

# 碳纳米管冷阴极 X 射线管研究述评

李振军<sup>1,2</sup>, 李 驰<sup>1</sup>, 冯进军<sup>3</sup>, 戴 庆<sup>1</sup>

(1. 国家纳米科学中心 中科院纳米光子材料与器件重点实验(筹), 北京 100190;

2. 广东粤港澳大湾区国家纳米科技创新研究院, 广东 广州 510700;

3. 北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

**摘要:**碳纳米管(CNTs)优异的场致电子发射性能在开发冷阴极 X 射线管方面展现出显著优势。研究表明,通过控制电子发射方式和提高 CNTs 阴极发射电流的密度和稳定性可显著提升 X 射线源的时空分辨能力,且能大幅降低射线管的尺寸和功耗,在高端生物医疗、无损检测和科学研究等领域具有巨大潜在应用价值;但技术实现上仍存在 CNTs 阴极的可靠性、工作寿命和电流发射密度等瓶颈问题。因此,本文将从 X 射线产生原理出发,对比热阴极和冷阴极的电子发射原理,详细阐述 CNTs 冷阴极 X 射线管的技术优势;重点评述 CNTs 冷阴极电子发射性能与调控方法,电子束聚焦结构和典型应用场景等方面进展;介绍实际开发中遇到的技术难题和解决方案,并对未来发展方向进行展望,以期为本领域的技术进步提供参考。

**关键词:**碳纳米管;冷阴极;X 射线管;光调控

中图分类号:TB383.1 文献标识码:A 文章编号:1002-8935(2021)06-0001-13

doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2021.06.01

## A Review on the Research of Cold Cathode X-Ray Tubes Based on Carbon Nanotubes

LI Zhen-jun<sup>1,2</sup>, LI Chi<sup>1</sup>, FENG Jin-jun<sup>3</sup>, DAI Qing<sup>1</sup>

(1. National Center for Nanoscience and Technology, CAS Key Laboratory of Nanophotonic Materials and Devices (Preparatory), Beijing 100190, China;

2. GBA Research Innovation Institute for Nanotechnology, Guangzhou 510700, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Carbon nanotubes (CNTs) show significant advantages in the developments of cold cathode X-ray tubes for their excellent field emission properties. Many reports have shown that the temporal and spatial resolution of X-ray tubes can be significantly improved, employing CNTs cold cathodes with tunable electron emission mode and high density and stability of emission current. Moreover, the tubes' size and energy consumption can also be reduced compared with the thermionic tubes. Therefore, CNTs cold cathode X-ray tubes have great potential applications in the area of high-end biomedicine, nondestructive testing, scientific research, and so on. However, before the practical application, there are still some technical problems need to be solved, such as reliability, relatively short lifetime and low emission current density of the actual CNTs cathodes. Hence, in this review, the mechanisms of X-ray generation and the working principles of thermionic and cold cathode electron sources will be introduced. Then, the advantages of cold cathode X-ray sources with CNTs cathodes will be discussed. Especially, the modulation meth-

**基金项目:**国家重点研发计划纳米科技重点专项(2016YFA0202000);国家自然科学基金面上项目(52072084, 51972072);广东省重点领域研发计划项目(2020B010102002);广东粤港澳大湾区国家纳米科技创新研究院自主立项项目(2020GN0106);北京市高校“实培计划”项目(22150121003/050)

ods of the cathodes' properties, the electron gun structures, and the final applications of cold cathode X-ray tubes will be reviewed in detail. After that, the technical problems and the solutions will be discussed. Finally, the prospects of CNTs cold cathode X-ray source will also be put forward. The review is expected to provide a reference for the technical progress in this field.

**Keywords:** Carbon nanotube, Cold cathode, X-ray tube, Optical modulation

X射线是由德国物理学家威廉·康拉德·伦琴(Wilhelm-Konrad Rontgen)<sup>[1]</sup>于1895年发现,其波长在0.001~10 nm之间,光子能量比可见光大2~5个数量级,属于一种高能射线。X射线波长短、穿透性强,因此在医学成像、无损检测、安全检查等领域应用广泛<sup>[2-4]</sup>;由于X射线单个光子能量高,也是肿瘤治疗、元素含量分析、矿物探测等方面的常用技术手段<sup>[5]</sup>;同时,X射线短波长特性使其在真空传输中几乎无衍射效应,是天文学中研究星系分布和运行规律的有效媒介,而利用X射线作为深空通讯和穿过电离通讯盲区的技术方案也正在被尝试<sup>[6-8]</sup>。

目前X射线成像仍是其主流应用方向,但其空间分辨能力大多在0.5~1.0 mm之间,且一般不具备超快时间分辨能力。当前伴随着生命健康和高端制造等领域的飞速发展,对X射线成像技术的时空分辨能力提出新的需求:空间分辨能力需达到微米乃至纳米量级,而时间分辨能力需优于微秒量级。这些需求为X射线行业的发展注入了新的动力,但也对传统热阴极X射线管技术带来巨大挑战。一方面是由于热阴极电子源电子能量散度大且电子初始发射方向随机,因此需要复杂昂贵的电磁聚焦透镜系统才能实现微焦斑,限制了其广泛应用。另一方面,热阴极X射线管的阴极灯丝需经预热后才可稳定工作,无法实现微秒级脉宽或快速开关,也造成X射线成像系统在时间分辨能力提升方面的限制。整体来看,热阴极X射线源的时空分辨率能力已接近理论极限,必须另辟蹊径发展新型高性能电子源,突破当前发射材料、电子束聚焦和外场响应性能等瓶颈,才能满足高端行业发展需求。

本文将从X射线高时空分辨成像技术的重大需求出发,介绍X射线常见产生方式和各自的特点及应用场景,探讨当前广泛应用的X射线球管的前沿技术与挑战,对比分析热阴极和冷阴极两种电子源的发射方式、控制手段与电子束性能。重点介绍新型碳纳米管(CNTs)冷阴极的发射性能、调控方式、电子聚焦结构设计和实验样机的研制进展,并阐述开发中遇到的技术问题和解决方案。最后,对

CNTs冷阴极X射线管的未来发展趋势进行展望,以期为本领域的技术进步提供参考。

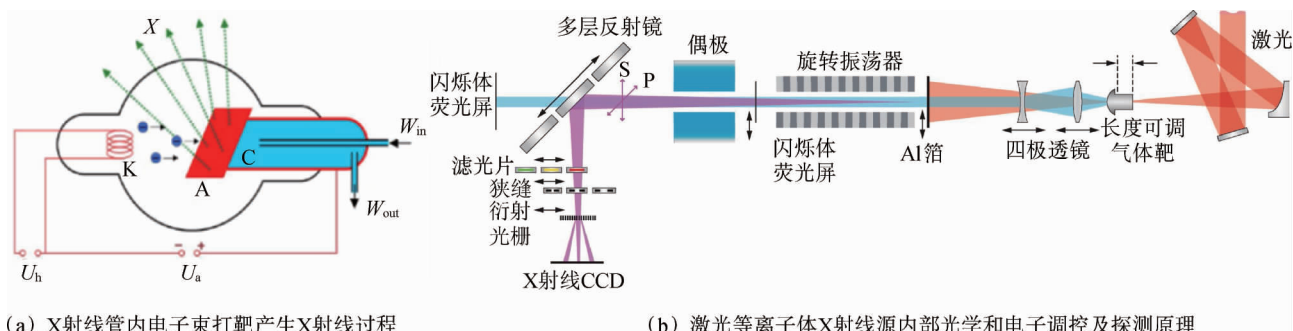
## 1 产生X射线的四种常见方式

在实际使用中,X射线有四种常见产生方式:X射线管、激光等离子体光源、同步辐射光源和X射线激光,对应产生机理分别如下:

(1)X射线管是利用高速电子撞击金属阳极靶产生X射线的真空电子器件,其典型结构如图1(a)所示。该方式产生的射线包括电子束突然减速产生的韧致辐射和靶面金属内层电子弛豫产生的特征X射线两种类型。该过程中,仅有约1%电子动能转化为射线输出,其余部分则以热能形式耗散,靶面温度极高,因此,高功率X射线管常采用旋转阳极靶结构,通过不断变化电子束在阳极上的碰撞位置,降低靶面温度,减少对阳极靶损坏,并通过辅助制冷方式加快热量向外界传输。但高功率旋转阳极结构要求靶面在以大于6000 r/min的速度旋转过程中保持极高的动平衡状态,这一直是X射线管制造领域的关键技术挑战<sup>[9]</sup>。而近些年来发展起来的冷阴极脉冲电子发射技术,为解决这个条件提供了潜在的替代方案。其利用冷阴极电子发射响应速度快的特点,仅在X射线管有效工作的时间内开启,既可减少阳极靶承受的总热量,又可降低无效辐射剂量,性能优势明显;同时,结合冷阴极电子发射方向集中、能量散度小的特征,冷阴极X射线管在微纳焦斑、脉冲发射和便携设备开发方面具有潜在优势,已成为行业发展的重点关注方向。

