，主要采用丝网印刷法制备碳纳米管阴极，相对于CVD法，成本低，制备工艺简单，较适宜大面积碳纳米管阴极的制备，但是所制备的阴极表面碳纳米管随机性较强，表面碳纳米管取向性较差，且容易引入较多的有害杂质，因此使用该工艺制备的碳纳米管阴极在封装测试前需要经过一系列特殊的表面后处理工艺等，图9是单个样品的低倍SEM。图10(a)为被测试场致发射阴极的 $I-U$ 曲线及与其对应的Fowler-Nordheim曲线图，碳纳米管阴极的最大发射电流密度超过了3.5 A/cm²(总发

射电流值为28 mA)，器件的消耗功率为84 W。图10(b)所示为不同发射电流值下碳纳米管场致发射阴极的稳定性测试曲线图。由图示可看出，在不同的发射电流下，连续20 min的直流稳定性测试，碳纳米管阴极均表现出良好的稳定性。

在应用方面，应用上述碳纳米管场致发射阴极组装X射线管，并对封装好的三极聚焦结构X射线管进行直流成像测试。当栅极电压为4 kV，阳极电压为38 kV，阳极电流达到46 μA，分别利用胶片和X射线影像增强器感光拍摄静态物体和动态物体。图11为X射线管的直流成像图片。

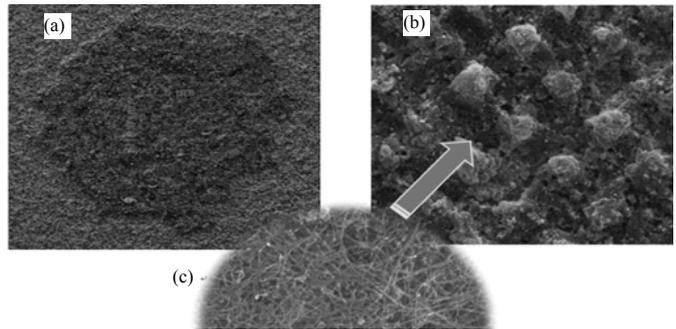
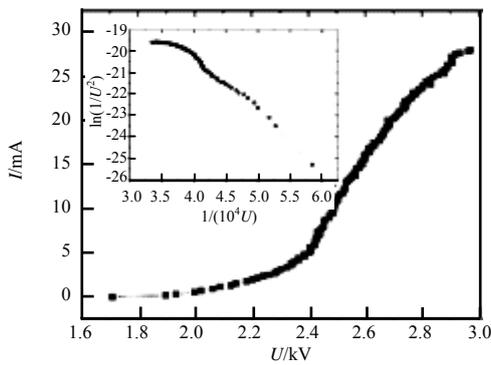
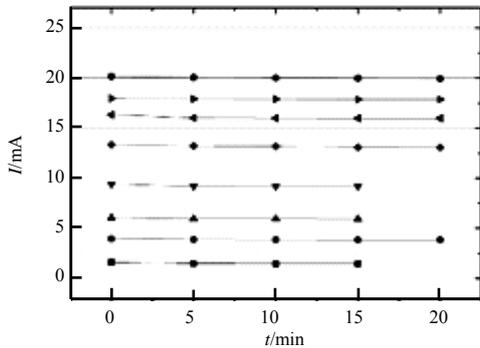


Fig.9 Physical image and the surface morphology of CNT diode
图9 碳纳米管场致发射阴极二极管实物图及阴极表面形貌



(a) field emission I-U characteristics



(b) the stability test

Fig.10 Emission characteristics of carbon nanotube field emission cathode

图 10 碳纳米管场致发射阴极的发射特性

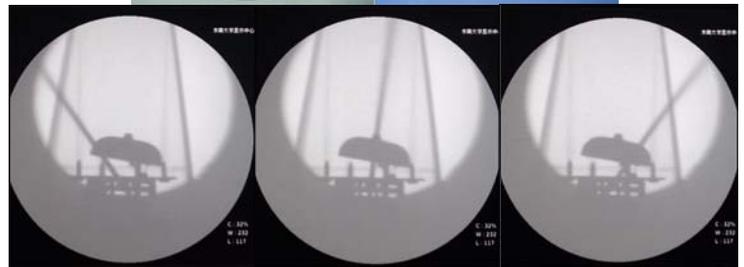
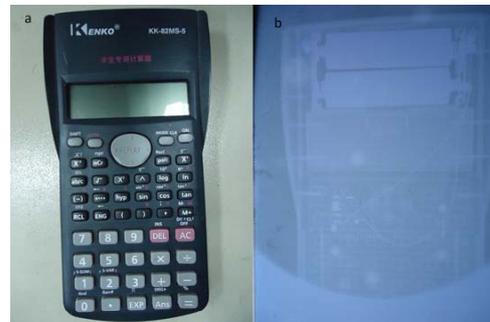


Fig.11 X-ray tube image of static object and dynamic object
图 11 X 射线管直流成像图片

4 结论

历经 20 多年的发展，碳纳米管场致发射阴极虽在结构和形式方面没有发生本质性的变化，但是制备工艺得到了明显的改善。同时，研究的重点也朝着集中于数个有价值、有潜力的方向发展，比如 X-射线管、行波管、中子源等。碳纳米管场致发射阴极还存在着几个急需解决的问题，制约着真空电子器件电子源的应用，如低真空度以及大电流工作条件下稳定性差，器件的寿命不足等问题。目前，更多的是通过改善碳纳米管表面形貌以及增强碳纳米管与基底的附着力两个方向来改善上述问题。相信随着碳纳米管阴极制备工艺以及实验条件的持续优化，碳纳米管场致发射电子源会在真空电子器件的应用领域有新的进展和突破。

