

真空微纳电子与器件专题

真空纳米二极管和三极管综述

李兴辉* 冯进军

(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)

Reviews on Vacuum Nano-Diodes and Nano-Triodes

LI Xinghui*, FENG Jinjun

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

Abstract Vacuum nano-diodes and nano-triodes have basic functions similar to traditional vacuum tubes, but can be manufactured by the most advanced micro-fabricating line to achieve small size, light weight and high integration, which makes them a rapid development in the past decade. The origin, development process and state-of-the-art of vacuum nano-diodes and nano-triodes are reviewed. Typical nanoscale vacuum devices with lateral structure, vertical structure and gate-all-around structure are introduced, and their strengths and weaknesses are analyzed. Silicon devices are most compatible with the mature micro-fabrication process, but the devices based on metals or wide band-gap semiconductors, such as silicon carbide and gallium nitride, have better electrical properties, higher temperature resistance and stronger radiation endurance. Although the developing vacuum nano-diodes and nano-triodes still cannot compete with solid-state integrated circuits in most regular applications, they are attracting more attention and are expected to be employed in harsh conditions with high temperatures or strong radiations.

Keywords Vacuum electron device, Nano-diode, Nano-triode, Temperature resistance, Radiation endurance

摘要 真空纳米二极管和真空纳米三极管具有与传统真空管相似的基本功能,但却可以通过现有先进的微加工工艺线制造,以实现尺寸小、重量轻和高度集成,这使得它们在最近十年发展迅速。综述了真空纳米二极管和三极管的起源、发展历史和最新技术状态。介绍了典型的横向结构、垂直结构和环栅结构器件,并分析了各自优缺点。硅基器件对于成熟微加工工艺兼容性最好,但基于金属和一些宽带隙半导体材料,如碳化硅和氮化镓的真空纳米器件显示更好的电性能、耐高温性和耐辐射性。尽管当今最发达的真空纳米二极管和三极管在大多数常规应用中仍然无法和固态集成电路抗衡,但它们正得到更多关注,并有望首先在高温或强辐射等恶劣环境实现应用。

关键词 真空电子器件 纳米二极管 纳米三极管 耐高温性 耐辐射性

中图分类号: TN12

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202401028

以二极管和三极管为代表的真空电子管,在二十世纪发明后曾在电信号放大、开关和调制领域占据主导地位数十年。此后,由于器件电子渡越时间限制,电子管向更高频段的发展,依靠基于新型工作原理的微波真空电子器件,如行波管、磁控管、正交场器件和回旋器件等得以完成^[1-2]。而在众多常

规低频段领域,真空电子管由于需要高真空密封、高温电子源以及传统加工装配技术带来的体积大、功耗高、制备难度大和可靠性低等缺点,逐渐被半导体晶体管和集成电路(IC)取代。目前真空电子管,凭借出色的低失真和高功率特点,仅在高端音响^[3]无线电基站^[4]等有限应用场景相对固态电子器件保

持优势。

传统电子管在某些领域仍可与半导体器件匹敌,主要源于它们载流子的真空传输特性。与固态相比,真空无与伦比的特性使电子管具有一些明显优势:真空中电子是无散射弹道传输,器件信号失真很小;真空中电子运动可以接近光速,器件转换速度很快;真空中电子可以在高电压和大电流工作,器件输出功率很高。此外,在恶劣环境中,电子管耐高温和抗辐射性能远优于半导体器件,这在一些重要应用场景如航天器中尤为重要^[5]。

半导体器件在许多领域击败电子管,并非因为材料和器件性能优势,而是因为批量微加工实现了器件的小型化、轻量化、低成本、低功耗和高度集成。这意味着,具有原理优势的真空电子管受到落后加工技术的严重阻碍。因而一个简单的设想,通过为集成电路开发的微加工技术制造电子管,可以实现兼具真空和固态器件优点的微型化电子管。1961年K R Shoulders已经提出微米级真空隧道效应器件概念,并期望用最先进的加工技术加以实现^[6]。

当时实现Shoulders的器件有两个主要障碍:一是普遍的机械加工和手动组装模式不适用,二是高温热阴极难以实现小型化和集成化。1968年Spindt阴极的出现使该器件成为现实,这种微加工的场发射阴极同时克服了这两个障碍^[7-8]。1986年H F Gray提出了硅尖锥场发射阴极,用最先进的硅工艺制造真空场效应晶体管和集成电路^[9]。

C A Spindt和H F Gray的努力催生了真空微电子学科。然而真空微电子器件的发展未如预期,一是因为它们相对当时半导体器件并无压倒性优势,二是微米尺寸器件仍然需要几十伏以上的电压和高真空密封,这都降低了器件的可靠性。

微加工技术发展到现在真正纳米尺度,促成了真空电子器件继电子管和真空微电子器件之后的再次跃升。2012年J W Han^[10]提出了纳米级真空沟道晶体管,H K Kim^[11]提出了真空沟道场效应晶体管。尽管这两种器件名称和结构相差甚远,但它们具有革命性的共同特征:一是器件电极间距接近大气中分子平均自由程(MMPF),二是器件工作电压低于空气分子的第一电离能。这类基于最先进微加工的真空纳米电子器件,突破了传统真空器件的工作模式,理论上在大气也能实现电子弹道传输而不会

产生气体放电。该器件引起了科研界广泛关注,一些研究人员认为,它们可能会取代某些现有MOS晶体管,实现高速开关和信号放大,真空集成电路也将与固态IC激烈竞争^[12-13]。

本文详述了以二极管和三极管为代表的真空纳米电子器件的起源、发展历程及最新进展,并分析了其未来应用前景。文章主体聚焦器件的结构设计和实现技术,仅结合具体器件简单讨论其阴极材料和环境适应性。

