可集成真空微纳电子器件发展与展望

韩熙隆[1]，覃奕垚[2]，章灿然[1]，陶 晖[1,3]，王琦龙[1*]

（1. 东南大学 电子科学与工程学院，南京 211102；
2. 昆山国力电子科技股份有限公司，江苏 昆山 215300；3. 南京三乐集团有限公司，南京 211800）

摘要：真空微纳电子器件（VMNEDs）凭借其高速运行、耐高温、抗辐射及极端环境适应性等独特优势，已成为极端环境电子学领域的研究热点。本文系统综述了真空微纳电子器件的发展历程、理论基础、技术进展及未来前景，重点探讨其作为传统真空管与固态器件桥梁作用的潜力。将 VMNEDs 与微机电系统（MEMS）和光子电路集成，有望推动航空航天、能源与量子技术领域的多功能高可靠性系统发展。结合理论见解与实验成果，提出了面向极端环境的新一代电子器件的技术路线图。

关键词：真空微纳电子器件；场发射；纳米沟道；弹道输运；真空电子学

中图分类号：TB71 **文献标志码：**A **文章编号：**1006−7086（2025）03−0302−13

DOI：10.12446/j.issn.1006-7086.2025.03.003

Development and Prospects of Scalable Vacuum Micro-nanoscale Electronic Devices

HAN Xilong[1], QIN Enyao[2], ZHANG Canran[1], TAO Hui[1,3], WANG Qilong[1*]

**（1. School of Electronic Science and Technology, Southeast University, Nanjing 211102, China;
2. Kunshan GLVAC Electronic Technology Co., Ltd., Kunshan 215300, Jiangsu, China;
3. Nanjing Sanle Group Co., Ltd., Nanjing 211800, China）**

Abstract: Vacuum micro-nanoscale electronic devices（VMNEDs）, a class of emerging devices combining vacuum electronics with nanotechnology, have garnered significant attention for their excellent high-speed performance, high-temperature tolerance, radiation resistance, and extreme-environment compatibility. This review systematically analyzes the evolution, theoretical frameworks, technological breakthroughs, and future trajectories of VMNEDs, highlighting their potential to merge traditional vacuum tube advantages with solid-state device miniaturization. Leveraging field emission theory and nanoscale vacuum channel designs, VMNEDs enable ballistic electron transport under atmospheric pressure, achieving low-voltage operation（below 10 V）and ultrahigh-frequency responses（cutoff frequencies up to 0.46 THz）. Structural innovations, categorized into planar and vertical architectures, exhibit distinct merits: planar devices（e.g., coplanar graphene-based transistors）achieve sub-120 mV/dec subthreshold swing and CMOS compatibility, while vertical configurations（e.g., Spindt cathodes, internal/external channel structures）deliver high current densities（>3 000 A/cm²）and robust stability at 600 ℃ or under 30 krad radiation. Material advancements further drive performance: selectively etched metallic nanotips achieve field enhancement factors exceeding 6 000, wide-bandgap semiconductors（SiC, GaN）integrate low electron affinity with intrinsic radiation hardness, and low-dimensional materials（carbon nanotubes, graphene）optimize emission efficiency through surface functionalization of work functions. Despite progress, challenges remain in process uniformity, long-term reliability（e.g., tip degradation, material oxidation）, and CMOS integration. Recent nanofabrication breakthroughs, such as umbrella-shaped cathodes and vertical air-bridge structures, have improved current density and switching speeds. Experimental validation under extreme conditions（including 1×10^{14} n/cm^2 neutron irradiation and >500 ℃ operation）confirms VMNED resilience, positioning them for space applications. Emerging uses span high-frequency communication, deep-space ion propul-

收稿日期：2025−03−03

基金项目：国家自然科学基金（92364108）

作者简介：韩熙隆，硕士研究生。E-mail: 220231770@seu.edu.cn

通信作者：王琦龙，博士，教授。E-mail: northrockwql@seu.edu.cn

sion, radiation-hardened electronics, and biomedical sensing: GaN-based nanoscale air-channel diodes show nanosecond response times, while vacuum-gated transistors maintain performance after radiation exposure. Future research should focus on material hybridization (e.g., heterostructured cathodes), 3D structural innovations, and scalable manufacturing to address limitations. Integrating VMNEDs with MEMS and photonic circuits unlocks multifunctional, high-reliability systems for aerospace, energy, and quantum technologies. This review synthesizes theoretical insights and empirical achievements, providing a roadmap for advancing VMNEDs toward practical implementation in next-generation extreme-environment electronics.

Key words: vacuum micro-nanoscale electronic devices; field emission; nanoscale channels; ballistic transport; vacuum electronics

0 引言

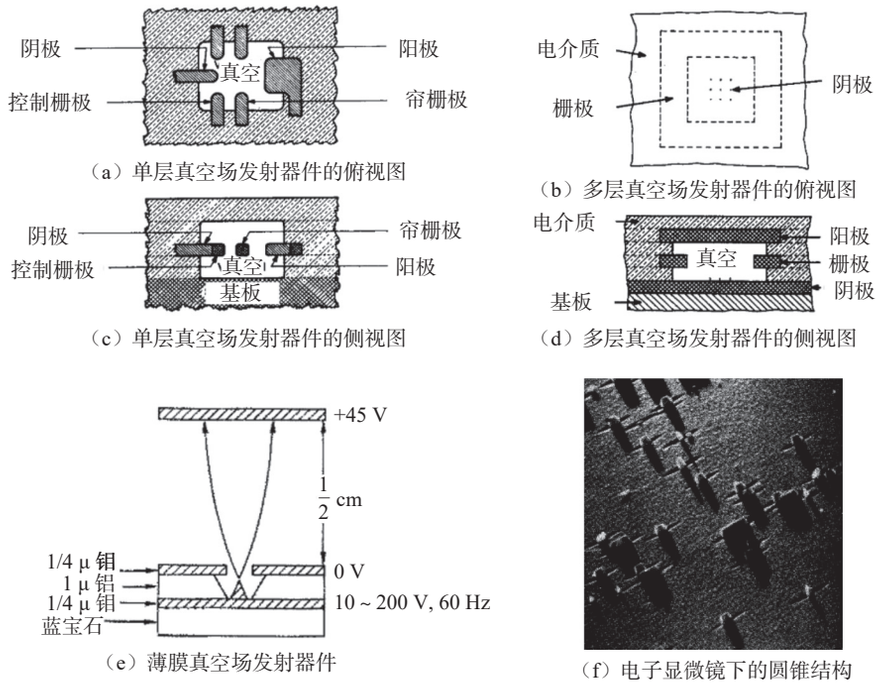
真空管, 这一电子器件发展史上的重要发明, 自 20 世纪初诞生以来, 经历了辉煌的发展与变迁。早期, 真空管作为放大电信号的关键元件, 在无线电通信、广播等领域大放异彩, 其强大的信号放大能力使得远距离通信成为可能, 推动了电子技术的飞速发展。然而, 随着科技的进步, 固态半导体晶体管的出现, 给真空管带来了巨大的冲击。晶体管凭借体积小、功耗低、稳定性好等优势, 逐渐在众多领域取代了真空管, 成为电子设备中的主流元件[1]。从小型电子产品到大型计算机系统, 晶体管的广泛应用使得设备性能不断提升, 功能更加多样化。

尽管在大多数领域真空管已被淘汰, 但在一些专业领域, 真空管仍具有不可替代的地位。在音频领域, 真空管放大器因其独特的音质特点, 受到音响发烧友的推崇[2]。在高频微波和大功率系统中, 真空管也能展现出其卓越的性能优势, 满足特殊应用的需求[3–5]。传统真空管与固态晶体管相比, 凭借其独特的电荷载体传输机制, 具有竞争优势。在真空管中, 电子以弹道输运的形式从阴极向阳极发射, 而晶体管则依赖于电子和空穴在半导体材料中的复合运动。这一特性使真空管在高频和高速应用中表现尤为突出。此外, 真空管具备承受极高电压和电流密度的能力, 从而实现更大的功率输出, 满足高能耗应用场景的需求。相比之下, 固态晶体管在高压和大电流条件下容易受到限制, 其功率输出能力相对受限。除此之外, 在极端环境如高温、辐射等严苛环境中, 真空管展现出更强的适应性。电子在真空管中的输运特性使其能够避免单粒子效应、电离辐射、位移损伤[6-7] 等影响, 使其能够在航天和核工业等领域发挥不可替代的作用。