(2)激光等离子体X射线源是利用高强度激光脉冲( $10^{14} \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$ )照射固态靶面形成局域高温、高密度等离子体,进而发射X射线,其工作原理如图1(b)所示<sup>[10]</sup>。激光等离子体光源属于高强度点光源,可用于精密成像和高端制造领域。例如,在芯片制造中采用的软X射线投影光刻技术,利用激光等离子X射线源波长范围可控,光学结构相对紧凑的特点,开发出软X射线光刻技术,也称为极紫外(EUV)光刻技术;同时,激光等离子体X射线源具有皮秒级脉冲宽度,可被用来观测晶格动力学过程,测量亚埃量级的晶格结构变化等。然而,高功率

的应用为主。



## 2 冷阴极电子发射的性能优势

阴极的工作方式决定了射线管内部电子的发射控制、聚焦、限束、加速与阳极靶面等多个设计环节,从而影响 X 射线管的最终性能。因此,采用何种阴极材料获得更高品质电子束是设计新型 X 射管的首要问题。

阴极材料具有热电子发射和冷场发射两种常见工作方式。热电子发射是通过加热增加材料内部电子的动能,使得其中一部分电子的动能超过真空势垒从而形成电子发射。早期的理论推测热电子发射电流密度  $j_s$  与温度  $T$  之间的关系可以用热电子发射公式表示:

$$j_s = AT^2 \left( -\frac{b}{T} \right) \quad (1)$$

式中,  $A, b$  为常数。进一步结合量子统计理论的推导过程, 零场热发射电流密度  $j_0$  可表示为:

$$j_0 = A_0 \exp\left(-\frac{\Phi_M}{kT}\right) \quad (2)$$

式中,  $\Phi_M$  为阴极材料的功函数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为发射体的温度, 发射常数  $A_0 = \frac{4\pi m_0^2 k T}{h^3} = 120.4 (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2})$ 。由热阴极发射机制可以看出, 阴极材料需要耐受极高的温度, 且功函数较低为宜。实际应用常采用钨(W)、六硼化镧( $\text{LaB}_6$ )或碱土金属(钡、锶)氧化物等材料, 热阴极工作温度超过  $1000^\circ\text{C}$ , 预热时间长(几分钟到半小时之间), 且以连续工作模式居多, 在高性能 X 射线管开发中存在诸多限制, 但由于整体工艺成熟, 仍是当前市场主流产品所采用的技术路线<sup>[12]</sup>。

冷阴极,这里指利用场致发射原理的阴极,是相对于热阴极而言,其电子发射过程无需加热,而是通过在阴极材料表面施加强电场,压缩和降低材料表

面势垒的宽度和高度,从而使势垒附近的电子通过隧穿的方式逸出的一种发射方式,该过程原理如图2所示。早期,对于金属材料,在“考虑服从费米狄拉克统计的简单自由电子,金属逸出功分布均匀且确定,金属具有光滑表面,考虑经典镜像力的影响”的物理假设基础上,推导出著名的 Fowler-Nordheim (F-N)理论<sup>[13]</sup>,其描述场发射电流密度  $j$  与电场强度  $E$  之间的关系为:

$$j = \frac{A\beta^2 E^2}{\varphi} \exp\left(\frac{-B\varphi^{\frac{3}{2}}}{\beta E}\right) \quad (3)$$

式中,  $A, B$  为常数。  $A = 1.56 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{V}^{-2} \cdot \text{eV}$ ,  $B = 6.83 \times 10^9 \text{ eV}^{-3/2} \cdot \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\varphi$  为阴极材料功函数,  $\beta$  为场增强因子。

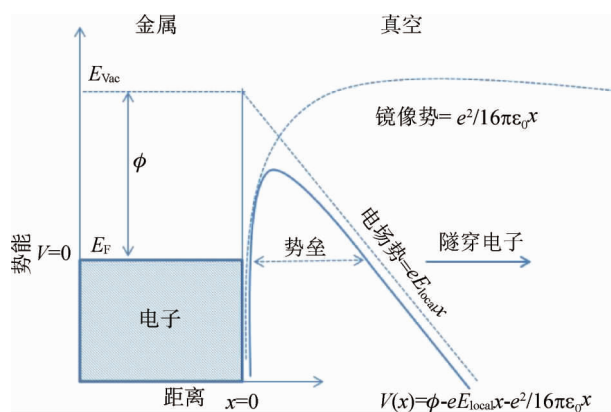


图2 场发射冷阴极电子发射原理图

从两种阴极的发射方式可以看出,不同材料的电流发射密度既与自身的功函数(内部因素)相关,也受外界的温度或电场调控(外部因素)。热阴极经历了一百多年的研究和探索,在相应的材料选取、电子聚焦和对应的封接工艺方面已有相对成熟的方案;但热阴极需要加热、响应速度慢、发射方向分散、电子束亮度低等不利因素也限制了其在高性能 X 射线管方面的进一步提升。而冷阴极采用电场调控电子发射,在开发新型 X 射线管方面具有如下优势<sup>[14-17]</sup>:①电子束方向集中、亮度高,适合在微焦斑、高亮度 X 射线管需求;②响应速度快,由于电子隧穿势垒过程在亚飞秒量级,冷阴极电子发射响应速度极快,可以满足 X 射线管快速开关需要;③电子束能量散度小,可简化聚焦设计,降低成本;④无需加热,易集成,适合便携式或适形产品开发。因此,开发高性能冷阴极 X 射线管被业内寄予厚望,已成为近些年的研究热点<sup>[18-20]</sup>。

### 3 CNTs 阴极的优势与调控

目前关于冷阴极的电子场发射机理和性能优势

已有较统一认识,但阴极材料、电流发射密度、稳定性和工作寿命始终是制约冷阴极 X 射线管开发的技术难点<sup>[21-22]</sup>。具体原因可简单归纳为两个方面:①冷阴极尚不能满足 X 射线管环境中高电压的要求,易打火、易损毁。冷阴极材料发展大体可以划分为三类:平面阴极(金刚石薄膜、BN 薄膜、石墨烯)、Spindt 阴极(硅尖、钨尖、碳化硅尖)和一维纳米材料阴极(CNTs、ZnO 纳米线、LaB<sub>6</sub> 纳米线、BaO 纳米线)<sup>[20-21, 23-33]</sup>。平面阴极一般需要较高的开启场强,发射电流密度低,在 X 射线管领域极少应用;Spindt 阴极容易出现短路且制备工艺难度大,国内仅有北京真空电子技术研究所等少数机构掌握该项技术;其阴极发射电流密度和面积大,多用于高功率微波真空电子器件,要求总发射电流大,电子注的聚焦属于强流电子光学。一维纳米材料由于场增强因子大,可在较低的栅极场强下获得更高电流密度,在具有高分辨成像要求的技术领域具有更好的应用前景,但纳米材料与基底的粘合力、抗离子轰击能力、阴极自身寿命是影响其应用的重要问题。产业界正在深入研究不同冷阴极材料的性能和潜在问题,解决冷阴极在强电场环境中的实用化问题。②冷阴极尚不能满足 X 射线管内真空气氛及气压的要求。冷阴极 X 射线管在工作过程中,电子轰击阳极靶材会释放出气体,引起内部真空度恶化,会使阴极材料吸附气体分子,发射不稳定,受到更多阳离子轰击,甚至会产生拉弧、放电,损毁阴极。理论上虽然可以通过增加离子泵来维持管内高真空,或者直接采用开管设计方案,但这些变化对配套电源、整体结构和工作环境均提出新的要求,使用受限。

#### 3.1 CNTs 冷阴极的制备与性能调控

CNTs 自 1991 年被发现以来,作为一维纳米材料,具有纳米级尖端、稳定的物理、化学性质和优异的机械性能,被认为是最有可能实用化的冷阴极材料之一<sup>[34]</sup>。在阴极制备工艺方面,早期主要采用化学气相沉积(CVD)、丝网印刷、电泳等方法,后续又出现报道了等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术,利用等离子体电场诱导实现了单根 CNT 直立生长,为精确控制 CNTs 阴极发射图案和提升其电子发射性能提供有效的技术手段<sup>[35]</sup>,解决了 CNTs 阴极纳米材料生长精确控制的难题,可获得薄膜、单根、单束、阵列化和不同层数 CNTs 等类型的发射结构(如图3所示),可满足不同类型 X 射线管对阴极的要求。