根据电子发射、控制和收集电极相对位置不同,真空纳米电子器件可简单归类为水平结构、垂直结构和环栅结构(GAA)^[14]。在电子管体系文献中,这些电极称为阴极、栅极和阳极,而半导体晶体管体系中,则为源极、栅极和漏极。

1 水平结构器件

最简单的水平结构器件具有共面的电极,所有电极只需通过一个图型化流程例如光刻、刻蚀或者光刻、剥离即可完成,其制作与微加工技术高度兼容。

1.1 水平结构二极管

水平结构二极管根据电极对形状不同,可以实现开关、整流、放电、电子发射测试等不同功能。二极管最主要结构参数是电极间距,与微加工实现能力密切相关。前期光学光刻实现的水平场发射结构,如图1所示,其电极距离很难低于1 μm ,对微加工兼容性不好的材料如金刚石尤为如此^[15]。

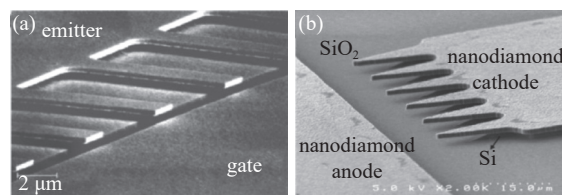


图1 微米级水平场发射二极管。(a)金属发射极,(b)金刚石发射极

Fig. 1 Micro-scale lateral field emission diode. (a) Metal emitter, (b) diamond emitter

T Higuchi等^[16]尝试将两个微加工的钨针尖无限接近,研究激光触发电子发射及整流性能。尽管钨针尖间隙宽度仍然超过100 nm,但估算的触发开关时间已经低于1 ps。

J Xu等^[17]使用电子束光刻和聚焦离子束技术,实现了小于30 nm的金属电极真空间隙阵列,针对

高性能、高速度、低成本电子器件应用。随后又报道了石墨烯电极真空沟道晶体管,如图 2 所示,发射极到收集极距离 90 nm。器件工作电压低于 20 V,漏电流低于 0.5 nA,电流开/关比可达 100,针对高速器件应用^[18]。石墨烯器件可实现优异的整体性能,但其材料制备涉及到生长和转移多个工序,会阻碍其批量制造。

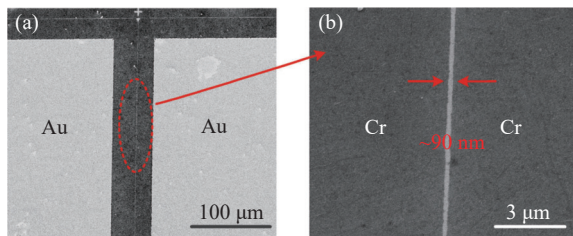


图2 基于石墨烯的(a)纳米真空沟道晶体管及(b)真空间隙放大图

Fig. 2 Graphene-based (a) nanoscale vacuum channel transistor and (b) a zoom-in of vacuum channel

W T Chang 等通过电子束光刻,制造了不对称电极二极管(图 3(a))和对称电极加法器(图 3(b))。二极管阴极是尖锐三角形,阳极是半圆加平面结构,确保正/反向较高电流比,其阴极-阳极距离 24 nm,工作电压低于 0.5 V^[19]。加法器电极为对称尖端,间距 40 nm,工作电压低于 1 V^[20]。

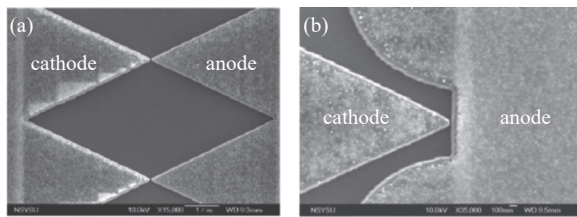


图3 场发射(a)二极管,(b)电压加法器

Fig. 3 Field emission (a) diode, (b) voltage adder

硅材料的微加工技术兼容性最好,基于不同工艺流程,能够容易实现多种类型微电子器件和 MEMS 系统应用^[21],而其劣势在于材料本身的工作环境适应能力。

W M Jones 等^[22]采用电子束光刻,在硅衬底制作 20 nm 金属电极间隙,考察其环境特别是温度适应能力,结果表明可在室温大气压环境,或者 215℃ 的真空环境中工作^[22]。

高温容易导致硅器件内部结退化或电流泄漏增加,因而在高温应用场景,必须寻求硅的高温替代材料,例如宽禁带半导体 SiC^[23-24]。M Liu 等^[25]应

用聚焦离子束刻蚀单晶 SiC 纳米线,制备了阴阳极距离 20–120 nm 的系列纳米间隙。其中 20 nm 的间隙结构,开启电压 3.2 V,5 V 偏压下电流 22.3 nA。该工艺流程可向栅控三端口器件,也即真空场发射晶体管拓展。

不耐受辐射同样是硅材料的短板,而宽禁带半导体 GaN 则相对表现良好^[26]。K R Sapkota 等使用电子束光刻,结合干法和湿蚀刻,制备了 GaN 真空纳米二极管,如图 4 所示。发射极尖端曲率半径 17 nm,和收集极间距 30 nm。器件在大气环境,开启电压 0.24 V,电流达几个 μA ^[27]。该器件仅由 GaN 和掺杂 GaN 组成,能够抵御 2.5 MeV 质子轰击。这种高性能、耐辐射电子器件,在强辐射场景如太空探索有很好的应用前景^[28]。

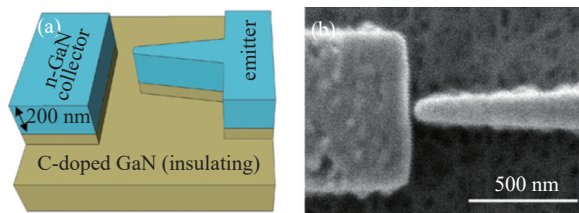


图4 GaN 真空纳米二极管。(a)示意图,(b)纳米间隙

Fig. 4 GaN nanoscale vacuum electron diode. (a) Schematic diagram, (b) gap between emitter and collector