摩尔定律已经沿用了数十年, 大规模集成电路的广泛应用和固态晶体管器件的发展相辅相成, 固态晶体管的小体积、易于集成也使其逐步代替了真空管。如果将真空管的尺度缩小到微纳级别, 利用相对成熟的固态晶体管加工制备工艺, 那么加工出的“微纳真空管”就可以兼具真空管的高频、高功率以及固态晶体管的小尺寸易于集成特性。

1 小型化真空管——真空微电子器件

早在 1961 年, Shoulders 等[8] 首次利用电子束激活的微加工技术, 基于场发射机制(非热发射)制造了信号放大器件, 如图 1(a)所示。在此器件中仍沿用了传统真空管中的阴极-栅极-阳极结构, 此结构中的阴极电子发射单元不易小型化, 难以与其他结构相集成[9]。随后, 在 70 年代, 随着 Spindt 型阴极的出现, 上述的问题得到了很大程度的改善[10], 如图 1(b)所示。Spindt 阴极由蓝宝石基底、钼-氧化铝-钼薄膜夹层、微米级的开口腔以及冷阴极钼发射锥组成。由于采用了冷阴极, 通过施加 10 ~ 200 V 电压, 器件获得较高的电流密度, 且经过连续一周测试后, 器件结构没有观察到明显退化, 证明其耐久性。在 1989 年, Kosmahl[11] 基于类似的 Spindt 阴极推导计算出了一种宽带分布式放大器, 频率范围为 10~300 GHz, 并且推导了基于这种结构的截止频率(由发射体尖端跨导和结构电容决定)。至此, 基本标志着所谓“真空微电子器件”的诞生, 但在当时, 多方面的原因阻碍了这类器件的进一步发展。其一, 这类器件的工作电压基本在几十到上百伏, 与芯片中一般工作在 10 V 以下的器件无法集成。其二, 阴阳极之间的距离较长, 仍然需要真空封装以减少电子在运动过程中与其他粒子的碰撞, 或避免气体电离导致放电烧毁器件。其三, 受限于工艺加工难度, 难以制造出小尺度的阴极电子发射源, 阻碍了整体器件尺度的进一步缩小。即使到了 2000 年左右, 也很难通过平面微加工的工艺制造出电极间距小于 1 μm 的器件[12]。此时, 进一步减小真空微电子器件的尺寸已经成为主流的研究方向, 如果能将电子输运的通道尺寸缩减到纳米尺度, 这类真空微纳电子器件才有实际应用在功能电路中的可能。



（a）单层真空场发射器件的俯视图　（b）多层真空场发射器件的俯视图

（c）单层真空场发射器件的侧视图　（d）多层真空场发射器件的侧视图

（e）薄膜真空场发射器件　（f）电子显微镜下的圆锥结构

图 1　真空微电子器件

Fig. 1　Vacuum microelectronic devices

2　真空微纳电子器件的理论基础

2.1　平均自由程

在固态器件中，载流子（电子和空穴）的运动受到杂质、晶格缺陷等因素的影响，这些因素会导致载流子发生散射或碰撞。因此，平均自由程被定义为载流子在导电通道内两次碰撞之间能够移动的平均距离。这一概念同样适用于真空物理领域。在气体状态下，分子之间的碰撞决定了其运动特性。气体分子的平均自由程被定义为在特定温度和压力下，气体分子在连续两次碰撞之间所经过的平均路程[13]。这个值可以通过气体的麦克斯韦速度分布得出：

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} \qquad (1)$$

式中：k 为玻尔兹曼常数；T 为开氏温度；d 为分子有效直径；p 为气体压力。在常温常压下（$T = 300$ K、$p = 1.01\times10^5$ Pa），空气分子的平均自由程约为 68 nm，这也是一些研究中所采信的数据。但是针对于真空微纳电子器件，电子才是器件沟道中运动的粒子，相较于空气分子（直径在 10^{-10} m 量级），电子（直径为 10^{-15} m 量级）的直径小得多，电子和气体分子的碰撞与气体分子之间的相互碰撞不能一概而论。考虑到器件工作时，在电场作用下电子的速度远大于气体分子的热运动，近似将气体分子视为静止，则可推导出电子在气体中的平均自由程：

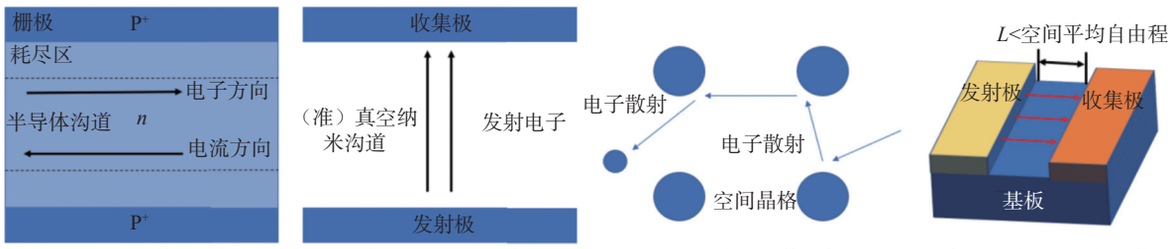
$$\bar{\lambda}_e = \frac{4kT}{\pi d^2 p} \qquad (2)$$

根据上述公式，计算可得同等条件下电子的平均自由程约为 378 nm。值得注意的是，这只是一个统计概念，如果实际在大气压力下电子在器件内部输运时几乎不与气体分子发生碰撞，为了达到真空管中电子束同样的输运情况[14]，尺寸应该远小于 378 nm，达到 50 nm 以下。也就是说，如果能将器件的尺寸缩小到纳米量级并且保持电子输运的通道在 50 nm 以下，就可以使器件在大气中近似实现弹道输运。

一方面，近似弹道输运可以提高发射电流的稳定性；另一方面可以避免同尺寸固态器件中因散射导致速度饱和的问题，如图 2 所示。这样的输运方式理论上可以使其工作频率高于同等沟道尺寸的固态电子器件[15-16]，为后续功能电路中的应用打下理论基础。

2.2　电子场发射

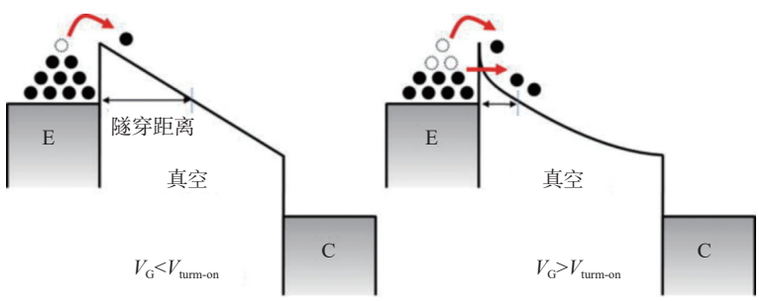
对真空微纳电子器件，主要沿用了传统真空电子器件的场发射理论，即阴极表面的电子在强电场作用下穿过阴极表面势垒从而在沟道中输运的过程[17-18]，其电子隧穿效应可以通过图 3[16] 定性说明。



（a）固态半导体器件结构　（b）真空微纳电子器件中电子输运方式　（c）固态半导体器件中电子输运方式　（d）真空微纳电子器件结构

图 2　载流子在固态器件与真空微纳电子器件中的输运方式

Fig. 2　Transport modes of charge carriers in solid-state devices and VMNEDs



（a）电压小于开启电压时的能带图（电子隧穿距离较长）　（b）电压大于开启电压时的能带图（能带弯曲电子较为容易实现发射）

图 3　电子场发射原理示意图

Fig. 3　Schematic diagram of electron field emission principle

1928 年, Fowler 等[19] 首次针对平面电子发射建立了场发射理论, 并推导了著名的 Fowler-Nordheim(F-N)公式[20–21], 后续的大量实验结果也与 F-N 曲线相吻合, 证明了冷阴极发射机制存在一种共性, 并且可以通过 F-N 公式合理解释。目前主流研究中所采信的 F-N 公式一般形式为:

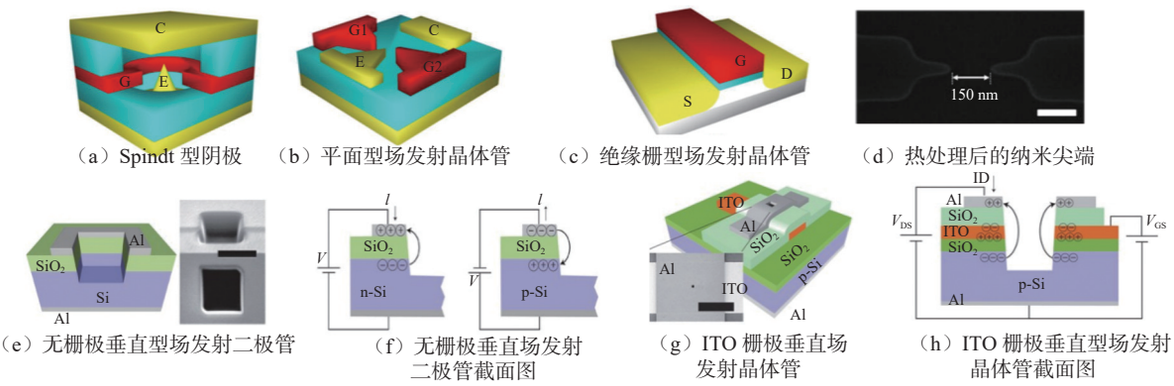
$$J_{FN}=A\frac{\beta^2V^2}{\Phi d^2}\exp\left(\frac{-B\Phi^{3/2}d}{\beta V}\right) \qquad (3)$$

式中: J_{FN}为场发射电流密度; A=1.56×10^{-6} A·V^{-2}·eV, B=6.83×10^{7} V·eV$^{-2/3}$·V·cm^{-1}, 为理论推导所得的发射常数; Φ 为发射体的功函数; $E=\frac{\beta V}{d}$ 为电场强度; V 为阴阳极之间所施加的电压; β为场增强因子, 与阴极发射体的形貌有关; d 为阴阳极间距。

在研究中, 一般会绘制出场发射器件测得的电流-电压(I-V)曲线以及对应的 F-N 拟合曲线($\ln(I/V^2)$-1/V), 以定量计算器件性能。但是在很多研究的数据分析中, F-N 拟合曲线并不是一条完美的直线, 因此也有很多文献对其进行了修正[20, 22–28], 包括针对低电场和高电场下电流的 WKB 近似修正、器件结构的修正、材料的修正、空间电荷限制效应的修正等。这些修正有助于进一步研究特定器件结构中的场发射效应。

3　真空微纳电子器件的研究现状

随着微纳加工技术的不断发展与成熟, 真空微纳电子器件的发展也进入了新的阶段, 器件内电子输运的沟道尺寸也真正降低到了纳米量级。在 2012 年, NASA 的 Han 等[16] 与匹兹堡大学的 Srisonphan 等[29] 分别研究制备出了“纳米真空沟道晶体管”以及“真空沟道金属氧化物半导体(MOS)场效应晶体管”。尽管命名方式大相径庭, 结构也具有很大差别, 但这两组器件具有里程碑式的意义。第一, 在这两组器件中, 阴-阳电极(有些研究中也仿照固态晶体管的命名方式, 称为源极和漏极; 或根据其原理称为发射极和收集极)之间的间距控制在纳米级别, 小于上述推导的电子在空气中的平均自由程; 第二, 他们的工作电压都在 10 V 以内, 使器件工作过程中电子的能量始终小于空气分子的第一电离能, 从而避免气体放电。这两点为接下来的研究奠定了坚实的基础。Han 提出了两种器件的结构形式, 分别是继承传统形式的 Spindt 型以及平面型场发射器件; 而 Srisonphan 着重研究了一种垂直结构的场发射器件。后续研究的大多数器件也基本沿用了这样的结构。这两种器件形式如图 4 所示。



（a）Spindt 型阴极 （b）平面型场发射晶体管 （c）绝缘栅型场发射晶体管 （d）热处理后的纳米尖端

（e）无栅极垂直型场发射二极管 （f）无栅极垂直场发射二极管截面图 （g）ITO 栅极垂直场发射晶体管 （h）ITO 栅极垂直型场发射晶体管截面图

图 4 平面型及垂直型纳米真空沟道晶体管

Fig. 4 Planar and vertical nanoscale vacuum transistor

图 4(a) ~ (d)中的器件都是具有栅极形式的三端器件; 而图 4(e) ~ (h)中的器件既给出了无栅极的二端器件形式又给出了 ITO 作为栅极的三端器件。在真空微纳电子器件的研究中, 如果栅极不额外施加偏置电压, 其对电子的控制作用不大, 栅极主要通过改变沟道中的电场分布来实现对发射电流的调控。这两组研究工作主要聚焦在他们的直流特性和作为三端器件的跨导以及相对应的截止频率上。前者在 20 V 的偏置电压下达到了 40 μA 的电流以及 4.2 V/°的亚阈值摆幅, 通过计算估计了其可以达到 0.46 THz 的截止频率, 远超固态晶体管; 而后者得到了一个小于 0.5 V 的开启电压, 开关比达到 500, 以及仅有 20 nS/μm 的跨导。这两项工作代表了真空微纳电子器件作为功能器件应用的一个大方向: 低功耗(相对于传统真空管)、高速晶体管。接下来本文将根据结构以及材料的不同分别介绍真空微纳电子器件的发展。

3.1 平面型器件

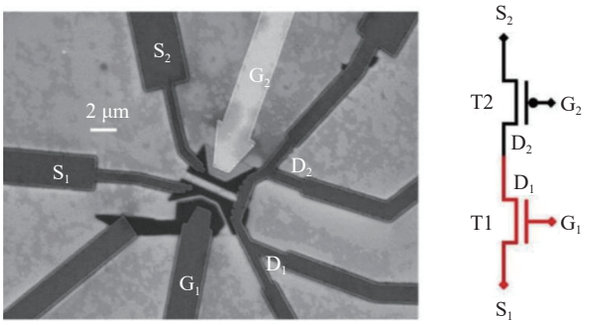
平面型器件通常指阴极、阳极和栅极处于同一个平面的器件, 平面型器件一般具有较小的发射电流以及较低的跨导, 以实现相对高的截止频率。平面型器件一般可以通过一次的图案化工艺形成结构, 与现有的微纳加工工艺兼容。

平面型的器件一般用作整流、开关、传感功能器件, 或作为样品研究其发射性能。Pescini 等[30]使用电子束光刻工艺以及湿法刻蚀, 在 SiO_2 基板上制备了侧栅极场发射三极管。通过改变栅极到阴极之间的距离, 研究了结构参数对于电学性能的影响, 器件最终达到了 nA 级的发射电流。Higuchi 等[31]制备了一种纳米尖端对的场发射二极管, 器件由近红外激光脉冲驱动, 由激光激发的电流在尖端对平面的发射结构中呈现出整流特性, 与传统真空二极管相同。尽管沟道长度超过了 100 nm, 但是电子输运时间经计算仍然快于 1 ps。利用同样的思路, 通过制备形貌不同的阴阳极, 研究人员制备了若干具有整流特性的场发射二极管。Chang 等[32-33]也通过光刻技术基于金属材料制备了阴阳极具有形貌差异的场发射二极管。器件的阴极由锯齿状的三角形金属电极构成, 而阳极由包围在阴极周围的半圆构成。这样的设计可以高效提高正/反电流比, 从而提高整流效率。2015 年, 北京大学的 Wu 等[34]基于石墨烯材料制备了平面场发射三极管, 通过调节施加在石墨烯阴极材料上的偏置电压, 器件的开关比可以达到惊人的 10^6, 工作电压同样在 10 V 以下且亚阈值摆幅为 120 mV/°, 但是工作电流只有 pA 量级, 不适合用作功率器件。萨勒诺大学的 Bartolomeo 等[35]通过单次光刻, 在 500 nm 的石墨烯沟道外制备了距离其 100 nm 的自对准栅极, 并通过实验验证了其在 1 V 以下的电压可以实现 35% 电导调制率, 在 10 mV 的阳极偏压下达到 0.5 mS/mm 的跨导。除此之外, 在器件加工过程中, 为了减少额外的寄生参数, 两个场发射三极管通过共阳极(漏极)的方式连接, 如图 5 所示。