在 CNTs 阴极发射性能调控方面,已经有很多

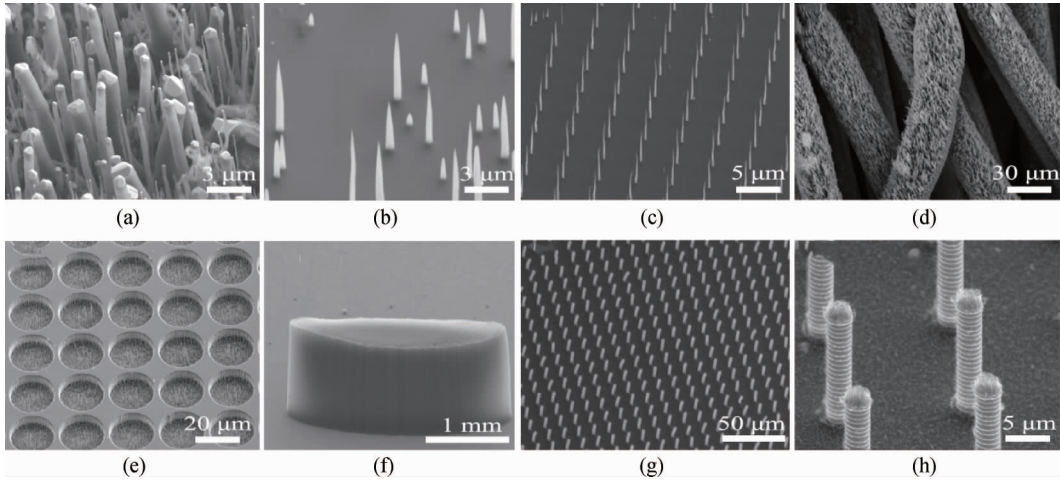


研究工作,如表 1 所示,包括生长方法优化、CNTs 层数优化、多种复合结构、后处理等。这些调控方法围绕控制阴极材料的几何尺寸、表面功函数、减小电场屏蔽、局域差异、直流-交流发射、基底导电性等方面提升阴极性能,均取得一定效果。特别是 Seong Chu Lim 等<sup>[36]</sup>报道的 W 针尖上的单根 CNTs 发射电

流可达到  $1.7 \times 10^{11}$  mA/cm<sup>2</sup>,充分验证了 CNTs 冷阴极电子源的高密度和高亮度的特点,为目前已知最大值。但由于单根 CNTs 在使中很容易烧毁,且电流值偏小,难以实际应用,故目前正开展具有一定面积的高电流密度和稳定性电子源的开发。

表 1 CNTs 冷阴极电子源发射性能调控方式及效果

制备方法	碳管类型	调控方式	开启场强 /V/ $\mu$ m	电流密度 /mA/cm <sup>2</sup>	总电流/mA	工作寿命 /h	波动性	参考文献
电弧放电	单根多壁碳管	钨尖-CNTs	1.0	$1.7 \times 10^{11}$	2	1.7	—	[36]
溶液法	多壁碳管薄膜	钨丝-CNTs	1.55	949	0.465	40	3%~4%	[37]
丝网印刷	多壁管薄膜	金属颗粒增强接触	3.0	6200	68	—	—	[29]
丝网印刷	多壁管薄膜	电场老炼	2.8	20	0.2	35	5%	[38]
CVD	单根多壁管	钨尖-CNTs-LaB <sub>6</sub>	1.2	$4.4 \times 10^{10}$	0.07	13.9	—	[32]
CVD	多壁管薄膜	铬镍铁合金基底	1.5	100	—	—	—	[39]
CVD	多壁管阵列	氧气处理	4.0	1.0	—	30	6%	[40]
CVD	多壁碳管薄膜	泡沫金属-CNTs-rGO	0.71	64	—	10	—	[41]
MPCVD	多壁碳管阵列	脉冲发射	—	2800	280	—	—	[42]
MPCVD	单壁碳管	CNTs 纱线	1.0	$5.1 \times 10^4$	0.251	450	—	[43]
PECVD	多壁管阵列	非线性电阻限流	2.0	1650	16.5	1	—	[44]
PECVD	多壁碳管阵列	金属基底垂直阵列	1.57	33	0.49	5	12%	[45]
PECVD	多壁管阵列	硅薄膜包覆	2.0	2.8	0.7	20	无衰减	[46]



(a)稠密直立碳纤维薄膜;(b)稀疏直立碳锥形结构;(c)单根多壁 CNTs 阵列;(d)碳布表面生长多壁 CNTs;(e)多壁 CNTs 平面阴极;(f) Mo 基底生长单壁 CNTs 薄膜;(g)单壁 CNTs 阵列;(h)半导体硅柱限流的 CNTs 阴极

图 3 PECVD 方法制备的 CNTs 阴极样品

由表 1 可以发现两个关键问题:①薄膜阴极发射电流密度一般小于 1 A/cm<sup>2</sup>,与单根 CNT 相比,薄膜阴极的发射电流密度低 5~8 个数量级。这主要是因为高密度生长的邻近 CNTs 之间存在电场

屏蔽效应使得有内部 CNTs 尖端电场强度大幅度降低,发射电流减小。通过优化 CNTs 生长高度和阵列密度可以降低相邻碳管之间的屏蔽作用(理论上 CNTs 高度为其阵列周期一半时最佳),但获得

电流密度仍与预期存在明显差距。②CNTs 阴极寿命和可靠性有待提高。由于制备的 CNTs 高度、直径和手性尚无法完全精确控制,阴极发射不均匀,当工作在大电流密度时,优先发射的 CNTs 极易损毁。同时,CNTs 和基底之间存在较大接触电阻、界面粘合力不强等问题,造成测试中阴极容易被烧毁或者从基底完全剥离<sup>[47]</sup>。

国家纳米科学中心在 CNTs 阴极性能调控方面做了大量基础研究工作。通过在 CNTs 表面包覆不同厚度的 h-BN 纳米薄膜,发射体表面的有效势垒高度降低到 0.9~1.8 eV,开启场强下降到 1.3~2.7 V/ $\mu\text{m}$ ,在面积为 4 mm<sup>2</sup> 阴极样品中,获得最大发射电流密度达 0.1 A/cm<sup>2</sup>;在连续 1 mA 发射条件下,120 h 内电流发射波动性小于 1.2%,阴极性能得到明显提升<sup>[48]</sup>。通过在 CNTs 阴极与基底之间增加金属过渡层的方法,有效地提高接触界面的导电性和粘合力,实现发射电流密度和稳定性的提升,如图 3(f) 所示。此外,为了提高阴极发射电流的均匀性,设计了如图 3(h) 所示的硅柱-CNTs 复合发射结构,在 1 mm<sup>2</sup> 阴极区域内,当施加电场强度为 5.8 V/ $\mu\text{m}$  时,获得 1.65 A/cm<sup>2</sup> 的发射电流密度<sup>[44]</sup>。

### 3.2 光调控 CNTs 阴极电子发射

场发射是依靠强电场调控电子隧穿通过势垒,获得电流发射。光场的引入一方面由于光热效应可以改变发射体内部电子能级分布状态,实现对光辅助场致电子发射过程的精细调控;另一方面,光场的脉冲调控时间尺度远快于电场脉冲调控,光场中的电矢量可简化理解为交变电场,强光场下的超快电子发射过程研究可进一步揭示电子发射的动态过程和拓展 CNTs 电子源的应用范围。

已有的光辅助调控过程中采用连续光纤激光器照射直立、少层 CNTs 阵列,发现阴极出现明显局域发光现象,根据黑体辐射公式拟合,测试阴极局域温度达到 2000 K 以上,且在低电场条件下获得阴极发射电流符合热电子发射 Richardson 规律;继续增加电场强度到 0.45 V/ $\mu\text{m}$  可以观测到明显的空间电荷限制发射效应;进一步增加电场进入热辅助场致电子发射区,电流波动范围可以控制在 5% 左右,其开启场强相对于无光照情况降低约 0.5 V/ $\mu\text{m}$ ,并可实现毫秒量级的脉冲开关控制<sup>[49]</sup>。此外,研究中还发现了在 CNTs 阴极的光热电子发射过程中同样存在明显的边缘增强效应<sup>[50]</sup>。近期研究表明,采用超快激光脉冲调控 CNTs 阴极电子发射,利用

