

真空微纳电子与器件专题

氧化硅水平隧穿结电子源及其应用

朱韬远 李志伟 詹芳媛 杨威 魏贤龙*

(北京大学电子学院 纳米器件物理和化学教育部重点实验室 北京 100871)

Silicon Oxide Horizontal Tunneling Junction Electron Source and Its Applications

ZHU Taoyuan, LI Zhiwei, ZHAN Fangyuan, YANG Wei, WEI Xianlong*

(Key Laboratory for the Physics and Chemistry of Nanodevices and School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Electron source is the core component of vacuum electronic devices, and on-chip micro-electron source is the key and foundation for realizing miniaturized and on-chip vacuum electronic devices. Silicon oxide Horizontal Tunneling Junction Electron Source (HTJES) is a new type of on-chip miniature electron source developed by our group in recent years, which has the advantages of high emission efficiency, high emission current density, low operating voltage, ability to withstand rough vacuum and fast temporal response, etc., and shows a large potential for applications. In this paper, we will systematically introduce the silicon oxide HTJES from three aspects, including micro-processes and theoretical models of electron emission, arrayed integration, and applications in vacuum electronic devices, and summarize the works done by our group in this field.

Keywords Silicon oxide horizontal tunneling junction electron sources, On-chip micro-electron sources, Micro-vacuum electronic devices

摘要 电子源是真空电子设备的核心部件,片上微型电子源是实现微型化、片上化真空电子器件的关键和基础。氧化硅水平隧穿结电子源是本课题组近几年发展的一种新型片上微型电子源,其具有发射效率高、发射电流密度大、工作电压低、能耐受粗真空和时间响应快等优点,展现出较大的应用潜力。文章将从电子发射微观过程及理论模型、阵列化集成以及在真空电子器件中的应用三个方面系统介绍氧化硅水平隧穿结电子源,并对本课题组在该方向上所做的工作进行梳理与总结。

关键词 氧化硅水平隧穿结电子源 片上微型电子源 微型真空电子器件

中图分类号: TN389

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202402002

电子源是一种能够在真空或稀薄空气中产生(发射)和控制自由电子的器件或装置,其是诸多真空电子设备的核心部件。目前,主流的电子源是一个多世纪前发展出的传统热电子源^[1],由于具备发射电流大、发射电流稳定、制备工艺成熟等优点,其仍被大多数真空电子设备所采用。但是由于传统热电子源依赖的是发射材料的热电子发射,其一般需要将宏观尺度的发射体加热到 1000 K 以上,因此其功耗较高,响应时间长^[2],对发射体材料的热稳定性要求高,极大地限制了其本身以及依赖于其所构建的真空电子设备的应用。同时由于集成电路的

飞速发展,电子器件及设备微型化、片上化成为了不可忽视的趋势,并且微型化、片上化更利于功耗的降低,因此真空电子器件的微型化和片上化是其发展的重要方向。但由于传统电子源多采用机械加工方法制备,其物理尺寸往往不能满足微型化、片上化的要求。因此寻找一种功耗低、响应快、发射电流大、发射电流密度高,同时能够采用微纳加工技术制备的微纳米尺度的电子源成为真空电子学领域的一个重要任务。

针对电子源的片上化、微型化,前人给出的解决方案包括基于微针尖^[3-6]和纳米管/线^[7-9]的片上

收稿日期: 2024-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(62350040); 国家重点研发计划项目(2019YFZ0210201)

* 联系人: E-mail: weixl@pku.edu.cn

场发射电子源、基于纳米材料的片上热电子源^[10-11]、金属-绝缘体-金属(MIM)多层隧穿电子源^[12-14]、负电子亲和势电子源^[15-17]等。每种解决方案都有自己的特点和长处,但也都存在着一些技术瓶颈。例如,片上场发射电子源的发射电流很大,其发射阵列产生的发射电流可达1 A^[6],但其加工难度大、工作真空度高、阵列发射的均匀性难以保证;片上热电子源和MIM多层隧穿电子源工作电压低且能够耐受相对较低真空,但发射效率和发射电流较小;负电子亲和势电子源需要对发射体表面进行活性处理,其对工作的真空度要求较高,同时发射稳定性差、寿命短。为了解决这些电子源所面临的以上困境,本课题组基于氧化硅的软击穿和阻变特性,发展了一种新型的水平隧穿结电子源,为电子源的片上化、微型化提供了一套新的解决方案。

本文主要分三个部分展开,第一部分主要介绍单个氧化硅水平隧穿结的制备、电子发射性能、电子发射原理,第二部分讨论氧化硅水平隧穿结电子源的阵列化集成,最后一部分介绍基于该类型电子源所实现的具体应用。