为了减小平面场发射三极管的漏电流, Han 等[16, 36]基于 MOSFET 的结构制备了背栅极结构的场发射三极管。器件的阴极和阳极在同一平面上, 但是栅极在背面通过一层薄的氧化层隔开, 氧化层的厚度决定了阴极与栅极之间的距离。器件的工作电压约为 10 V, 截止频率经计算达到了 0.46 THz。器件的制备采用了成熟的 SOI 晶圆 MOSFET 兼容工艺。

2023 年, 南京信息工程大学的 Xu 等[37]针对不

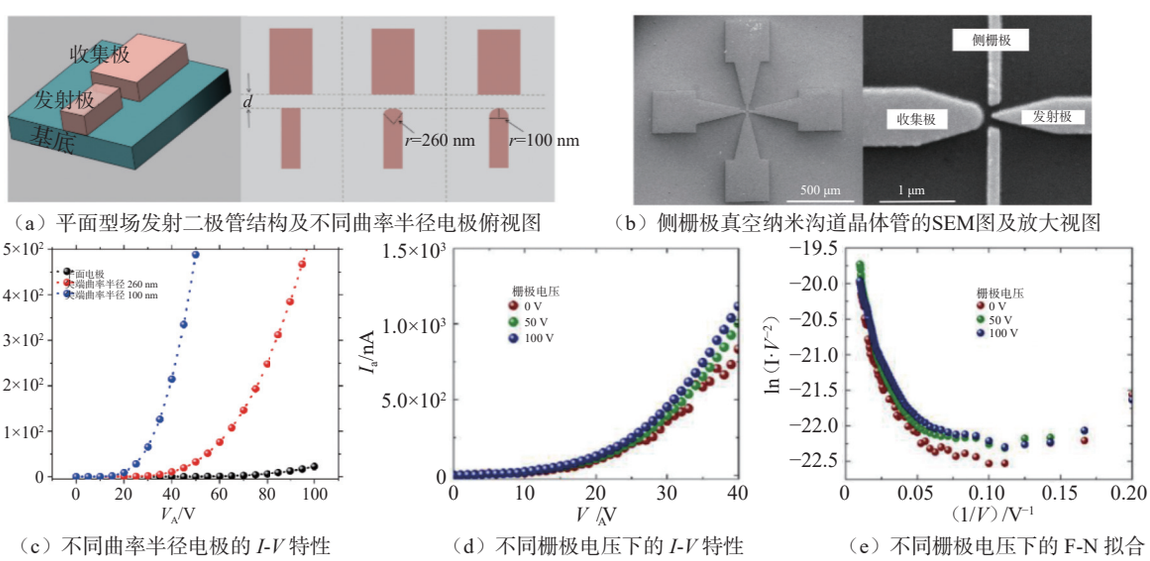
同的平面型结构分别制备了器件并结合仿真进行了深入研究, 如图 6[37] 所示。器件也通过成熟集成电路工艺, 包括电子束曝光、光刻、薄膜沉积以及剥离的步骤所制备, 从平面-平面的阴阳极结构开始逐渐改变其尖端半径并测量发射电流。实验证明尖端半径越小, 发射电流越大, 开启电压越小, 这与先前的文献报道相符合[38-39]。在尖端半径 100 nm 时, 开启电压达到了 20 V 左右, 电流达到 500 nA。除此之外, 作者团队在间距 150 nm 的阴阳极两侧通过施加双侧栅极实现了对发射电流的调控, 可以看作对于以往微米尺度下真空场发射三极管[12] 的小型化。但值得注意的是, 随着阴阳极的间距缩小以及阴极尖端半径的缩小, 器件在多次重复测试后存在尖端熔融的可能性, 不利于对器件稳定性要求较高的应用场景。



（a）通过阳极（漏极）连接的两个侧栅极石墨烯场发射三极管 SEM 图像　（b）等效电路[36]

图 5　基于石墨烯的平面场发射三极管

Fig. 5　Planar field emission transistor based on graphene



（a）平面型场发射二极管结构及不同曲率半径电极俯视图　（b）侧栅极真空纳米沟道晶体管的SEM图及放大视图

（c）不同曲率半径电极的 *I-V* 特性　（d）不同栅极电压下的 *I-V* 特性　（e）不同栅极电压下的 F-N 拟合

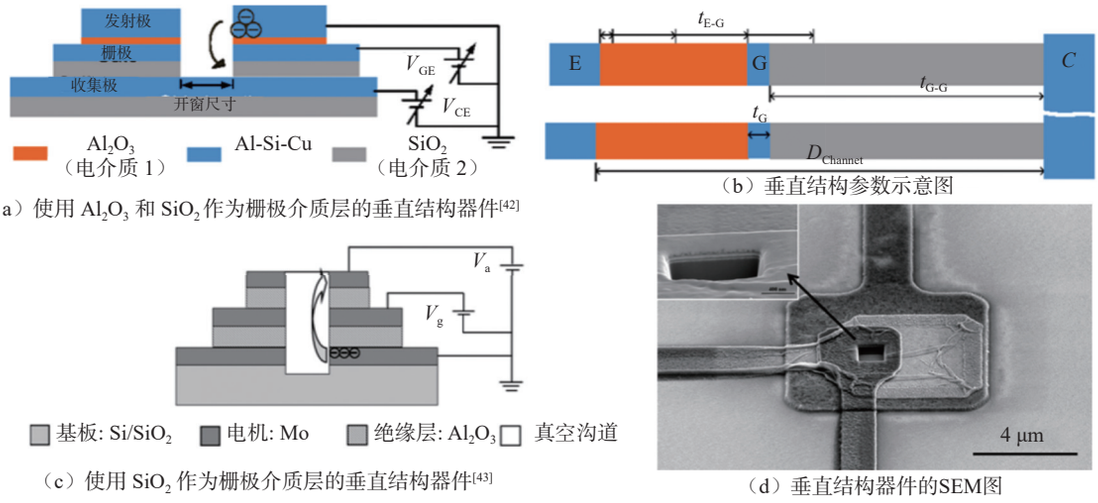
图 6　平面型场发射二极管的形貌优化研究

Fig. 6　Research on shape optimization of planar field emission diodes

3.2　垂直型器件

垂直型结构器件一般指阴极、阳极与栅极不在同一平面上, 一般呈从上到下的垂直型排列的器件。垂直型结构的器件一般具有较大的发射面积, 从而获得较大的发射电流, 但相对应的结构本征电容也较大, 相对于平面型器件来说截止频率会有所降低。且微纳尺度下的垂直型器件一般涉及多层结构的制备, 工艺更为复杂。早期的垂直型结构场发射二极管和三极管都基于在底部的一个阴极尖端、尖端上方环绕一圈的栅极, 以及最上方的阳极, 也就是 Spindt 型结构, 通过调节栅极电压来获得足以产生发射电流的电场强度。Bozler 等[40] 率先将这种结构的尺度降低到了纳米级别。距离阴极上方 80 nm 环绕栅极的直径大约为 160 nm, 器件达到了仅有 8 V 的开启电压以及 1 600 A/cm^2 的发射电流密度, 打破了以往 Spindt 结构器件的纪录。中国电科集团第十二研究所的研究人员针对 Spindt 结构器件进行了深入的研究, 分析了其技术进展、面临的问题以及应用进展, 并总结其可能适用于小电流、低能量、高可靠性的工作环境。

沿袭 Spindt 阴极结构的思路, 垂直型结构器件也较多在器件内侧形成纳米沟道, 如图 4 中的垂直型发射结构。与此结构相似的还有文献 [41-42] 所报道, 如图 7 所示。



（a）使用 Al_2O_3 和 SiO_2 作为栅极介质层的垂直结构器件[42]

（b）垂直结构参数示意图

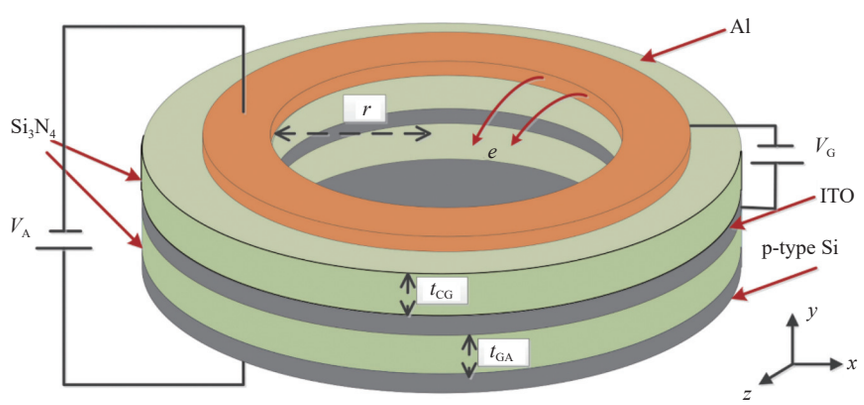
（c）使用 SiO_2 作为栅极介质层的垂直结构器件[43]