强场激光的电场分量替代静电场进行光场脉冲发射,实验上获得电子脉冲宽度在飞秒量级,电子能量散度在 0.25 eV 左右<sup>[15]</sup>。

结合 CNTs 冷阴极电子源的各方面性能和调控方法来看,其具有如下性能优势:①CNTs 最小尖端半径可达到 1 nm 以下,是“点状”电子源理想材料,场致电子发射方向集中,可大幅度降低电子枪聚焦设计难度,易获得微米、亚微米级电子束斑;②单根 CNTs 场发射电流密度高,可达到 10<sup>8</sup> A/cm<sup>2</sup>,有利于获得高亮度 X 射线管<sup>[36]</sup>;③基于 CNTs 不同于金属的独特电子态和电子输运性能,实验中已观测到飞秒量级电子脉冲发射,可获得高速脉冲 X 射线管,从而获得脉冲成像效果,并减少 X 射线管阳极热量产生<sup>[51]</sup>;④CNTs 内部碳原子外层电子具有  $sp^2$  杂化结构,结构稳定,可获得耐离子轰击、长寿命阴极<sup>[52]</sup>。冷阴极电子源的发射控制方式和电子束品质不同于热阴极电子源,对应的电子提取过程需要增加栅极,在精细聚焦过程中难以直接采用现有电子枪结构等设计难题。因此,在 CNTs 冷阴极 X 射线管技术开发中,对应的聚焦电子枪结构设计也是产业化推进的重要环节。

### 4 CNTs 冷阴极电子枪的结构设计

与热阴极 X 射线管类似,CNTs 冷阴极 X 射线管内电子发射之后也将经过电子束调整和加速过程,电子枪的结构对于电子束透过率、X 射线焦斑控制和出射强度具有决定作用。CNTs 冷阴极 X 射线管的电子枪结构主要有三极结构、多极静电聚焦和电磁聚焦等结构类型,具体结构如图 4 所示。

2001 年日本名古屋工业大学 H. Sugie 等报道的 CNTs 阴极电子枪,采用如图 4(a) 所示的阴极、栅极和阳极的三极结构,在阴极电流仅为 1.5  $\mu\text{A}$ ,阳极电压为 10~60 kV 条件下可观察到集成电路内部约 30  $\mu\text{m}$  宽的金线,并验证了同等测试条件下,冷阴极 X 射线成像效果比热阴极具有更好的空间分辨效果,单帧成像时间超过了 14 min<sup>[53]</sup>。

结合阴极电流密度、稳定性和成像时间等各方面在实际使用中的要求,开发了带有三极静电聚焦的 CNTs 冷阴极 X 射线管结构,其设计原理和具体结构如图 4(b)、(c) 所示<sup>[54]</sup>:选用长、短轴分别为 1.0 和 0.15 mm 的椭圆形 CNTs 阴极,获得脉冲发射电流 0.3 mA、15 h 无衰减,经成像测试系统的焦斑尺寸为 30  $\mu\text{m}$ ,如果采用其电子聚焦结构在 0.1 mA 电流条件下预计可获得 10  $\mu\text{m}$  焦斑<sup>[54]</sup>。在大功率脉冲 X 射线管方面,电子科技大学报道了在

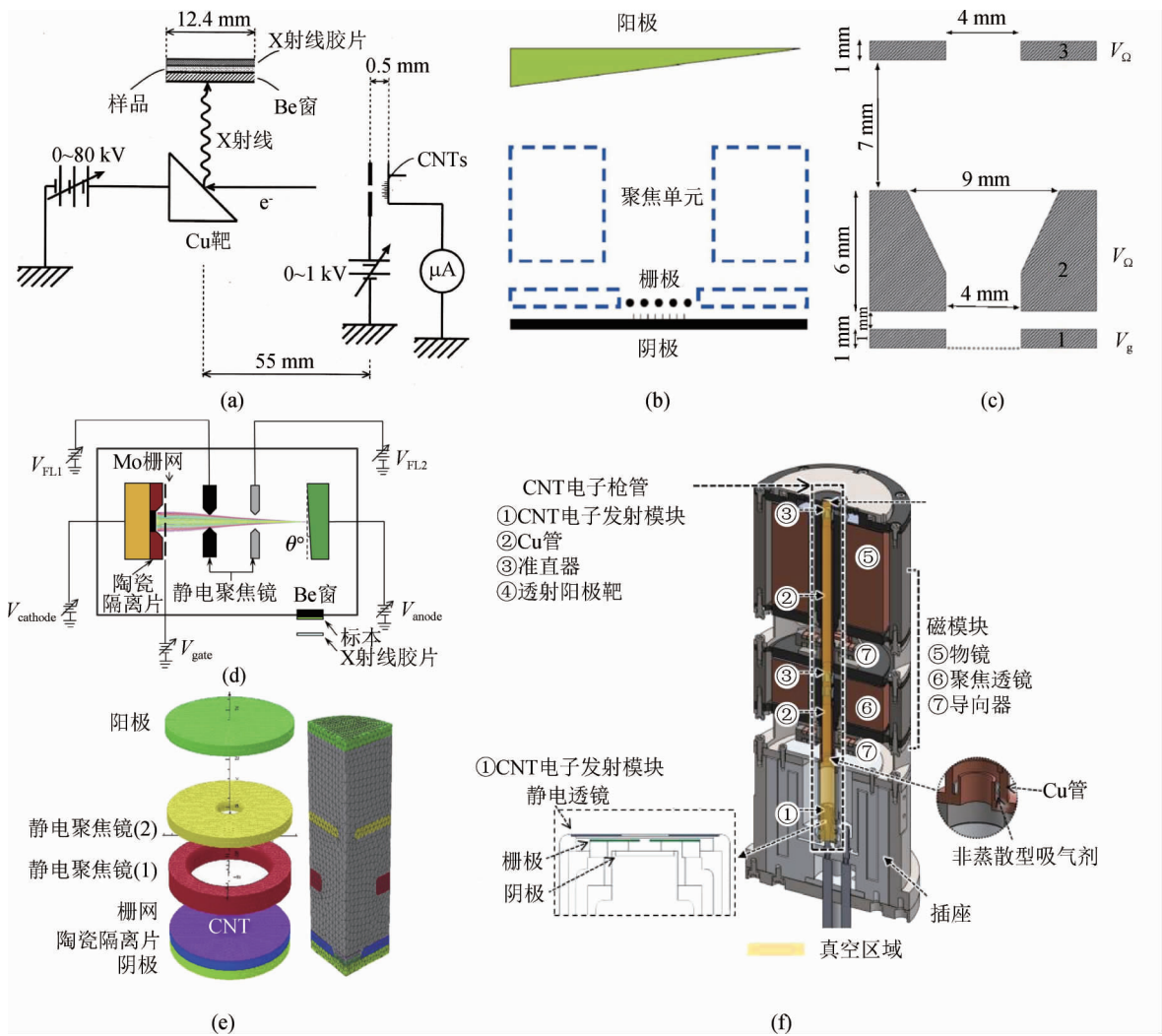


图 4 国外 CNT 冷阴极电子枪的主要结构形式

阴极面积为  $1\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , 脉冲发射总电流  $280\text{ mA}$ , 通过栅控和电极结构优化, 在阳极获得电流为  $195\text{ mA}$ , 聚焦结构电子透过率约为  $69\%$ , 阳极电压  $90\text{ kV}$ , 分辨率达到  $0.1\text{ mm}$ , 该团队在 CNT 大功率射线管方面技术领先<sup>[42]</sup>。针对静电聚焦结构的 CNTs 冷阴极 X 射线聚焦优化结构, 目前比较理想方法是在双静电聚焦结构的电子枪基础上优化出分辨率为  $25\text{ }\mu\text{m}$  ( $20\text{ lp/mm}$ ) 的电子聚焦结构, 如图 4 (d)、(e) 所示<sup>[55]</sup>。为获得更小焦斑尺寸的 CNTs 冷阴极 X 射线管, 进一步发展了静电聚焦和磁聚焦组合式结构, 类似于电子显微镜内部典型聚焦设计, 为目前已知最为复杂 CNTs 冷阴极射线管结构<sup>[56-57]</sup>。该报道的射线管采用透射靶设计, 在  $40\text{ kV}$  阳极电压和  $0.3\text{ }\mu\text{A}$  阳极电流下, 获得约几百纳米的空间分辨率, 如图 4(f) 所示<sup>[56]</sup>。值得注意的是该结构中