R Bhattacharya 等对两种平面器件进行了长期发射稳定性表征。如图 5 所示,二极管结构金/钛电极间距 16 nm,尖端对称电极间距 20 nm。在 10^{-8} Torr 真空中,保持 6 V 直流偏置电压,50% 的被测器件在 1400 h 测试中电流下降<5%,测试后尖端无明显损坏,表明器件长期工作性能良好^[29]。

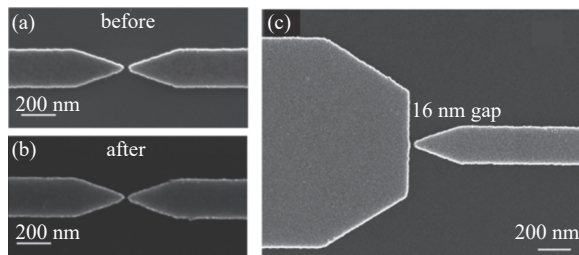


图5 平面场发射器件。(a),(b)领结结构,(c)二极管结构

Fig. 5 Lateral devices. (a), (b) Bowtie structure, (c) diode structure

基于刻蚀纳米线制备间隙技术^[25],M Liu 等^[30]继而刻蚀 VO_2 纳米线形成了 10 nm 的极窄电极间距,空气中该电极对的导通电压仅 0.46 V,1 V 偏压

下电流为 53 μA , 发射相当稳定。现代微加工技术已可将电极间隙控制在 10 nm 以下, 常用技术是聚焦离子束刻蚀^[31]和电子束光刻^[32]。ZENG P 等将两

种技术结合, 先利用电子束曝光形成空竹形状, 再通过宽束离子束刻蚀修剪, 精确控制刻蚀时间, 实现了 8 nm 间隙, 如图 6 所示^[33]。

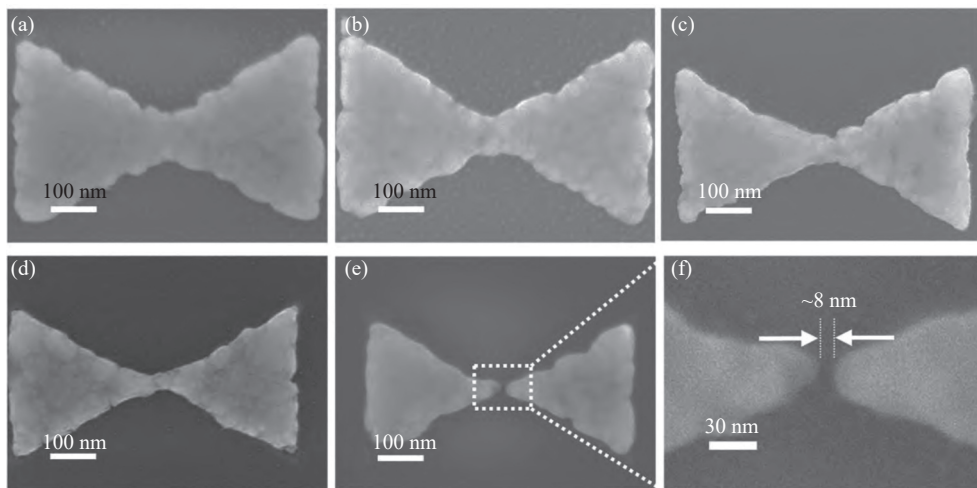


图6 离子束刻蚀空竹形结构形成纳米间隙过程。(a)初始空竹形图案,(b)-(e)分别经过 50, 100, 150 和 200 s 刻蚀后形貌,(f)为(e)的间隙放大图

Fig. 6 Process from initial diaboloid-shaped pattern to nanogap by ion beam etching. (a) Initial diaboloid-shaped pattern, (b)-(e) morphologies after etching for 50, 100, 150 and 200 s, respectively, (f) enlarged view of the nanogap in (e)

1.2 水平结构三极管

真空纳米三极管的设计也源自其微米器件前身。1999 年 S S Park 等使用当时顶级光刻和多晶硅局部氧化技术制造的水平场发射三极管, 如图 7 所示, 发射极距离栅极 1 μm , 距离阳极 6.5 μm 。尽管结构特征尺寸远大于纳米, 但凭借场增强尖端, 导通电压仅为 14 V^[34]。

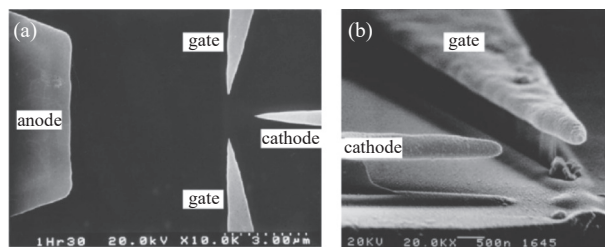


图7 微米级(a)水平结构场发射三极管及(b)阴极和栅极间隙放大图

Fig. 7 Micro-scale (a) lateral field emission triode and (b) a zoom-in of vacuum channel between cathode and gate

K Subramanian 等研制了全集成金刚石真空微米三极管, 如图 8 所示, 阴极尖端曲率半径 15 nm, 阴栅间距 3 μm , 阴阳极间距 12 μm , 在 40 V 栅极电压和 65 阳极电压时, 获得稳定 4 μA 发射电流^[35]。

2001 年 L L Pescini 等利用电子束光刻, 将水平

三极管阴栅极间距降至 150 nm, 器件开启电压约 1.5 V, 发射电流 4 nA, 在高真空到大气环境连续工作数周, 性能没有严重退化^[36]。W T Chang 等实现了真正意义的共面结构纳米三极管, 并系统研究了不同距离栅极对电子发射的影响。图 9(a)中器件发射极和收集极距离 128 nm, 对称的栅极间距为 227 nm; 图 9(b)发射极和收集极距离 35 nm, 栅极间距为 150 nm。这种极端近栅结构, 能有效抑制电子发射, 但会严重影响发射极引出电场, 并可大量截获电子^[37]。这个结论, 和 J Kim 的研究结果相一致^[38]。