（d）垂直结构器件的SEM图

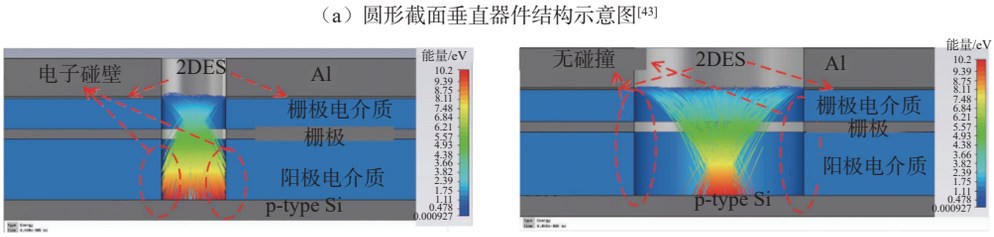
图 7　垂直型内侧沟道结构场发射晶体管

Fig. 7　Vertical inner channel field emission transistor

在图 7(a)中，沟道长度通过 SiO_2 电介质层的厚度进行控制，大约为 60 nm。通过改变阴极-栅极-阳极之间的距离，作者分别对四种不同结构参数的器件进行了仿真与测试，随着阴-栅距离缩短，栅极附近电场强度更大，表现为更加优秀的发射电流调控性能。图 7(b)中的器件具有 55 nm 的沟道尺寸，作者对其在真空和大气下的发射性能进行了验证。实验环境从 10^{-7} Pa 至 10^{5} Pa 变化，电流在同一个数量级中变化，足以证明其在大气下可以正常工作，与理论相一致。西安交通大学的 Shen 等[43] 制备了类似结构的圆形截面垂直型器件，如图 8 所示，其与图 4 中器件具有相同的五层结构，开启电压小于 3 V，且与栅极介质层的厚度有关。随着介质层厚度下降，开启电压也会随之下降。且经过仿真和实验双重验证，证明了这类器件的直流特性与内部沟道半径有关，在半径小于 20 nm 时，阴极发射的部分电子会与侧壁发生碰撞并被介质层吸收，导致电流下降严重，同时栅极屏蔽效应也会增强，在设计这类器件时需要考虑其深宽比及半径。



（a）圆形截面垂直器件结构示意图[43]



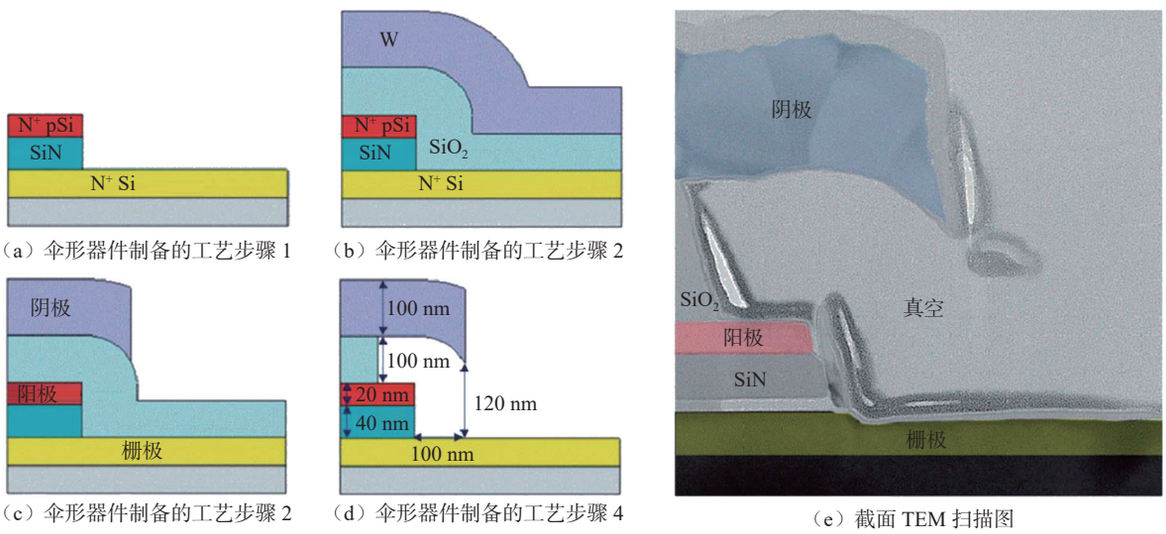
（b）内部沟道半径为 16 nm 的电子仿真轨迹示意图

（c）内部沟道半径为 40 nm 的电子仿真轨迹示意图

图 8　圆形截面垂直型场发射晶体管

Fig. 8　Circular cross-section vertical feld emission transistor

除了在内部的沟道进行发射的器件, 结合真空微纳电子器件的特性衍生出一种独有的器件形式: 外部沟道垂直型发射器件。如 Han 等[44] 在 2021 年发表的一篇论文中, 采用了一种伞状结构。通过对阴-阳极之间的电介质进行腐蚀, 得到了长度 100 nm 的沟道, 如图 9 所示。虽然其发射电流在 20 V 只达到了 100 nA, 但是工艺思路上的突破为后续同类型的器件奠定了扎实的基础。



（a）伞形器件制备的工艺步骤 1　（b）伞形器件制备的工艺步骤 2　（c）伞形器件制备的工艺步骤 2　（d）伞形器件制备的工艺步骤 4　（e）截面 TEM 扫描图

图 9　伞形场发射二极管

Fig. 9　Umbrella-shaped field emission diode

电子科技大学的 Wei 等[45-46] 也制备出了类似结构的伞状外部沟道垂直型场发射二极管。控制介质层的厚度为 50 nm, 并从外向内进行湿法刻蚀, 制备了 50 nm 的沟道以及相当大的发射面积, 同时通过采用 N 型掺杂的 GaN 材料作为发射阴极, 得到了 mA 级别的大电流, 并通过实验得到了 ns 级别的响应速度, 证明这类器件在高速、大功率应用上具有不错的前景。在文献 [47] 中进一步通过增加栅极实现了对此结构电流的调制作用。

此外, 还有一些在垂直结构中利用结构的异质结形成二维电子气作为主要电子源的工作, 通过提高阴极表面的电荷密度提高发射电流密度[48-49]。以及在微纳加工上结构较为复杂但是显著提高了电子收集率的垂直空气桥结构[50], 作者对其射频性能进行了测试, 并利用此器件进行了混频的尝试。类似 MOSFET 中的环绕栅(GAA)结构也存在于真空微纳电子器件的发展过程中[51-52], 即便其具有相当高的电子收集率, 但加工难度使其难以规模化集成, 不利于后续发展。

3.3　阴极材料

从 2.2 节中可以得知, 对于阴极材料来说, 功函数的值越小, 则理论发射电流将会越大。因此在材料的选择上, 一条主线就是使用更低功函数的发射材料; 而第二条主线则是采用能获得更小尖端半径的低维材料以获得更大的场强, 提高发射电流。

金属材料, 在场发射领域有着优异的性能, 因高导电性和可调控的场增强因子备受关注。2016 年, 研究人员通过选择性刻蚀制备铜纳米锥[53], 最小尖端直径达到 6 nm, 场增强因子可达 6 068, 开启电压低至 2 V/μm。2018 年, 在一项研究中通过制备二氧化钒纳米线, 在 10 nm 沟道长度下实现了 0.46 V 的低开启电压, 且高温稳定性优异[38]。2021 年, 研究人员利用钨基垂直伞状器件在高温下表现出低栅极漏电流的性能, 实现了电子的垂直发射[44]。然而, 金属材料普遍面临热稳定性差与基底黏附性不足的问题, 需通过结构设计(如薄膜堆叠)等方式优化[41]。