阴极发射电子的透过率仅有  $3\%$  左右, 这是复杂电子聚焦结构在获得高分辨性能时必然引起电子透过率下降带来的负面影响。2020 年报道了可变焦的 X 射线管结构<sup>[58]</sup>, 采用阴极尺寸为  $19\text{ mm} \times 4.3\text{ mm}$ , 脉冲宽度为  $5 \sim 500\text{ ms}$ , 最大电流为  $120\text{ mA}$ , 通过调控阳极电压 ( $55 \sim 100\text{ kV}$ ) 和聚焦极电压 ( $500 \sim 4750\text{ V}$ ) 可获得焦斑尺寸在  $0.9 \sim 1.9\text{ mm}$  不同焦斑 X 射线管。

另外, 电子枪聚焦结构的设计也需要考虑 X 射线管阳极靶的结构、耐压距离、热容等方面的因素。目前研究的冷阴极电子枪结构中大体仍沿用了传统 X 射线管阳极靶结构, 尚无专门针对冷阴极 X 射线管的靶面设计和优势性能报道, 但由于冷阴极电子束具有方向集中和响应速度快的特性, 预期冷阴极 X 射线管如采用脉冲模式工作, 相对于热阴极连续

模式状态可以减少阳极靶面产生的热量,降低对阳极散热、机械设计和旋转等方面的要求,提升 X 射线管的稳定性和工作寿命。

总体来看,在 CNTs 冷阴极 X 射线管的聚焦电子枪结构设计方面,得益于冷阴极电子发射方向集中的优势,基于双极静电聚焦结构的电子枪结构为主要形式,且焦斑尺寸已趋近微米量级,基本可以满足目前成像检测的分辨率需求,有望作为后期产品设计的主流技术路线。尽管也有磁聚焦结构获得了更高的空间分辨率,但考虑到整个过程的电子透过率,改用 CNTs“点状”电子源,结合静电聚焦结构是一种获得更小电子束斑的理想方案。同时,相对于热阴极 X 射线管,冷阴极产品的聚焦结构、阳极靶面和整体机械设计也具有制造简便的优势。

## 5 CNTs 冷阴极 X 射线管的应用领域

CNTs 冷阴极 X 射线管的应用领域从原理上讲可以覆盖传统热阴极 X 射线的全部场景,并且结合冷阴极的工作方式和结构特点可以设计出新功能设备,解决热阴极 X 射线管的性能瓶颈,因此,CNTs 冷阴极 X 射线管的应用受到世界各国研究学者的关注,包括英国、美国、中国、韩国、日本均有大量相关报道。

### 5.1 在生物医疗领域内的应用

冷阴极 X 射线管在此领域有两大重要应用方向:①静态 CT 成像,包括静态乳腺机、静态全身 CT 机等设备的开发。该方向主要利用冷阴极 X 射线管易集成和响应速度快的优势,发展分布式 X 射线管(或称分布式光源),克服传统 CT 机高速旋转带来的机械加工设计和运动伪影,并有望减少病人的辐射剂量。②快速脉冲成像。针对生命活动过程的快速成像设计,利用 CNTs 冷阴极 X 射线管可以快速开关的特性,在生命体心跳、呼吸或运动的脉冲间隙进行快速成像,消除运动伪影,减少辐射剂量。

美国北卡罗来纳大学教堂山分校(UNC)研制的分布式 X 射线管和脉冲同步成像最具有代表性<sup>[59-61]</sup>。该团队已经报道了 CNTs 的多光束 X 射线成像系统和分布式 X 射线层析成像技术,利用阴极场致电子发射响应速度快的特性,依次扫描控制电子发射的栅极电压,获得了多源 X 射线发射过程的时序控制,并根据收集到的透射影像,重构物体内部结构。由于 CNTs 阴极面积在不同领域内可以灵活变化,其阴极发射电流可以从 0.1~30 mA 调控,根据应用场景不同,电压可以在 40~60 kV 变化,对应焦斑尺寸在亚毫米量级,样机结构和成像原

理分别如图 5(a)、(c)所示<sup>[59-60]</sup>。在小动物动态成像 CT 系统方面,基于动物呼吸生理活动触发 CNTs 冷阴极 X 射线发射和探测器采集数据,获得了时间分辨 50 ms 和空间分辨 6.2 lp/mm 的成像效果,成像原理和脉冲触发过程如图 5(b)、(d)所示<sup>[61]</sup>。韩国科学技术院研究团队报道了基于 CNT 的微型 X 射线管,其长度为 47 mm,直径为 7 mm,最大管电流为 200  $\mu$ A,最大管电压为 50 kV<sup>[62]</sup>,具有体积小和电压低的优势,在牙科成像领域内应用优势明显。

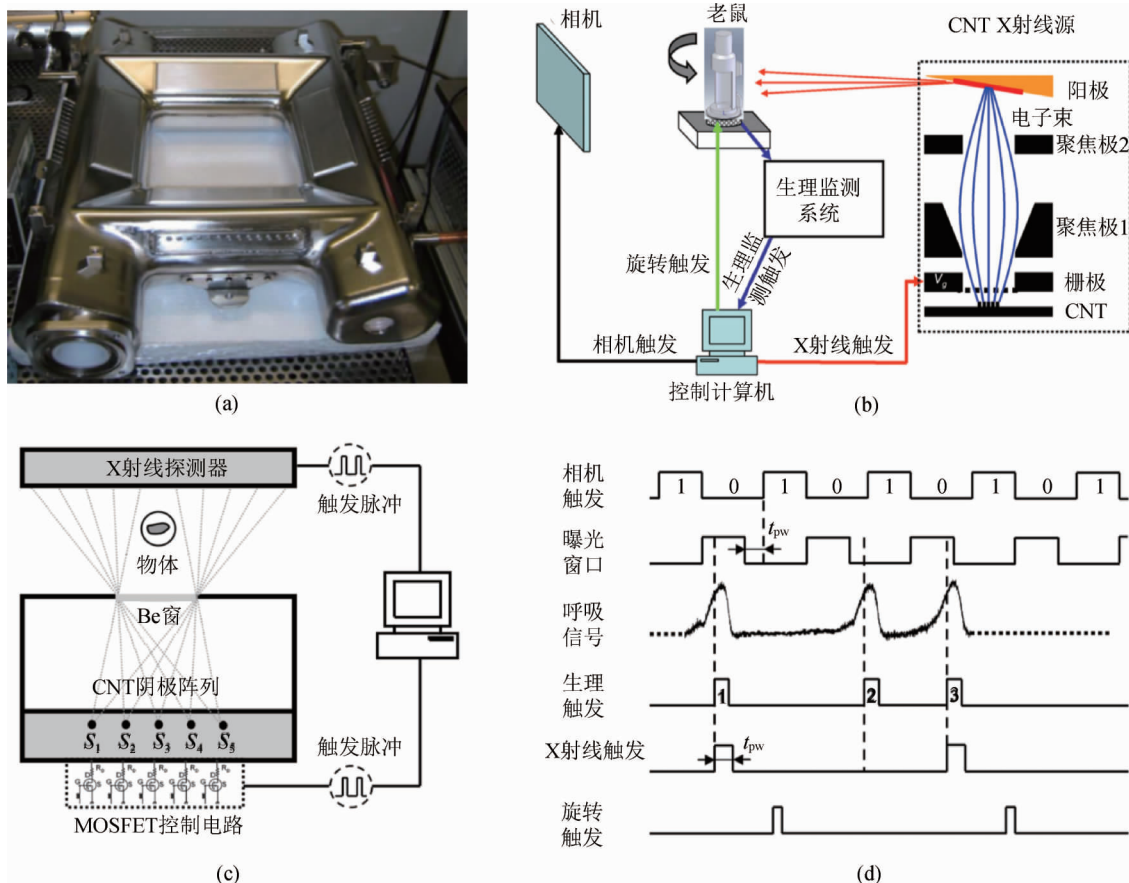
国内在医用冷阴极 X 射线管方面也开展了大量前期工作,中科院深圳先进技术研究院报道了 CNTs 冷阴极 X 射线二维成像效果;东南大学报道了基于 CNTs 的脉冲式线扫描系统的研究工作,可对兔子、小白鼠进行初步成像<sup>[63]</sup>;中山大学研制的平板 X 射线源,其采用晶体管寻址方法控制不同发射位点的电子束开关,获得大面积平板式 X 射线源,该类型射线源在开发新型医用 CT 成像系统方面优势明显,目前已成功实现了 4 英寸冷阴极 X 射线管的研发工作,样机结构原理和实物分别如图 6(a)、(b)所示<sup>[64]</sup>,对 CNTs 冷阴极 X 射线产品开发具有重要参考价值。北京真空电子技术研究所开发了集成栅控和非集成栅控 CNTs 冷阴极电子源分别如图 6(c)、(d)所示,对应的射线管结构如图 6(e)所示<sup>[65]</sup>。