J W Han 提出的背栅真空纳米晶体管结构, 如

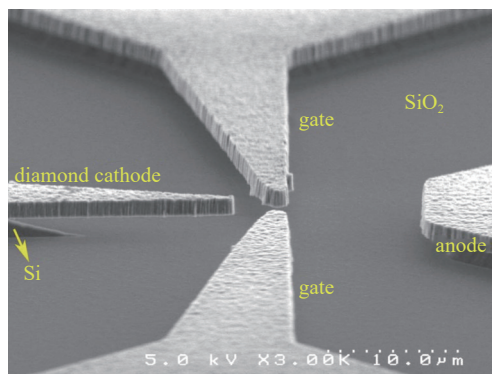


图8 金刚石水平真空微三极管

Fig. 8 Diamond lateral vacuum microtriode

图 10 所示, 避免了共面栅极的影响^[10, 39]。器件源极和漏极共面, 栅极通过薄氧化层与二者绝缘。该器件完全基于 0.18 μm 成熟光刻工艺和光刻胶修整技术, 很容易实现和 MOSFET 的同片集成^[40]。源漏极间距 150 nm 的器件, 工作电压 10 V 时, 发射电流 3 μA , 电流通/断比高达 10^4 。

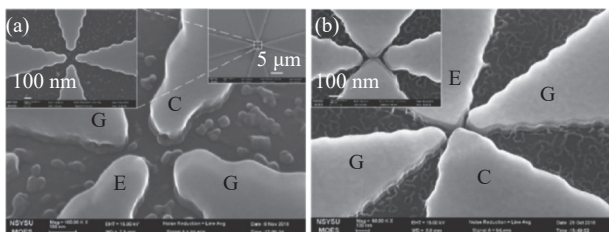


图9 两种共面结构栅控纳米空气沟道。(a)发射极-收集极间距 128 nm, (b)发射极-收集极间距 35 nm

Fig. 9 Two nanoscale air channels with coplanar gates. (a) With emitter-collector distance of 128 nm, (b) with emitter-collector distance of 35 nm

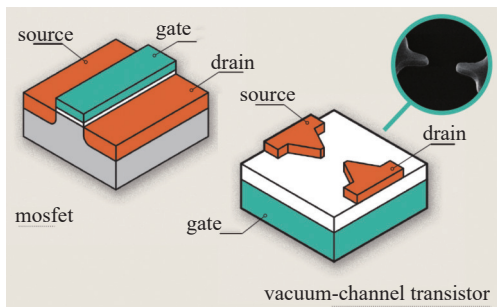


图10 MOSFET 和背栅结构真空纳米晶体管

Fig. 10 MOSFET and nano vacuum channel transistor with back-gate

减小发射极(源极)和收集极(漏极)间距需要更先进加工能力, 针对类似背栅结构, S Nirantar 等^[41]使用电子束光刻, 容易地实现了 11.5 ~ 34.1 nm 范围的电极间距, 器件能在 2 V 电压实现几十纳安电流。

2 垂直结构器件

2.1 垂直尖锥结构

最初的微型化真空二、三极管多为 Spindt 阴极类的栅控尖端结构, 如图 11 所示^[42-43]。这种结构, 能够在微米尺度以适当的栅极电压实现电子发射所需的强电场。

典型 Spindt 阴极栅孔直径 1 μm , 尖锥曲率半径 20 ~ 50 nm。缩小尺寸可以降低其工作电压,

T Hirano 等^[44]研发了栅控硅尖锥, 通过硅尖氧化钝化技术, 可将曲率半径降低至 5 nm; W Shao 等^[45]则在 Spindt 阴极尖锥上集成单根碳纳米管作为发射体, 以获得很强的电场增强因子, 如图 12 所示。C O Bozler 等^[46]通过激光干涉光刻技术, 首次将 Spindt 阴极尺寸缩小到纳米, 实现栅孔直径 160 nm, 电极间距 80 nm, 开启电压低至 8 V, 阵列电流密度达到创纪录的 1600 A/cm。

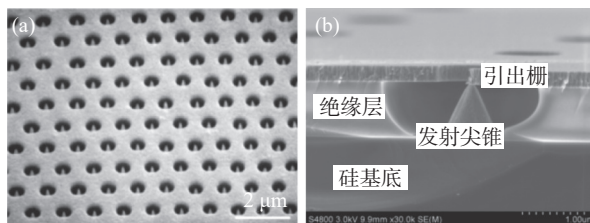


图11 Spindt 阴极。(a)阵列, (b)单尖锥

Fig. 11 Spindt cathode. (a) Array, (b) single emitter

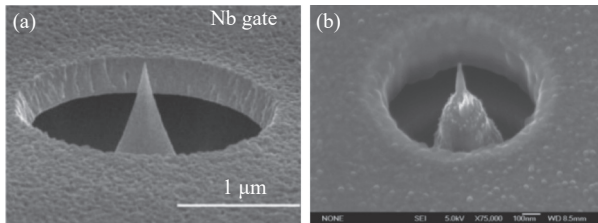


图12 Spindt 类场发射阴极。(a)硅尖锥, (b)碳纳米管

Fig. 12 Spindt type field emission cathode with (a) silicon emitter, (b) CNT emitter

为缓解平面微加工难度, A A G Driskill-Smith 等提出通过绝缘层厚度来控制电极间距, 其二、三极管工艺流程如图 13 所示^[47-48]。这种器件, 电极间距可以精确控制在几十纳米, 其中 30 nm 阴栅间距的二极管导通电压 7.5 V, 可以在大气中长期稳定工作。