半导体材料, 凭借成熟的集成电路工艺兼容性, 可易于实现纳米场发射器件的集成。Han 等[16] 在硅衬底上共制备了场发射三极管和 MOSFET, 其阴阳极间距为 150 nm, 工作电压低于 10 V, 率先证明了真空微纳电子器件和半导体工艺的兼容性。硅基材料阴极的研究进展表明, 通过优化制备工艺和材料改性, 可以显著提高其场发射性能。例如, 通过在硅尖锥阵列上沉积低功函数材料如六硼化镧(LaB_6), 可以显著增加发射电流[54]。此外, 非晶硅

薄膜在相对较低的电场下也可以实现电子场发射，这为制造三端器件提供了可能[55]。碳化硅（SiC）作为第三代半导体，其低电子亲和势（约 4 eV）和高热导率（4.7 W/cm·K）使其在极端环境下表现突出。例如，SiC 基垂直型场发射器件在 30 krad 辐射剂量下无性能衰减，600 °C 下仍可稳定工作[56]，但 SiC 纳米线的小间隙制备依赖聚焦离子束（FIB）刻蚀，工艺成本较高[57]。除此之外，GaN 也凭借着其低电子亲和势、高击穿场强以及温度稳定性成为新一代场发射材料的有力竞争者[39, 45-46]。

低维材料，如石墨烯、碳纳米管、MoS_2 等，因其独特的物理化学性质和优异的场发射性能，已成为真空场发射器件中的重要研究对象。碳纳米管（CNT）具有高长径比、高电导率、优异的机械强度和化学稳定性，使其成为理想的场发射阴极材料。这些特性使得 CNTs 在低电压下实现高电流密度的场发射，从而满足多种应用需求[58]。金刚石凭借负电子亲和势和高化学稳定性，可实现低开启电场（1 V/μm），但其纳米锥制备依赖复杂 CVD 工艺，不便于集成[59]。一项研究中使用了碳纳米管（CNT），开启电场低至 1.2 V/μm，电流密度达 556 mA/cm²[60]。然而，CNT 的分布均匀性、杂质残留及基底黏附性仍是瓶颈，转移过程中的裂纹和杂质也会影响器件的性能[61]。此外，也有研究通过金纳米颗粒修饰石墨烯，获得了更低的功函数，达到了 37.8 mA/cm^2 的电流密度[62]。

当前场发射材料的核心挑战包括工艺一致性（如纳米间隙批量制备）、长期稳定性（材料氧化与尖端退化）和 CMOS 工艺的集成兼容性。未来的器件发展可能聚焦于材料复合，结构创新、极端环境适配与低成本制备。场发射材料的研究正从单一性能优化转向多功能集成，但接下来的发展仍需跨学科合作，推动实用化进程。

4 真空微纳电子器件的应用前景

真空微纳电子器件具有广阔的应用前景。随着新型纳米材料和纳米加工技术的不断进步，真空微纳电子器件小型化、集成化的发展为其成为新一代高速电子器件打下了基础。具备了现今固态晶体管的小尺寸、轻量化、集成化优势，场发射型真空沟道三极管无须预热即可工作，而基于热发射的器件仍需热惯性启动。这一特性使场发射器件在快速响应场景中更具优势。这些优点使其自从被提出以来就受到了广泛的关注以及深入的研究。由于沟道尺寸远远小于空气中电子的平均自由程，真空封装的要求也随之大幅降低，而这样能实现快速响应的真空微纳电子器件未来可能在高速通信[16, 39, 50]、生物医疗传感[63–65]，以及光电融合[60, 66-67]中起到重要作用。除此之外，真空微纳电子器件的形式也未必仅限于阴极-栅极-阳极的基本构成，通过与现有成熟的微纳结构功能器件，如微纳超构表面等结构相结合，有机会迸发出新的火花。

尽管目前真空微纳电子器件在 IC 等领域，受制于成熟的工艺、制程以及标准，相较于固态器件而言仍有很大差距。但是真空微纳电子器件在一些特殊的领域如高温、强辐射场的应用中具有非常特殊的作用和意义，未来有很大希望被应用在深空应用中，这是真空微纳电子器件从原理上所带来的优势。截至目前，已有很多文献证实其在极端环境下的稳定性，早在 1999 年，Dean 等[68] 通过制备单壁碳纳米管研究了长时间场发射的稳定性。实验证明在 10^{-7} Pa 下电流经过 350 h 没有明显衰减；在 10^{-5} Pa 水蒸气下电流经过 100 h 没有明显衰减。2012 年，研究人员制备了 SnO_2 纳米线器件[69]，由于一维材料质量小、表面积大，理论上非常容易受到物理和化学侵蚀，但在电场强度为 4.65 V/μm 下，器件经过 2 400 min 的工作后电流既没有下降也没有较大波动，相较先前的研究有进展，但受限于金属氧化物熔点较低，在稳定性上暂时无法超过碳纳米管器件。同样，基于近年来最新兴起的化合物半导体材料也有类似的研究，2015 年研究人员制备出了柔性 SiC 纳米尖端器件，在 1.5 V/μm 左右的电场下，维持 1 000 μA/cm^2 电流密度可达 60 min 且在此过程中电流几乎没有变化[70]。同年，他们还制备了一批硼掺杂 SiC 纳米尖端器件并测试了其在高温下的稳定性[71]。通过将温度提升至 500 ℃，器件的开启电压从 1.92 V/μm降低至 0.98 V/μm，且通过在室温以及 200 ℃ 下的持续测试，发射电流密度都维持在 510 μA/cm^2 左右，工作 8 h 内波动只有约 1.3%。2023 年的一项研究中，研究团队通过制备多壁碳纳米管以及氧化锌掺杂的多壁碳纳米管验证了发射的稳定性，所有测试样品在经过 14 h 的工作后发射电流都保持不变。

除了发射电流的稳定性，这类器件在抗辐射方面的表现也可圈可点。Han 等[51] 在一项研究中分析了高能射线如 γ 射线以及 X 射线穿过介质层后，产生了电子-空穴对，而电子与空穴迁移率的差异

与氢释放导致的阈值电压负移、关态漏电流增加是辐射诱导半导体器件退化的核心因素; 真空沟道中无固态介质材料, 因此无法触发电离, 从根本上避免了电子-空穴对的形成, 从而消除了陷阱电荷的来源, 且热载流子被电极快速导出, 避免了能量累计以及介质损伤。在后续的一项研究中, Wei 等[45] 制备了 GaN 垂直型场发射二极管并暴露在 1.2 MeV 的快中子辐射中, 曝光剂量分别为 1×10^{12}、6×10^{12}、1×10^{13}、6×10^{13}、1×10^{14} n/cm^2。在曝光前后, 器件的发射电流几乎一致, 拟合的 F-N 曲线斜率也并未有明显的变化, 表明中子辐射没有对阴极功函数以及场增强因子产生较大的影响, 如图 10[45] 所示。