### 5.2 在工业检测领域内的应用

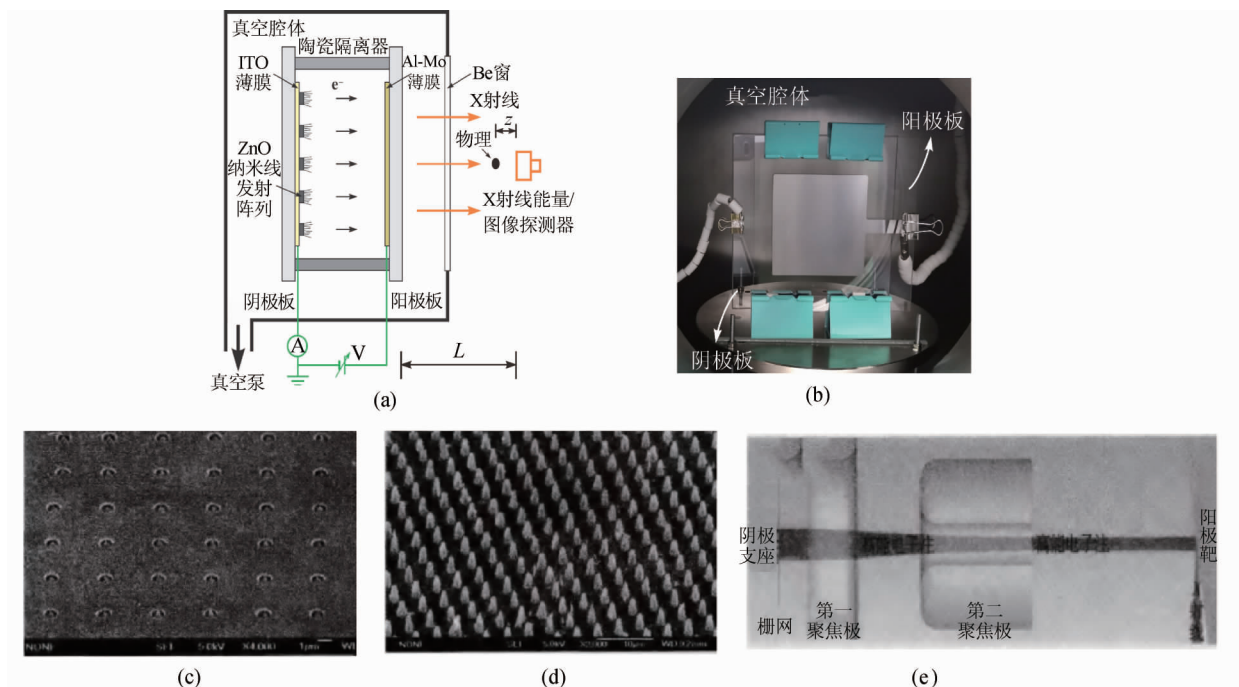
CNTs 冷阴极 X 射线管在工业检测方面也有两个主要开展研究的方向:①利用冷阴极电子发射方向集中的特点,开发微米、纳米级空间分辨能力的高端 X 射线管,应用于芯片缺陷、电池短路、岩芯气孔分布、金属焊缝等方面检测;②利用 CNT 脉冲发射电流密度高、能耗小、易集成特点开发便携式 X 射线检测设备。

在高分辨 CNTs 冷阴极 X 射线管方面,国家纳米科学中心采用动态真空技术,研发了开放式微焦点 X 射线管,实验样机如图 7(a)所示;该射线源的阳极电压最高为 80 kV,结合精细的静电聚焦和薄膜阳极靶面结构,获得空间分辨能力优于 10  $\mu$ m 的成像效果,如图 7(b)所示。该类产品可用于针对芯片和电池生产过程中引线的焊接质量和电池内部缺陷进行高分辨成像等场景。在大功率脉冲式 X 射线管方面,电子科技大学报道了封闭式 X 射线管的研制情况,其阴极脉冲总发射电流达 280 mA,等效焦斑尺寸为 0.24 mm $\times$ 0.22 mm,可实现对 0.1 mm





(a),(c)分布式冷阴极 X 射线样机和成像原理;(b),(d)小型动态 CT 结构和成像控制原理图  
图 5 CNT 冷阴极 X 射线源在生物医疗领域内的应用进展

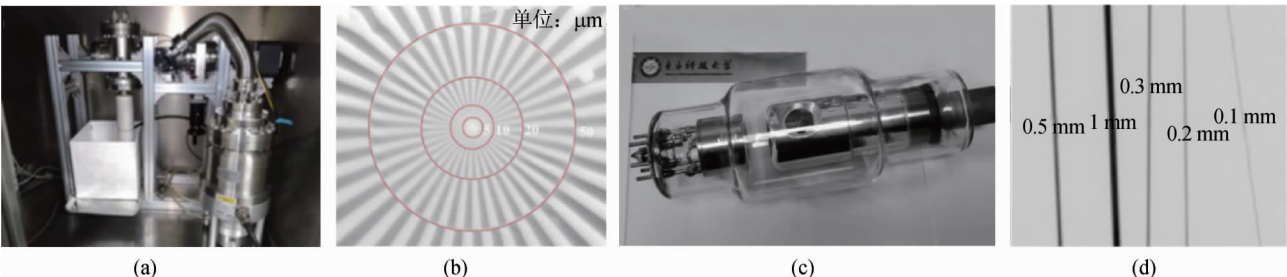


(a),(b)中山大学研制的 4 英寸平板 X 射线源原理和实物图;(c)-(e)北京真空电子技术研究所开发的集成栅控、非集成栅控 CNTs 阴极阵列及设计的 X 射线管结构

图 6 国内 CNT 冷阴极 X 射线源在医疗领域内的应用

钨丝成像,射线管结构和成像效果如图 7(c)、(d)所示<sup>[15]</sup>。其可用于常规的金属零件和体积较工件焊缝的质量检测,同时,在脉冲式 X 射线管方面,日本筑波公司近些年推出一款基于 CNTs 的便携式脉冲 X 射线无损检测设备,其工作电流为 3 mA,电压

为 150 kV,最窄脉冲为 0.1~2  $\mu$ s,焦斑为 1 mm,主要用于管道、线缆和水泥墙内电缆的无损检测。该产品充分利用冷阴极响应速度快的优势,并采用电池供电,在便携式无损检测领域内应用效果良好。



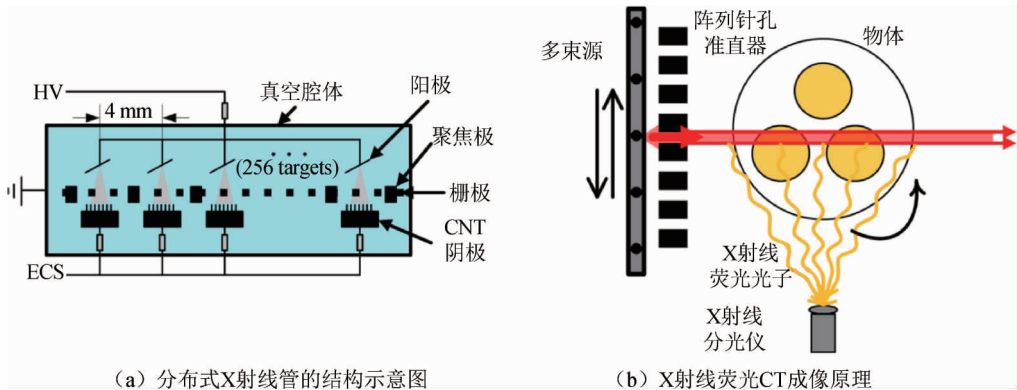
(a),(b)国家纳米科学中心研制的动态真空微焦斑 X 射线源及检测效果;(c),(d)电子科技大学研制的大功率脉冲式 X 射线管及检测效果  
图 7 CNT 冷阴极 X 射线源在高分辨工业检测领域的应用

### 5.3 在安检领域的应用

基于分布式 X 射线管开发的安检机可以获得多角度影像,实现重构;利用小焦点、微焦斑冷阴极 X 射线管获得更高分辨率,同时根据是否有物体通过可实现快速开关,延长使用寿命,降低能耗,以及开发新型安检设备。

清华大学与常州新鸿电子有限公司在此领域联合开展多项研究,已经研发了具有七个焦点的 CNTs 阴极分布式 X 射线管,阴极电流可达 14 mA,最佳焦斑尺寸 0.6 mm×0.95 mm、电压 70 kV,可