垂直尖锥结构是最早出现的微纳真空二、三极管类型, 其最大缺点, 是空腔内发射极制作难度大, 很难在同片上实现高度、形貌基本一致的发射体和阴栅间距, 影响实际应用。

2.2 垂直边缘结构

H K Kim 等提出了基于薄膜边缘发射的真空纳米沟道场效应晶体管, 使用聚焦离子束蚀刻金属、氧化物和半导体堆叠结构形成空腔, 空腔内薄膜边缘用作电极。二极及三极结构示意图如图 14 所示。各电极之间距离, 由氧化物膜层精确控制在几十纳米。在大气环境, 二极器件导通电压约为 0.5 V, 电

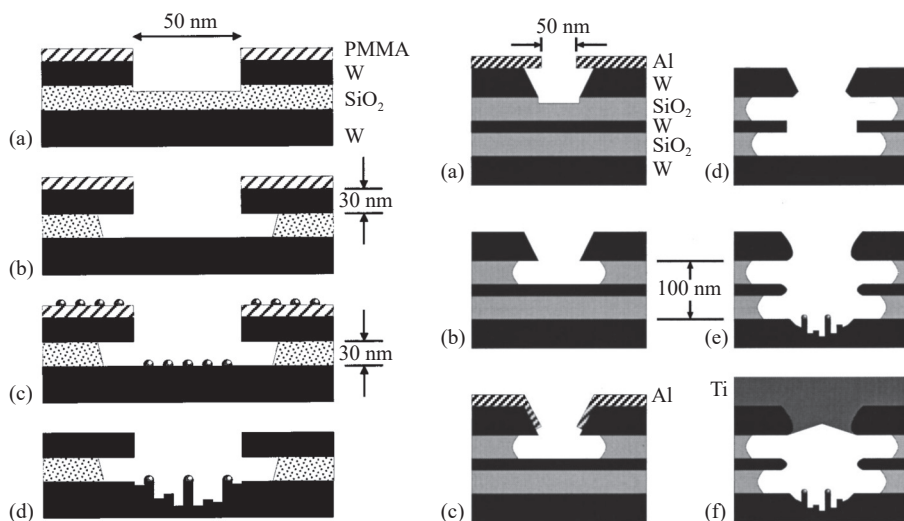


图13 场发射纳米二极管和三极管工艺流程

Fig. 13 Fabrication processes of field emission nanodiode and nanotriode

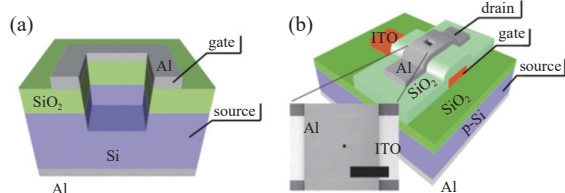


图14 真空纳米沟道场效应晶体管示意图。(a)二极管结构, (b)三极管结构

Fig. 14 Schematic diagram of nano-void channel FET. (a) Diode structure, (b) triode structure

流通/断比为 500, 三极器件表现出良好的 FET 特性^[11]。

P Han 等研究了这种器件的电压、气压和温度适应能力, 并进行了失效分析。基于钼电极和氧化铝绝缘的三极器件, 如图 15 所示, 在 10^{-7} Pa ~ 10^5 Pa 的范围内具有基本相近的 I - V 性能。电压低于 10 V 工作时电流仅为几十 nA, 但其能长时间耐受 50 V 电压和几 μ A 电流。器件经过 400 $^{\circ}$ C 高温处理, 依然可以正常工作^[49]。

针对垂直边缘结构提出了一系列优化改进。S L Wu 等^[50] 提出了圆形空腔结构, 其环形电极避免了方孔边角非均匀分布电场, 有效减少局部电场过强导致的器件失效。模拟表明, 阴栅间距 10 nm 时, 阈值电压低至 1.2 V, 为避免栅极屏蔽导致性能退化, 此时圆孔半径不应小于 20 nm。I J Park 等^[51] 提出保持沟道长度在 MMPF, 大幅降低阴栅间距和阳极电压, 并模拟了在 2 nm 极小阴栅间距时, 减少栅极截获的条件。W T Chang 等^[52] 研究了阴阳极距离固

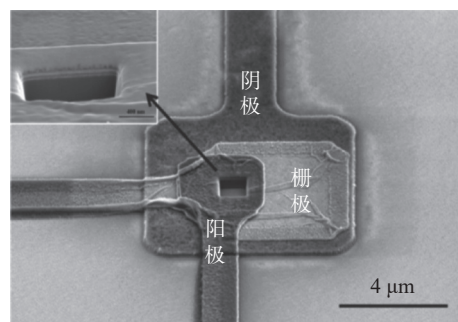


图15 金属电极真空纳米三极管

Fig. 15 Nanoscale vacuum channel triode with metal electrodes

定时, 不同栅极位置 (距阴极 3 nm、10 nm、20 nm 和 30 nm) 的影响, 粒子轨迹模拟表明, 较小阴栅间距能更好控制电子发射, 这与 I J Park 和 S L Wu 的研究相一致。

减小阴栅间距带来两个问题, 一个是寄生电容增加导致跨导降低, 二是增加了漏电风险。J W Han 等因此提出了一种扩展栅极结构, 如图 16 所示。这种栅极的氧化层在大多区域都较厚, 而在发射极边缘附近很薄, 这可以同时减小寄生电容和电流泄漏。基于 SiC 晶片实现这种结构, 能够获得优异的长期稳定性, 并能较好抵御辐射和位移损伤。器件在高达 30 krad (相当于 800 km 海拔 10 年总剂量) Co-60 源辐射试验中, 性能没有明显下降; 在 10 MeV 中子峰值能量和 1×10^{14} ncm $^{-2}$ 注量位移损伤试验中, 没有观察到性能退化^[53]。