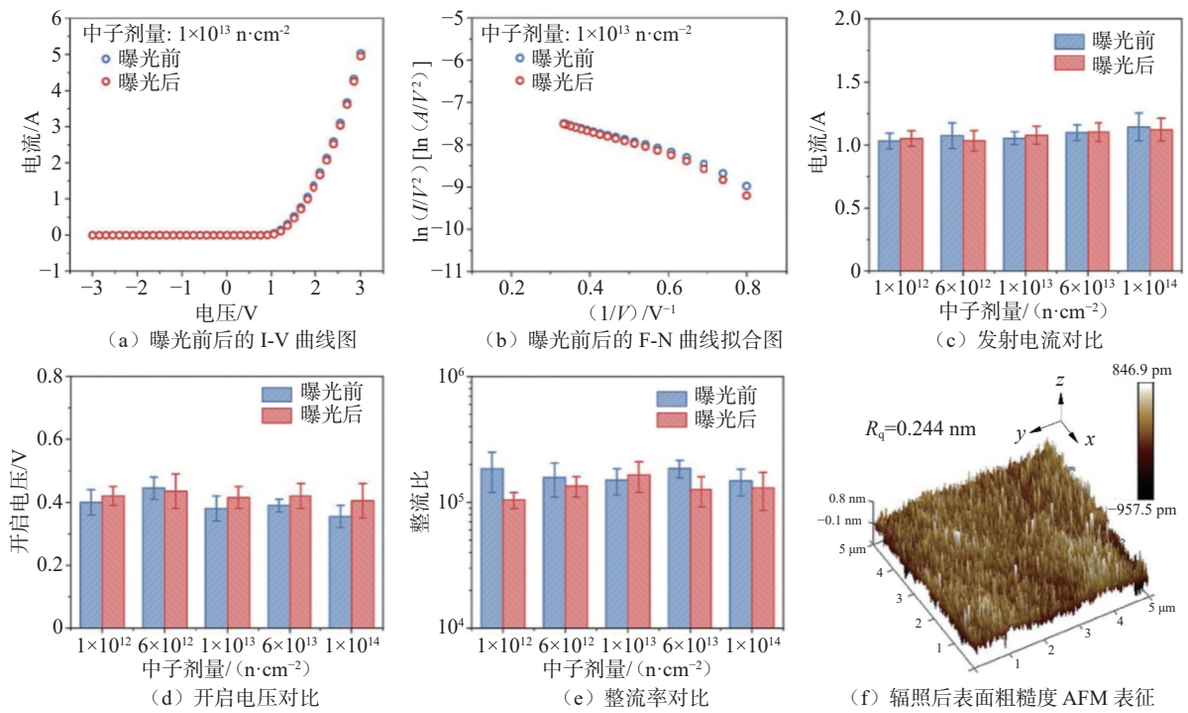


图 10　真空微纳电子器件抗辐照特性研究

Fig. 10　Research on the radiation resistance characteristics of VMNEDs

在传统二极管、三极管的应用之外, 真空微纳电子器件在深空方面的应用还有另外的可能性, 如深空探索中的离子电推进技术, 其基本原理是利用电能将推进剂(如氙气)电离, 产生带电离子, 然后通过电磁场加速这些离子, 从而产生推力。这一过程可以分为三个主要步骤: 电离、加速和中和。电离过程将推进剂转化为带正电的离子和电子; 加速过程通过电场或磁场使离子获得高速度; 中和过程则确保推进剂中的正负电荷平衡, 避免电荷积累对推进器造成影响。其应用领域非常广泛, 如深空探测、地球轨道卫星、商业航天、空间站推进等任务。而真空微纳电子器件的特性恰好可以在真空环境中扬长避短, 在微纳集成化的基础上, 其良好的抗辐射以及耐高温性能适用于太空中的恶劣环境。自美国休斯实验室在 20 世纪 70 年代首次利用低功函数电子发射材料的空心阴极中和器以来, 热电子发射空心阴极就成为了离子推进器放电阴极和中和器阴极的主流[72]。而真空微纳电子器件中的阴极不需要高温就可以进行工作。由 NASA 推动的一项研究中聚焦了通过无须推进剂的推进系统实现在近地轨道的推进、轨道调整以及能量收集能力[73]。其中场发射阴极作为一种可行技术探索, 具有低功耗、高电流密度、长寿命以及小型化的优点, 适用于小型卫星推进、深空任务、碎片清除等任务, 但仍然需要通过长期在轨实验验证微纳器件的抗辐射、抗原子氧和热循环性能。同样, 在 2020 年一篇聚焦于推进器的综述中, 在推进器小型化一节中也讨论了真空微纳电子器件在 FEEP(场发射电推进器)中的应用可行性及原理分析, 认为现有的阴极加工技术(双光子微影技术)仍然需要优化以实现高深宽比的发射器流体结构, 以增强流体阻力的调控能力[74]。

总的来说, 真空微纳电子器件尽管暂时无法在传统的通信和计算领域赶超固态电子器件, 但其凭

借抗辐射性、高稳定性和微型化优势，为太空技术（如电推进、能源系统、抗辐射电子）提供了革命性解决方案。未来，随着制造工艺的成熟和太空验证的推进，这类技术有望成为深空探测、卫星网络和空间基础设施的核心支撑，推动航天器向更高效、可靠、低成本的方向发展。

参考文献：

[1] ANISIMOV A A, BELOV A V, SERGEEV T V, et al. Evolution of bioamplifiers: From vacuum tubes to highly integrated analog front-ends[J]. Electronics, 2022, 11(15): 2402.

[2] FANTON J P. On the mythic sound of vacuum tubes[J]. ACTA IMEKO, 2023, 12(3): 52.

[3] XI H, HUANG M, WANG P, et al. The development of W waveband diffraction radiation oscillator[J]. Physics of Plasmas, 2024, 31(5): 053101.

[4] 李晓峰, 王玉春, 邹雯婧. 微波真空电子器件的发展与应用 [J]. 微波学报, 2022, 38(5): 33−38.

[5] 杨明, 刘超, 郑新. 大功率、高频段电真空器件在雷达技术领域的应用分析 [J]. 现代雷达, 2017(4): 83−86.

[6] SCHWANK J R, SHANEYFELT M R, DODD P E. Radiation hardness assurance testing of microelectronic devices and integrated circuits: Radiation environments, physical mechanisms, and foundations for hardness assurance[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3): 2074−2100.

[7] SUBRAMANIAN K, KANG W P, DAVIDSON J L, et al. A review of recent results on diamond vacuum lateral field emission device operation in radiation environments[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(9): 2924−2929.

[8] SHOULDERS K R. Microelectronics using electron-beam-activated machining techniques[J]. Advances in Computers, 1961, 2: 135−293.

[9] LI X, FENG J. Review of nanoscale vacuum devices[J]. Electronics, 2023, 12(4): 802.

[10] SPINDT C A. A thin-film field-emission cathode[J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(7): 3504−3505.

[11] KOSMAHL H. A wide-bandwidth high-gain small-size distributed-amplifier with field-emission triodes (fetrodes) for the 10 to 300 GHz frequency-range[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1989, 36(11): 2728−2737.

[12] PARK S S, PARK D I, HAHM S H, et al. Fabrication of a lateral field emission triode with a high current density and high transconductance using the local oxidation of the polysilicon layer[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1999, 46(6): 1283−1289.

[13] JENNINGS S. The mean free-path in air[J]. Journal of Aerosol Science, 1988, 19(2): 159−166.

[14] DU X, SKACHKO I, BARKER A, et al. Approaching ballistic transport in suspended graphene[J]. Nature Nanotechnology, 2008, 3(8): 491−495.

[15] NEIDERT R, PHILLIPS P, SMITH S, et al. Field-emission triodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1991, 38(3): 661−665.

[16] HAN J W, SUB OH J, MEYYAPPAN M. Vacuum nanoelectronics: Back to the future?—Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(21): 213505.

[17] CREWE A V, EGGENBERGER D N, WALL J, et al. Electron gun using a field emission source[J]. Review of Scientific Instruments, 1968, 39(4): 576−583.

[18] DEHEER W, CHATELAIN A, UGARTE D. A carbon nanotube field-emission electron source[J]. Science, 1995, 270(5239): 1179−1180.

[19] FOWLER R H, NORDHEIM L. Electron emission in intense electric fields[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1928, 119(781): 173−181.

[20] CUTLER P, HE J, MISKOVSKY N, et al. Theory of electron-emission in high fields from atomically sharp emitters - validity of the fowler-nordheim equation[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1993, 11(2): 387−391.

[21] HE J, CUTLER P, MISKOVSKY N. Generalization of fowler-nordheim field-emission theory for nonplanar metal emitters[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(13): 1644−1646.

[22] BEEBE J M, KIM B, GADZUK J W, et al. Transition from direct tunneling to field emission in metal-molecule-metal junctions[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(2): 026801.

[23] SIMMONS J G. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(6): 1793−1803.

[24] MATTHEWS N, HAGMANN M J, MAYER A. Comment: Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(13): 136101.

[25] STRATTON R. Theory of field emission from semiconductors[J]. Physical Review, 1962, 125(1): 67−82.

[26] BISWAS D. Interpreting the field emission equation for large area field emitters[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2022, 40(2): 023201.

[27] JENSEN K L, KODIS M A, MURPHY R A, et al. Space

charge effects on the current-voltage characteristics of gated field emitter arrays[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(2): 845−854.

[28] ZHANG P, ANG Y S, GARNER A L, et al. Space–charge limited current in nanodiodes: Ballistic, collisional, and dynamical effects[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 129(10): 100902.

[29] SRISONPHAN S, JUNG Y S, KIM H K. Metal–oxide–semiconductor field-effect transistor with a vacuum channel[J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(8): 504−508.

[30] PESCINI L, TILKE A, BLICK R H, et al. Nanoscale lateral field-emission triode operating at atmospheric pressure[J]. Advanced Materials, 2001, 13(23): 1780−1783.

[31] HIGUCHI T, MAISENBACHER L, LIEHL A, et al. A nanoscale vacuum-tube diode triggered by few-cycle laser pulses[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(5): 051109.