实现静态层析成像<sup>[66]</sup>。针对可变焦斑的 CNT 阴极 X 射线管,实现了最高电压 110 kV、最大电流 70 mA,可实现四种焦斑尺寸,满足不同应用场景<sup>[58]</sup>;基于 CNTs 分布式 X 射线管开发 X 射线荧光 CT 的研究进展,利用 256 个射线束成功实现了对有机物中重金属纳米颗粒的 X 射线荧光 CT 成像,根据 X 射线荧光可以确定待检测物品内部的元素组分,实现对物品安全检测,其 X 射线管结构和成像原理分别如图 8(a)和 8(b)所示<sup>[67]</sup>。



(a) 分布式 X 射线管的结构示意图 (b) X 射线荧光 CT 成像原理  
图 8 分布式 CNTs 冷阴极 X 射线管在安检领域内的应用

### 6 CNTs 冷阴极 X 射线管的未来发展方向

虽然 CNTs 冷阴极 X 射线管仍需要在稳定性、发射电流密度和封接工艺方面改进,但 CNTs 优良电子发射性能已在行业内逐步形成共识,且现有成果已证实其是未来 X 射线技术发展的重要方向。伴随着各行业对 X 射线成像技术需求的提升,预期 CNTs 冷阴极 X 射线管将在以下三个方向迎来发展

机遇:①微米或亚微米分辨能力分辨成像。CNTs 纳米结构决定其可被看作理想的点状电子源,且结合场致电子发射高亮度特性和方向集中的优势,有望采用相对简单的聚焦结构实现更佳分辨能力,同时显著降低 X 射线管的成本和体积。②高速脉冲 X 射线管。现有的实验结果表明,场致电子发射的响应时间可以达到飞秒量级,但由于电子束打靶时

间展宽,对应 X 射线发射时间有望控制在纳秒量级。这为超快 X 射线的产生提供了一种新思路,可对生命体内的生理过程实现动态成像和针对超快物化反应过程进行分析等。③分布式 X 射线管。目前静态 CT 被认为是第六代系统的主流技术方向,而分布式 X 射线管作为重要的光源部件,对响应速度和集成度方面都提出新的要求,CNTs 冷阴极 X 射线管在该方向的应用已经被成功尝试,优势明显。

总之,相对于传统的热阴极 X 射线技术,基于 CNTs 冷阴极 X 射线管采用电场调控电子发射,在电子束品质、响应速度、电子聚焦结构等方面具有显著优势,是实现新型高时空分辨、低剂量 X 射线管的有效方案。同时,CNTs 冷阴极 X 射线管的研制依赖于新材料、新工艺、新产品和新应用全链条的协同发展,需要学术界和产业界更加紧密的配合才能获得快速发展。

## 参 考 文 献

- [1] Rontgen. On a New Kind of Rays [J]. *Nature*, 1895, 1369(69):274—276.
- [2] Michael Shentcis, Adam K Budniak, Xihang Shi, *et al.* Tunable Free-Electron X-Ray Radiation from van der Waals Materials [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14:686—692.
- [3] Linda C P Croton, Kaye S Morgan, David M Paganin, *et al.* In situ Phase Contrast X-Ray Brain CT [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8:11412.
- [4] Ralf F Ziesche, Tobias Arlt, Donal P Finegan, *et al.* 4D Imaging of Lithium-Batteries Using Correlative Neutron and X-Ray Tomography with a Virtual Unrolling Technique [J]. *Nature Communications*, 2020, 11:777.
- [5] Jorge S Almeida, Lucilia A Meira, Maiara S Oliveira, *et al.* Direct Multielement Determination of Cd, Pb, Fe, and Mn in Ground Coffee Samples Using Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry [J]. *X-Ray Spectrometry*, 2021, 50:2—8.
- [6] 赵宝升,吴川行,盛立志,等. 基于 X 射线的新一代深空无线通信[J]. *光子学报*, 2013, 42(7):801—804.
- [7] 张宇,袁杰,尚吉杨,等. 应用于深空通信的 X 射线系统[J]. *数字技术与应用*, 2019, 37(4):19—20.
- [8] Yang J, Wik D R, Zezas A, *et al.* Evolution of High-Mass X-Ray Binaries in the Small Magellanic Cloud[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2019, 340:46—49.
- [9] 张富治,盛兴,王瑞海,等. X 射线 CT 球管的研制进展[J]. *真空电子技术*, 2016, (1):7—10.
- [10] Maie A R, Kajumba N, Guggenmos A, *et al.* Water-Window X-Ray Pulses from a Laser-Plasma Driven Undulator[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10:5634.
- [11] Tetsuya Ishikawa. Accelerator-Based X-Ray Sources: Synchrotron Radiation, X-Ray Free Electron Lasers and Beyond [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2019, 377(2147):20180231.
- [12] Jin Limin, Jia Wenbao, Hei Daqian, *et al.* Development of an X-Ray Tube with Two Selective Targets Modulated by a Magnetic Field[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90:083105.
- [13] Fowler R H, Nordheim L. Electron Emission in Intense Electric Fields[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1928, 119(781):173—181.
- [14] Richard J Parmee, Clare M Collins, William I Milne, *et al.* X-Ray Generation Using Carbon Nanotubes [J]. *Nano Convergence*, 2015, 2:1—27.
- [15] Chi Li, Xu Zhou, Feng Zhai, *et al.* Carbon Nanotubes as an Ultrafast Emitter with a Narrow Energy Spread at Optical Frequency [J]. *Advanced Materials*, 2017, 31(45):1701580.
- [16] Djuzhev N A, Demin G D, Gryazneva T A, *et al.* Investigation of the Concept of a Miniature X-Ray Source Based on Nanoscale Vacuum Field-Emission Triode Controlled by Cut-off Grid Voltage[C]. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering(EIConRus)*, 2018.
- [17] Houdellier F, L de Knoop, C Gatel, *et al.* Development of TEM and SEM Highbrightness Electron Guns Using Cold-Field Emission from a Carbon Nano Tip[J]. *Ultramicroscopy*, 2015, 151:107—115.
- [18] Zhang Siyuan, Zhang Daoshu, He Ke, *et al.* High-Performance X-Ray Source Based on Graphene Oxide-Coated Cu<sub>2</sub>S Nanowires Grown on Copper Film[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31:485202.
- [19] Avachat Ashish V, Wesley W Tucker, Carlos H C Giraldo, *et al.* Looking Inside a Prototype Compact X-Ray Tube Comprising CNT-Based Cold Cathode and Transmission-Type Anode [J]. *Radiation Research*, 2020, 193:497—504.
- [20] Han Yuchen, Shen Yan, Zhan Runze, *et al.* Study on Pyramidal Molybdenum Nanostructures Cold Cathode with Large-Current Properties Based on Self-Assembly Growth Method[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12:35354—35364.
- [21] Wang Libin, Zhao Yangyang, Zheng Keshuang, *et al.* Fabrication of Large-Area ZnO Nanowire Field Emitter Arrays by Thermal Oxidation for High-Current Application[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 484:

966—974.