参考文献：

[1] 廖复疆. 真空电子技术:信息化武器装备心脏[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社, 2008. (LIAO Fujiang. Vacuum Electronics Technology:the Heart of the Information Weapon Equipment[M]. 2nd ed. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)

- [2] QIU J X,LEVUSH B,PASOUR J,et al. Vacuum tube amplifiers[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009,10(7):38-51.
- [3] DI CARLO A,PAOLONI C,BRUNETTI F,et al. The European project OPTHER for the development of a THz tube amplifier[C]// IEEE International IVEC'09. Rome,Italy:[s.n.], 2009:100-101.
- [4] STUART R A,AL-SHAMMA'A A I,WRIGHT C C. Compact tunable microwave terahertz source[C]// IET Conference on High Power RF Technologies. London,UK:IET, 2009:1-4.
- [5] 廖复疆. 微波真空电子器件的发展战略[C]// 中国电子学会真空电子学分会第十九届学术年会. 安徽,黄山:[s.n.], 2013. (LIAO Fujiang. Development strategy of microwave vacuum electron device[C]// The nineteenth academic annual meeting of Vacuum Electronics Branch,China Electronics Society. Huangshan,Anhui,China:[s.n.], 2013.)
- [6] 承欢,江剑平. 阴极电子学[M]. 北京:科学出版社, 1986. (CHENG Huan,JIANG Jianping. Cathode Electronics[M]. Beijing: Science Press, 1986.)
- [7] SANBORN G,TURANO S,COLLINS P,et al. A thin film triode type carbon nanotube field emission cathode[J]. Applied Physics A, 2013,110(1):99-104.
- [8] MILINE W I,TEO K B K,AMARATUNGA G A J,et al. Aligned carbon nanotubes/fibers for applications in vacuum microwave devices[J]. Current Applied Physics, 2004,4(5):513-517.
- [9] RYU J H,KANG J S,PARK C K. Carbon Nanotube Electron Emitter for X-ray Imaging[J]. Materials, 2012,5(11):2353-2359.
- [10] 刘盛刚. 电子回旋脉塞和回旋管的进展[M]. 成都:四川教育出版社, 1988. (LIU Shenggang. Progress of Electron Cyclotron Pulse Tube and Cyclotron Tube[M]. Chengdu,Sichuan,China:Sichuan Education Press, 1988.)
- [11] SINGH U,KUMAR N,PUROHIT L P,et al. Numerical simulation of a double-anode magnetron injection gun for 110 GHz, 1 MW gyrotron[J]. Infrared MilliTerahz Waves, 2010,31(6):878-883.
- [12] 刘京,陈心全,王琦龙,等. 碳纳米管冷阴极电子枪的电子光学设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):339-344. (LIU Jing,CHEN Xinquan,WANG Qilong,et al. Electron optical design of cold cathode based on carbon nanotubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):339-344.)
- [13] SPINDT C A,BRODIE I,HUMPHREY L,et al. Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones[J]. Journal of Applied Physics, 1976,47(12):5248-5263.
- [14] SPINDT C A. A thin-film field-emission cathode[J]. Journal of Applied Physics, 1968,39(7):3504-3505.
- [15] SPINDT C A,SHOULDERS K R,HEYNICK L N. Field emission cathode structures,devices utilizing such structures,and methods of producing such structures[P]. 1973.
- [16] MAKISHIMA H,IMURA H,TAKAHASHI M,et al. Remarkable improvements of microwave electron tubes through the development of cathode materials[C]// The 10th International Vacuum Microelectronics Conference. Kyongju,Korea:IEEE, 1997:17-21.
- [17] 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.
- [18] WHALEY D R,DUGGAL R,ARMSTRONG C W,et al. 100 W operation of a cold cathode TWT[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009,56(5):896-905.
- [19] WHALEY D R,DUGGAL R,ARMSTRONG C W,et al. High average power field emitter cathode and testbed for X/Ku- band cold cathode TWT[C]// 2013 IEEE IVEC. Paris,France:[s.n.], 2013:21-23.
- [20] NATION J A,SCHACHTER L,MAKO F M,et al. Advances in cold cathode physics and technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1999,87(5):865-889.
- [21] IJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. Nature, 1991,354(6348):56-58.
- [22] IJIMA S,ICHIHASHI T. Single-shell carbon nanotubes of 1 nm diameter[J]. Nature, 1993,364(6439):737.
- [23] BETHUNE D S,KLANG C H,DE VRIES M S,et al. Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls[J]. Nature, 1993,363(6430):605-607.
- [24] TEO K B K,MINOUX E,HUDANSKI L,et al. Microwave devices:carbon nanotubes as cold cathodes[J]. Nature, 2005,437(7061):968.
- [25] NIEMANN D L,SLIAN J,KILLIAN J L,et al. Carbon nanotube field emission devices with integrated gate for high current applications[C]// 2008 IEEE Conference on Nanotechnology. Arlington,TX:[s.n.], 2008:456-459.
- [26] ANDRE F,PONARD P,ROZIER Y,et al. TWT and X-Ray devices based on carbon nano-tubes[C]// 2010 IEEE Thirteenth International Vacuum Electron Conference. Monterey,CA:[s.n.], 2010:83-84.