[32] CHANG W T, CHUANG T Y, SU C W. Metal-based asymmetric field emission diodes operated in the air[J]. Microelectronic Engineering, 2020, 232: 111418.

[33] CHANG W T, CHENG M C, CHUANG T Y, et al. Field emission air-channel devices as a voltage adder[J]. Nanomaterials, 2020, 10(12): 2378.

[34] WU G, WEI X, ZHANG Z, et al. A graphene-based vacuum transistor with a high ON/OFF current ratio[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(37): 5972−5978.

[35] BARTOLOMEO A D, GIUBILEO F, IEMMO L, et al. Leakage and field emission in side-gate graphene field effect transistors[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(2): 023510.

[36] HAN J W, MEYYAPPAN M. The device made of nothing the vacuum transistor could one day replace traditional silicon[J]. IEEE Spectrum, 2014, 51(7): 31−35.

[37] XU J, LIN C, LI Y, et al. Structure optimization of planar nanoscale vacuum channel transistor[J]. Micromachines, 2023, 14(2): 488.

[38] LIU M, FU W, YANG Y, et al. Excellent field emission properties of VO_2(A) nanogap emitters in air[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(9): 093104.

[39] SAPKOTA K R, LEONARD F, TALIN A A, et al. Ultralow voltage GaN vacuum nanodiodes in air[J]. Nano Letters, 2021, 21(5): 1928−1934.

[40] BOZLER C, HARRIS C, RABE S, et al. Arrays of gated field-emitter cones having 0.32-Mu-M Tip-to-Tip spacing[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1994, 12(2): 629−632.

[41] CHANG W T, HSU H J, PAO P H. Vertical field emission air-channel diodes and transistors[J]. Micromachines, 2019, 10(12): 858.

[42] HAN P, LI X, CAI J, et al. Vertical nanoscale vacuum channel triodes based on the material system of vacuum electronics[J]. Micromachines, 2023, 14(2): 346.

[43] SHEN Z, WANG X, WU S, et al. A new kind of vertically aligned field emission transistor with a cylindrical vacuum channel[J]. Vacuum, 2017, 137: 163−168.

[44] HAN J W, SEOL M L, MEYYAPPAN M. A nanoscale vacuum field emission gated diode with an umbrella cathode[J]. Nanoscale Advances, 2021, 3(6): 1725−1729.

[45] WEI Y, CHEN F, ZHANG Y, et al. GaN nano air channel diodes: Enabling high rectification ratio and neutron robust radiation operation[J]. Dvanced Science, 2024, 11: 2310300.

[46] WEI Y, CHEN F, HUANG R, et al. Fast response GaN nanoscale air channel diodes with highly stable 10 mA output current toward wafer-scale fabrication[J]. Advanced Science, 2023, 10: 2206385.

[47] ZHAO H, CHEN F, WEI Y, et al. Circular-gate nanoscale air channel transistors: Achieving ultralow subthreshold swing and working voltage[J]. Advanced Science, 2025, 12: 10734.

[48] ZHAO D S, LIU R, FU K, et al. An $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$/GaN lateral field emission device with a nano void channel[J]. Chinese Physics Letters, 2018, 35(3): 038103.

[49] HERNANDEZ N, CAHAY M, O'MARA J, et al. Field emission characteristics of AlGaN/GaN nanoscale lateral vacuum diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2024, 135(20): 204305.

[50] HUANG R, CHEN F, YANG J, et al. Design and high-frequency characterization of a wafer-scale vertical bridge structure nanoscale vacuum electronic device[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2024, 71(5): 3221−3227.

[51] HAN J W, AHN J H, CHOI Y K. Damage immune field effect transistors with vacuum gate dielectric[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2011, 29(1): 011014.

[52] HAN J W, MOON D I, OH J S, et al. Vacuum gate dielectric gate-all-around nanowire for hot carrier injection and bias temperature instability free transistor[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(25): 253506.

[53] DUAN J L, LEI D Y, CHEN F, et al. Vertically-aligned single-crystal nanocone arrays: Controlled fabrication and enhanced field emission[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(1): 472−479.

[54] FILIPPOV S V, KOLOSKO A G, POPOV E O, et al. Investigation of the emission properties of a silicon blade-type

cathode[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1400(5): 055011.

[55] SILVA S R P, FORREST R D, SHANNON J M, et al. Electron field emission from amorphous silicon[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 1999, 17(2): 596-600.

[56] HAN J W, SEOL M L, MOON D I, et al. Nanoscale vacuum channel transistors fabricated on silicon carbide wafers[J]. Nature Electronics, 2019, 2(9): 405−411.

[57] LIU M, LI T, WANG Y. SiC emitters for nanoscale vacuum electronics: A systematic study of cathode–anode gap by focused ion beam etching[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Nanotechnology and Microelectronics, Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2017, 35(3): 031801.

[58] BOCHAROV G S, ELETSKII A V. Theory of Carbon Nanotube (CNT)-based electron field emitters[J]. Nanomaterials, 2013, 3(3): 393−442.

[59] HAO T, LI W, LIU Z, et al. Low turn-on field nanodiamond conic field emitter[J]. Diamond and Related Materials, 2017, 75: 91−95.

[60] ZHANG P. Scaling for quantum tunneling current in nano- and subnano-scale plasmonic junctions[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 9826.

[61] BONARD J M, DEAN K A, COLL B F, et al. Field emission of individual carbon nanotubes in the scanning electron microscope[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(19): 197602.

[62] XU J, WANG Q, TAO Z, et al. Enhanced electron emission of directly transferred few-layer graphene decorated with gold nanoparticles[J]. RSC Advances, 2016, 6(81): 78170−78175.

[63] AMLANI I, RAWLETT A M, NAGAHARA L A, et al. An approach to transport measurements of electronic molecules[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(15): 2761−2763.

[64] GUO X F, SMALL J P, KLARE J E, et al. Covalently bridging gaps in single-walled carbon nanotubes with conducting molecules[J]. Science, 2006, 311(5759): 356−359.

[65] FANGET A, TRAVERSI F, KHLYBOV S, et al. Nanopore integrated nanogaps for DNA detection[J]. Nano Letters, 2014, 14(1): 244−249.

[66] OH Y, LEE W, KIM Y, et al. Self-aligned colocalization of 3D plasmonic nanogap arrays for ultra-sensitive surface plasmon resonance detection[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2014, 51: 401−407.

[67] LI X, CHEN F, WANG J, et al. Nano-air-channel Si photodetectors with enhanced responsivity and photocurrent[J]. [J]. IEEE Electron Device Letters, 2025, 46(2): 223−226.

[68] DEAN K A, CHALAMALA B R. The environmental stability of field emission from single-walled carbon nanotubes[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(19): 3017−3019.

[69] FANG X, YAN J, HU L, et al. Thin SnO_2 nanowires with uniform diameter as excellent field emitters: A stability of more than 2 400 minutes[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(8): 1613−1622.

[70] CHEN S, YING P, WANG L, et al. Highly flexible and robust N-doped SiC nanoneedle field emitters[J]. NPG Asia Materials, 2015, 7(1): e157.

[71] WANG L, WEI G, GAO F, et al. High-temperature stable field emission of B-doped SiC nanoneedle arrays[J]. Nanoscale, 2015, 7(17): 7585−7592.

[72] 张天平, 耿海, 张雪儿, 等. 离子电推进技术的发展现状与未来 [J]. 上海航天, 2019, 36(6): 88−96.

[73] GILCHRIST B, BILÉN S, HOYT R, et al. The PROPEL electrodynamic tether mission and connecting to the ionosphere[C/OL]. 12th Spacecrft Charging Technology Conference, 2012: 1-33[2025-05-08]. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120015031/downloads/20120015031.pdf.

[74] HOLSTE K, DIETZ P, SCHARMANN S, et al. Ion thrusters for electric propulsion: Scientific issues developing a niche technology into a game changer[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(6): 061101.

(责任编辑: 郭 云)

引文信息: 韩熙隆, 覃奕垚, 章灿然, 等. 可集成真空微纳电子器件发展与展望[J]. 真空与低温, 2025, 31(3): 302−314.
HAN X L, QIN E Y, ZHANG C R, et al. Development and prospects of scalable vacuum micro-nanoscale electronic devices[J]. Vacuum and Cryogenics, 2025, 31(3): 302−314.