- [22] Hong X D, Zheng H R, Liang D. Stable Electron Field Emission from Graphene/Hexagonal Boron Nitride Hybrid Structure [J]. *Materials Letters*, 2020, 277: 128356.
- [23] Zhu W, Kochanski G P, Jin S. Low-Field Electron Emission from Undoped Nanostructured Diamond [J]. *Science*, 1998, 282: 1471—1473.
- [24] Takahiro Yano, Shinji Ohtani, Satomi Kondo, *et al.* Electron Emission from h-BN Films Codoped with Mg and O Atoms [J]. *Thin Solid Films*, 2013, 546: 53—57.
- [25] 郭亚杰, 狄云松, 计吉焘, 等. 多孔石墨烯海绵边缘场发射特性研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2019, 39(7): 604—608.
- [26] Takashi Suemasu, Koji Uemuraa. Stability of Cross-Shaped Electron Beam in a Vacuum Magnetic Sensor with a p-Si Field Emitter Tip [J]. *Vacuum*, 2019, 168: 108858.
- [27] 罗登, 李兴辉, 张强, 等. 场发射 X 射线管电子光学系统的设计和研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(3): 242—245.
- [28] Byoung Tae Parka, Yoon Ho Song, Yong Hwan Ryu, *et al.* Carbon-Coated SiC Nanowires: Direct Synthesis from Si and Field Emission Characteristics [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 271: 99—104.
- [29] 崔云康, 张晓兵, 雷威, 等. 大电流碳纳米管场发射阴极研究 [J]. *强激光与离子物理*, 2013, 25(6): 1509—1512.
- [30] Shang Hyeon Park, Yong Churl Kim, Chang Soo Lee, *et al.* A 46-inch Diagonal Carbon Nanotube Field Emission Backlight for Liquid Crystal Display [J]. *Carbon*, 2015, 91: 304—310.
- [31] Gao Jingyun, Zhao Qing, Zhu Rui, *et al.* Ultrahigh Field Emission Current Density from Nitrogen-Implanted ZnO Nanowires [J]. *Nanotechnology*, 2010, 21: 095701.
- [32] Jiang Kaili, Wei Wei, Wei Yang, *et al.* LaB<sub>6</sub> Tip-Modified Multiwalled Carbon Nanotube as High Quality Field Emission Electron Source [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89: 203112.
- [33] Chen Jing, Cui Yunkang, Zhao Dewei, *et al.* Stable Field Emission Lamps Based on Well-Aligned BaO Nanowires [J]. *RSC Advances*, 2014, 4: 22246.
- [34] Sumio Iijima. Helical Microtubes of Graphitic Carbon [J]. *Nature*, 1991, 354(7): 56—58.
- [35] Milne W I, Teo K B K, Chhowalla M, *et al.* Electrical and Field Emission Investigation of Individual Carbon Nanotubes from Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition [J]. *Diamond and Related Materials*, 2003, 12: 422—428.
- [36] Seong Chu Lim, Dae Sik Lee, Ha Kyu Choi, *et al.* Field Emission of Carbon-Nanotube Point Electron Source [J]. *Diamond & Related Materials*, 2009, 18: 1435—1439.
- [37] Sung Hwan Heo, Aamir Ihsan, Seung Hwa Yoo, *et al.* Stable Field Emitters for a Miniature X-Ray Tube Using Carbon Nanotube Drop Drying on a Flat Metal Tip [J]. *Nano Express*, 2010, 5: 720—724.
- [38] Hironobu Machida, Shin-ichi Honda, Shunjiro Fujii, *et al.* Effect of Electrical Aging on Field Electron Emission from Screen-Printed Carbon Nanotube Film [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(2): 867—869.
- [39] Sridhar S, Ge L, Tiwary C S, *et al.* Enhanced Field Emission Properties from CNT Arrays Synthesized on Inconel Superalloy [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6: 1986—1991.
- [40] Zhang Y, Liao M X, Deng S Z, *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: 3299—3306.
- [41] Gurjinder Kaura, Narasimha Vinod Pulagaraa, Raj Kumar, *et al.* Metal Foam-Carbon Nanotube-Reduced Graphene Oxide Hierarchical Structures for Efficient Field Emission [J]. *Diamond & Related Materials*, 2020, 106: 107847.
- [42] 刘梦龙, 李小兵, 周俊涛, 等. 基于碳纳米管场致发射的大功率脉冲 X 射线管 [J]. *真空电子技术*, 2019, (6): 89—93.
- [43] Jae Won Hwang, Chan Bin Mo, Hyun Kyu Jung, *et al.* Field Emission Behavior of Carbon Nanotube Yarn for Micro-Resolution X-Ray Tube Cathode [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, 13: 7386—7390.
- [44] Li Zhenjun, Yang Xiaoxia, He Feng, *et al.* High Current Field Emission from Individual Nonlinear Resistor Ballasted Carbon Nanotube Cluster Array [J]. *Carbon*, 2015, 89: 1—7.
- [45] Arun Thapa, Yuba Raj Poudel, Rui Guo, *et al.* Direct Synthesis of Micropillars of Vertically Aligned Carbon Nanotubes on Stainless-Steel and Their Excellent Field Emission Properties [J]. *Carbon*, 2021, 171: 188—200.
- [46] Je Hwang Ryu, Na Young Bae, Hye Mi Oh, *et al.* Stabilized Electron Emission from Silicon Coated Carbon Nanotubes for a High-Performance Electron



- Source[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2011, 29(02B120):1—125.
- [47] Jun Mok Ha, Hyun Jin Kim, Hamid Saeed Raza, *et al.* Highly Stable Carbon Nanotube Field Emitters on Small Metal Tips Against Electrical Arcing [J]. Nanoscale Research Letters, 2013, 8:355.
- [48] Yang Xiaoxia, Li Zhenjun, He Feng, *et al.* Enhanced Field Emission from a Carbon Nanotube Array Coated with a Hexagonal Boron Nitride Thin Film[J]. Small, 2015, 11(30):3710—3716.
- [49] Li Zhenjun, Bai Bing, Li Chi, *et al.* Efficient Photo-Thermionic Emission from Carbon Nanotube Arrays [J]. Carbon, 2016, 96:641—646.
- [50] Li Chi, Li Zhenjun, Chen Ke, *et al.* Edge Effect Enhanced Photo-Thermionic Emission from a Carbon Nanotubes Array [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110:093105.
- [51] Son B H, Park D J, Ahn Y H. Electronic Control of Ultrafast Field Emission in Carbon Nanotube Gaps[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115:163102.
- [52] 赵江, 湛静, 王德波. 基于碳纳米管冷阴极 X 射线管电子源研究进展[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(11):681—687.
- [53] H Sugie M Tanemura, V Filip, K Iwata, *et al.* Carbon Nanotubes as Electron Source in an X-Ray Tube[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(17):2578—2580.
- [54] Liu Zejian, Yang Guang, Lee Yueh Z, *et al.* Carbon Nanotube Based Microfocus Field Emission X-Ray Source for Microcomputed Tomography [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89:103111.
- [55] Wang Sigen, Calderon Xiomara, Peng Rui. A Carbon Nanotube Field Emission Multipixel X-Ray Array Source for Microradiotherapy Application[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98:213701.
- [56] Parka Jin-Seok, Kim Jong-Pil, Noh Young-Rok, *et al.* X-Ray Images Obtained from Cold Cathodes Using Carbon Nanotubes Coated with Gallium-Doped Zinc Oxide Thin Films[J]. Thin Solid Films, 2010, 519:1743—1748.
- [57] Sora Jun-Tae, Park Kang, Jeong Jin-Woo, *et al.* A Fully Closed Nano-Focus X-Ray Source with Carbon Nanotube Field Emitters[J]. IEEE Electron Devices Letters, 2018, 39:1936—1939.
- [58] 唐华平, 陈志强, 刘昂, 等. 基于碳纳米管场致发射阴极的可变焦 X 射线管[J]. 核技术, 2020, 43(3):15—20.
- [59] Zhang J, Yanga G, Leeb Y Z, *et al.* A Multi-beam X-Ray Imaging System Based on Carbon Nanotube Field Emitters[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6142:614204.
- [60] Sprenger F, Calderon-Colonb X, Chenga Y, *et al.* Distributed Source X-Ray Tube Technology for Tomosynthesis Imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7622:76225M.
- [61] Cao G, Lee Y Z, Peng R, *et al.* A Dynamic Micro-CT Scanner Based on a Carbon Nanotube Field Emission X-Ray Source[J]. Physics in Medicine and Biology, 2009, 54:2323—2340.
- [62] Hyun Jin Kim, Hyun Nam Kim, Hamid Saeed Raza, *et al.* An Intraoral Miniature X-Ray Tube Based on Carbon Nanotubes for Dental Radiography[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48:799—804.
- [63] 刘春毅. 基于冷阴极 X 射线源的脉冲式线扫描系统的研究[D]. 南京:东南大学, 2015:26.
- [64] Wang Libin, Xu Yuan, Cao Xiuqing, *et al.* Diagonal 4-inch ZnO Nanowire Cold Cathode Flat-Panel X-Ray Source-Preparation and Projection Imaging Properties [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021, 68(3):338—345.
- [65] 李兴辉, 胡银富, 蔡军, 等. 场发射阴极微焦点 X 射线管初步研究[J]. 真空电子技术, 2016, (1):5—6.
- [66] 唐华平, 陈志强, 秦占峰, 等. 具有七个焦点的碳纳米管阴极分布式 X 射线源[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(5):406—413.
- [67] Chen Zhiqiang, Zhang Siyuan, Li Liang. Experimental Demonstration of X-Ray Fluorescence CT Using a Spatially Distributed Multi-Beam X-Ray Source[J]. Frontiers in Physics, 2020, 8:587625.

收稿日期:2021—10—27

#### 作者简介:



李振军(1981—),男,高级工程师,研究方向为碳纳米管真空电子技术与器件;E-mail: lizhenjun@nanocr.cn。

通讯作者:戴庆, E-mail: daiq@nanocr.cn。