不同于空腔内边缘发射, 最近又提出了外边缘发射结构。M Liu 等^[54] 和 Y Wei 等^[55] 分别在硅和

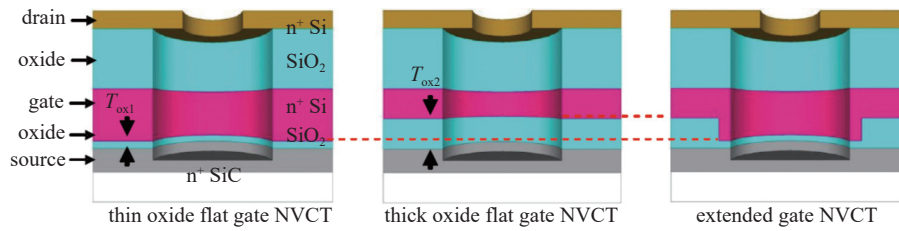


图16 不同栅极形状真空通道纳米晶体管示意图

Fig. 16 Schematic of nanoscale vacuum channel transistors with different gates

GaN 衬底上制作了凸台 SiO_2 绝缘和金属发射极, 如图 17 所示。控制凸台边缘长度, 单个结构容易获得百微安到毫安级电流。与此类似, J W Han 等提出了一种栅控二极管结构(实际是三极管), 如图 18 所示。与传统结构不同, 器件将基底作为栅极, 阳极位于伞形阴极和基底之间。该器件可控性良好, 并且栅极漏电很低^[56]。

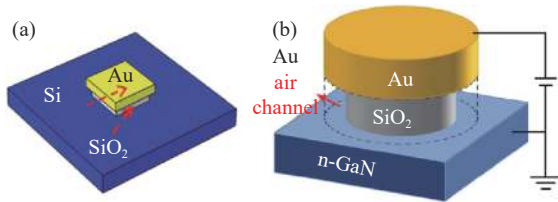


图17 两种外边缘发射空气通道二极管示意图。(a)硅基器件, (b)GaN 基器件

Fig. 17 Schematic of two air channel diodes with outer-edge emitters. (a) Silicon-based device, (b) GaN-based device

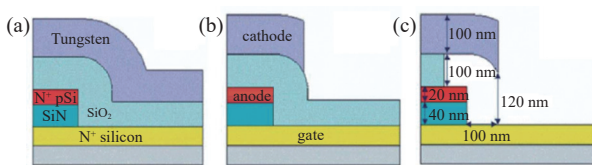


图18 伞形阴极垂直栅控场发射二极管工艺流程。(a)膜层沉积, (b)阴极刻蚀, (c)绝缘层刻蚀

Fig. 18 Fabrication process of a vertical vacuum field emission gated diode with an umbrella cathode. (a) Films deposition, (b) cathode etching, (c) insulator etching

这种外边缘发射结构, 依靠常规 IC 工艺即可容易实现, 并且电极间距精准, 电子发射及控制性能较好, 其明显缺点在于电极引出较为困难。

3 环栅结构器件

环栅结构源于标准 MOS 器件, 这种器件栅极完全包围电子沟道, 可以实现良好控制。固态环栅 MOSFET 技术成熟^[57], 在此基础上添加牺牲层沉积

和去除工艺, 即可实现真空绝缘的环栅结构, 如图 19 所示^[58-59]。

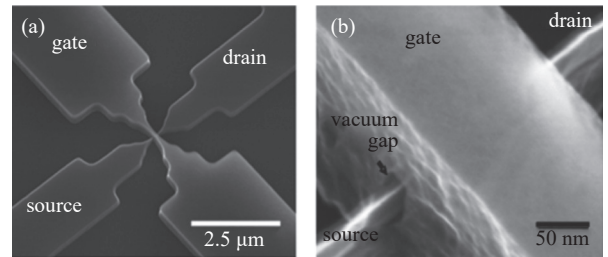


图19 绝缘环栅结构 (a)场效应晶体管及(b)真空绝缘区

Fig. 19 SEM images of (a) vacuum GAA FET, (b) the vacuum region

将文献 [59] 中纳米线沟道也由真空替代, J W Han 等制造了环栅真空通道纳米晶体管, 如图 20 所示。该晶体管真空沟道长 50 nm, 源极到栅极距离 10 nm, 工作电压低于 5 V, 工作电流大于 3 μA ^[60]。

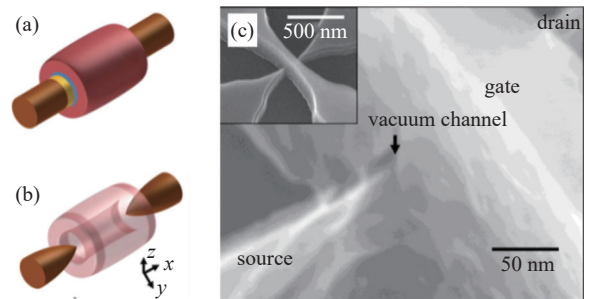


图20 环栅结构 (a)纳米线晶体管和(b)真空晶体管示意, (c)真空晶体管照片

Fig. 20 Schematic of GAA (a) nanowire FET and (b) vacuum FET, (c) SEM image of vacuum FET

这种环栅结构真空纳米三极管可以实现很好的电流控制, 但这种内嵌结构的制备工艺十分复杂, 精确尺寸控制难度很大, 片上结构一致性、特别是发射极和收集极之间真空间隙距离的一致性很难保障。

4 结论

微加工的纳米级真空二极管和三极管, 不仅具

有尺寸小、重量轻、集成度高、效率高等许多与固态器件相似的特性,而且还具有传统真空管的弹道电子传输、无预热时间特性,其综合优势受到了广泛关注。近年来,对该器件原理、材料和工艺有很多针对性研究,提出并实现许多新器件设计,包括横向结构、垂直结构和环栅结构,并获得了有吸引力的电性能。许多材料被尝试用于真空纳米器件以提高性能,包括传统半导体硅,低功函数难熔金属,以 SiC 和 GaN 为代表的第三代宽禁带半导体,以及碳纳米管、石墨烯和纳米线新材料等。

不同结构真空纳米器件有各自的优缺点。横向结构与传统 IC 工艺兼容性最好,但缺乏先进极紫外(EUV)光刻技术支撑,很难批量实现晶圆级的关键尺寸一致性。环栅结构具有最有效的发射控制能力,但其结构相对复杂,制备工艺难度很高,并且关键尺寸一致性也很难保障。垂直尖锥结构最初作为冷阴极电子源广受关注,但制备工艺难度很大,并且尖锥至栅极间距受水平和垂直两个尺寸控制,实现高度一致尤为困难。边缘发射结构,可以容易地实现精确控制的电极间距,虽然存在阴栅极之间的高寄生电容和电流易泄漏的缺点,但已经提出了一些解决方案,等待长期实践验证。

真空纳米器件中硅材料最兼容 IC 技术,但其化学性质不稳定,散热差、导电性低的固有缺点,妨碍到实际应用。金属材料,因为无掺杂和无定形特性,由其制备的器件对辐射损伤或温度变化相对不敏感。碳系新材料和纳米线材料,实现器件的性能远胜于硅器件,但由于工艺兼容性相对较差,批量存在困难。和半导体硅同类的 SiC 或 GaN,相对硅基能够承受更恶劣的高温 and 强辐射环境,具有很好的综合优势。

当前固态 IC 技术发达,在大多数常规应用中地位无与伦比。然而,真空纳米器件有望在高温或强辐射等特殊应用领域取得突破。高温工业应用包括电动汽车、电动飞机和深地石油/天然气开采等,强辐射应用特指深空探测,固态电路受空间粒子辐射致使导通电流降低、漏电流增加及逻辑混乱,而真空纳米电子器件则能较好抵御。

参 考 文 献

- [1] Gilmour A S, Ebrary I. Klystrons, travelling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons[M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 2011
- [2] Pan P, Tang Y, Bian X, et al. A G-band traveling wave tube with 20W continuous wave output power[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2020, 41: 1833–1836
- [3] Barbour E. The cool sound of tubes[J]. *IEEE Spectrum*, 1998, 35: 24–35
- [4] Symons R S. Tubes: still vital after all these years[J]. *IEEE Spectrum*, 1998, 35: 52–63
- [5] Kim H K. Vacuum transistors for space travel[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2: 374–375
- [6] Shoulders K R. Microelectronics using electron-beam-activated machining techniques[J]. *Advances in Computers*, 1961, 2: 135–138
- [7] Spindt C A. A thin-film field-emission cathode[J]. *J Appl Phys*, 1968, 39: 3504–3505
- [8] Spindt C A, Brodie I, Hunphrey L. physical properties of thin film field emission cathode with molybdenum cones[J]. *J Appl Phys*, 1976, 47: 5248–5263
- [9] Gray H F, Campisi G J, Greene R F, et al. A vacuum field effect transistor using silicon field emitter arrays[C]. *International Electron Devices Meeting, USA*, 1986
- [10] Han J W, Oh J S, Meyyappan M. Vacuum Nanoelectronics: Back to the future? - gate insulated nanoscale vacuum channel transistor[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 213505
- [11] Srisophon S, Jung Y, Kim H. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with a vacuum channel[J]. *Nature Nanotech*, 2012, 7: 504–508
- [12] Stoner B R, Glass J T. Nothing is like a vacuum[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7: 485–487
- [13] Feng J, Li X, Hu J, et al. General vacuum electronics[J]. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 2020, 20: 1–8
- [14] Gautam R, Saxena M, Gupta R S, et al. Gate all around MOSFET with vacuum gate dielectric for improved hot carrier reliability and RF performance[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60: 1820–1827
- [15] 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]. *Microelectron Eng*, 2011, 88: 2924–2929
- [16] Higuchi T, Maisenbacher L, Liehl A, et al. A nanoscale vacuum-tube diode triggered by few-cycle laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 051109
- [17] Xu J, Wang Q, Tao Z, et al. High-quality and stable electron emission device with sub-30-nm aligned nanogap arrays[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2017, 64:

- 2364–2368
- [18] Xu J, Gu Z, Yang W, et al. Graphene-based nanoscale vacuum channel transistor[J]. *Nanoscale Res Lett*, 2018, 13: 311
- [19] Chang W T, Chuang T Y, et al. Metal-based asymmetric field emission diodes operated in the air[J]. *Microelectronic Engineering*, 2020, 232: 111418
- [20] Chang W T, Cheng M C, Chuang T Y, et al. Field emission air-channel devices as a voltage adder[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10: 2378
- [21] Mishra M K, Dubey V, Mishra P M, et al. MEMS technologies: a review[J]. *J Eng Res Rep*, 2019, 4: 1–24
- [22] Jones W M, Lukin D, Scherer A. Ultra-low turn-on field emission devices characterized at atmospheric pressures and high temperatures[C]. IEEE International Vacuum Nanoelectronics Conference, 2016
- [23] Guo X, Xun Q, Li Z, et al. Silicon carbide converters and mems devices for high-temperature power electronics: a critical review[J]. *Micromachines*, 2019, 10: 406
- [24] Neudeck P G, Okojie R S, Chen L Y. High-temperature electronics-a role for wide bandgap semiconductors? [J]. *Proc. IEEE* 2002, 90 (6): 1065–1076
- [25] 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]. *J Vac Sci Technol B*, 2017, 35: 031801
- [26] Zhao D S, Liu R, Fu K, et al. An $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ lateral field emission device with a nano void channel[J]. *Chin Phys Lett*, 2018, 35: 114–117
- [27] Sapkota K R, Leonard F, Talin A A, et al. Ultralow voltage GaN vacuum nanodiodes in air[J]. *Nano Lett*, 2021, 21: 1928–1934
- [28] Wang G T, Sapkota K R, Talin A A, et al. Ultra-low voltage GaN vacuum nanoelectronics[C]. 2022 Compound Semiconductor Week, 2022
- [29] Bhattacharya R, Turchetti M, Keathley P D, et al. Long term field emission current stability characterization of planar field emitter devices[J]. *J Vac Sci Technol B*, 2021, 39: 053201
- [30] Liu M, Fu W, Yang Y, et al. Excellent field emission properties of VO_2 (A) nanogap emitters in air[J]. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 093104
- [31] Chen Y Q, Hu Y Q, Zhao J Y, et al. Topology optimization-based inverse design of plasmonic nanodimer with maximum near-field enhancement[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(23): 2000642
- [32] Zheng M J, Yang Y, Zhu D, et al. Enhancing plasmonic spectral tunability with anomalous material dispersion[J]. *Nano Lett*, 2021, 21(1): 91–98
- [33] Zeng P, Shu Z, Chen Y, et al. Rapid fabrication of metallic nanogap structures by shower ion beam etching[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(1): 109–118 (曾沛, 舒志文, 陈艺勤, 等. 宽束离子束刻蚀快速加工金属纳米间隙结构 [J]. 光学精密工程, 2023, 31(1): 109–118(in Chinese))
- [34] 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: 1283–1289
- [35] Subramanian K, Kang W P, Davidson J L. Nanocrystalline diamond lateral vacuum microtriode[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 203511
- [36] Pescini L L, Tilke A, Blick R H, et al. Nanoscale lateral field-emission triode operating at atmospheric pressure[J]. *Adv Mater*, 2001, 13: 1780–1783
- [37] Chang W T, Pao P H. Field electrons intercepted by coplanar gates in nanoscale air channel[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2019, 66: 3961–3966
- [38] Kim J, Kim J, Oh H, et al. Design guidelines for nanoscale vacuum field emission transistors[J]. *J Vac Sci Technol B*, 2016, 34: 042201
- [39] Han J W, Meyyappan M. The device made of nothing[J]. *IEEE Spectrum*, 2014, 51: 30–35
- [40] Han J W, Oh J S, Meyyappan M. Cofabrication of vacuum field emission transistor (VFET) and MOSFET[J]. *IEEE Trans Nanotechnol*, 2014, 13: 464–468
- [41] Nirantar S, Ahmed T, Ren G, et al. Metal-air transistors: semiconductor-free field-emission air-channel nanoelectronics[J]. *Nano Lett*, 2018, 18: 1–23
- [42] Spindt C A, Holland C E, Rosengreen A, et al. Field-emitter arrays for vacuum microelectronics[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1991, 38: 2355–2363
- [43] Li X, Bai G, Li H, et al. Study of lift off layers in Spindt cathode fabrication[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013, 33(4): 303–308 (李兴辉, 白国栋, 李含雁, 等. Spindt 阴极制作中剥离层的研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(4): 303–308(in Chinese))
- [44] Hirano T, Kanemaru S, Tanoue H, et al. Fabrication of a new Si field emitter tip with metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) structure[J]. *Japanese*

- [Journal of Applied Physics](#), 1996, 35: 6637–6640
- [45] Shao W, Ding M, Chen C, et al. Micro-gated-field emission arrays with single carbon nanotubes grown on Mo tips[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 252: 7559–7562
- [46] Bozler C O, Harris C T, Rabe S, et al. Arrays of gated field-emitter cones having 0.32 μm tip-to-tip spacing[J]. *J Vac Sci Technol B*, 1994, 12: 629–632
- [47] Driskill-Smith A A G, Hasko D G, Ahmed H. Nanoscale field emission structures for ultra-low voltage operation at atmospheric pressure[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, 71: 3159–3161
- [48] Driskill-Smith A A G, Hasko D G, Ahmed H. The “nanotriode”: a nanoscale field-emission tube[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(18): 2844–2847
- [49] 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: 346
- [50] Shen Z, Wang X, Wu S L, et al. A new kind of vertically aligned field emission transistor with a cylindrical vacuum channel[J]. *Vacuum*, 2017, 137: 163–168
- [51] Park I J, Jeon S G, Shin C. A new slit-type vacuum-channel transistor[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, 61: 4186–4191
- [52] Chang W T, Hsu H J, Pao P H. Vertical field emission air-channel diodes and transistors[J]. *Micromachines*, 2019, 10: 858
- [53] Han J W, Seol M L, Moon D I, et al. Nanoscale vacuum channel transistors fabricated on silicon carbide wafers[J]. *Nat Electron*, 2019, 2: 405–411
- [54] Liu M, Liang S, Shi D, et al. An emission stable vertical air channel diode by a low-cost and IC compatible BOE etching process[J]. *Nanoscale*, 2021, 13: 5693–5699
- [55] Wei Y, Zhao H, Zhao J, et al. GaN nanoscale air channel devices with mA-level output by IC compatible processes [C]. 2022 International Vacuum Nanoelectronics Conference, 2022
- [56] Han J W, Seol M L, Meyyappan M. A nanoscale vacuum field emission gated diode with an umbrella cathode[J]. *Nanoscale Adv*, 2021, 3: 1725–1729
- [57] Singh N, Agarwal A, Bera L K, et al. High-performance fully depleted silicon nanowire (diameter ≤ 5 nm) gate-all-around CMOS devices[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2006, 27: 383–385
- [58] Han J W, Ahn J H, Choi Y K. Damage immune field effect transistors with vacuum gate dielectric[J]. *J Vac Sci Technol B*, 2011: 29
- [59] 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]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 253506
- [60] Han J W, Moon D I, Meyyappan M. Nanoscale vacuum channel transistor[J]. *Nano Letters*, 2017, 17: 2146–2151