1 氧化硅水平隧穿结的电子发射性能和机理

2018年本课题组首次报道氧化硅水平隧穿结的电子发射现象^[18],并在后续发表的一系列工作中

逐步阐述了其电子发射的微观过程和机理^[19-21]。

图1(a)为氧化硅水平隧穿结的扫描电镜(SEM)图,其主体由氧化硅衬底和一对石墨烯电极(或者其它电极)构成,在石墨烯电极之间存在着一个100 nm左右的纳米狭缝。在该器件上方50 μm 处施加一个200 V的收集电压,通过扫描石墨烯电极两端的偏压可以得到如图1(b)所示的发射性能图。观察该器件的传导电流可发现,该器件存在明显阻变现象,与Yao等^[22-23]测量得到的氧化硅阻变曲线十分类似。在器件进入高阻态时发射电流有一个近3个数量级的突变,之后随着偏压的不断增加而增加,在偏压为21.3 V时,发射电流能够达到3.2 μA ,考虑到此时传导电流为103.8 μA ,其电流发射效率为3.1%。本课题组还在阻变切换的电压区间测量了该器件的瞬态响应,发现其开启和关闭时间分别约为110 ns和130 ns,这与氧化硅低、高阻态切换的时间(低阻态到高阻态 ≈ 50 ns;高阻态到低阻态 ≈ 100 ns)较为吻合^[24],说明氧化硅水平隧穿结电子源的电发射应该与氧化硅的阻变现象相关。同时,还进行了两组对照实验:一是在已被证实没有阻变效应的氮化硅衬底^[25-26]上加工相同的结构,发现其偏压加到100 V都未发射出能够被探测的发射电流;二是将石墨烯电极替换为金属电极,并分别在氧化硅和氮化硅衬底上加工同样器件,发现氧化硅衬底上的器件能够发生阻变并发射电子,而氮化

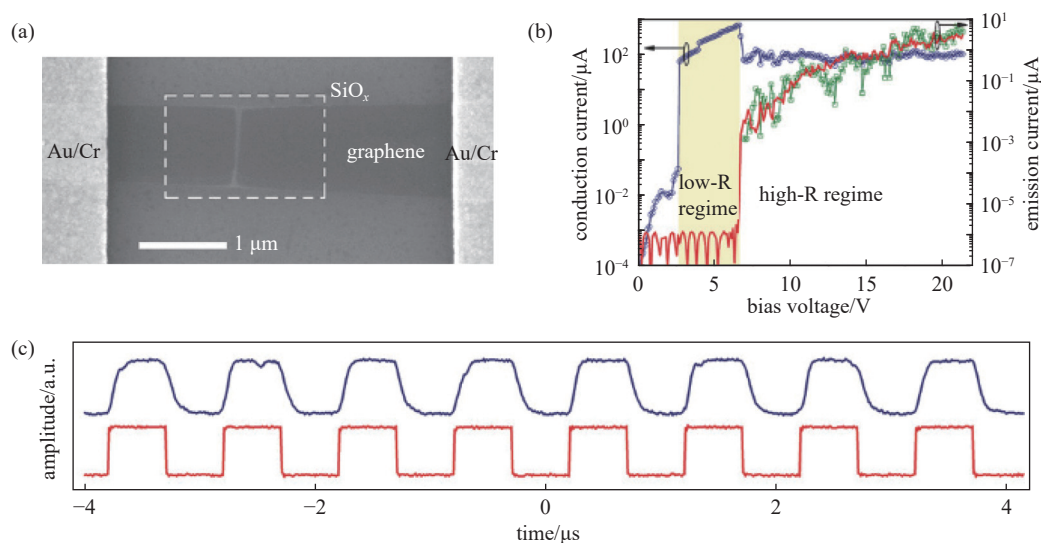


图1 单个氧化硅水平隧穿结电子源的扫描电镜表征和电学测量。(a)扫描电镜图,(b)传导电流、发射电流与电极两端偏置电压的关系图,(c)瞬态响应测试图^[18]

Fig. 1 Scanning electron microscope (SEM) characterization and electrical measurements of a single SiO_x HTJES. (a) SEM image, (b) conduction and emission currents versus bias voltage curves, (c) temporal response curves^[18]

硅衬底上的器件则没有阻变和电子发射。这两组对照实验进一步验证了上述猜想。

为进一步解释氧化硅水平隧穿结的电子发射机制, 作者在 SiO_2 (100 nm)/ SiN_x (50 nm) 薄膜上利用碳纳米管作为电极构建了该类型电子源, 并对其工作后的区域进行 X 射线能谱分析(XEDS)和高分辨率透射电镜(TEM)表征。由于该器件电子发射主要发生在高阻态区, 在表征前将其设定在高阻态, 得到图 2 所示的表征图。由 Yao 等^[26-27]的工作可知, 氧化硅的阻变主要与导电细丝(主要成分为半金属性硅纳米晶体)的形成和断裂有关, 当导电细丝形成时氧化硅处于低阻态, 当进一步加偏压使导电细丝断裂时氧化硅处于高阻态, 并且该过程是可逆的。图 2 验证了 Yao 等的工作, 从图中可以看到, 在电子发射时, 碳纳米管电极间的纳米狭缝中形成了由半金属硅-氧化硅-半金属硅构成的类 MIM 隧穿结结构, 由此可见电子发射主要与该隧穿结结构

有关。

基于前面的表征, 作者建立了如图 3 所示的氧化硅水平隧穿结的理论模型。图 3(a)为其结构示意图, 左右两端为由导电细丝断裂形成的阴极和阳极, 中间为几十纳米的氧化硅沟道, 图 3(b)和(c)分别是沿着氧化硅沟道和垂直氧化硅-真空界面的能带示意图。整个电子发射的微观过程可以定性描述为: 当在两电极间施加一定偏压时, 电子在阴极通过量子隧穿效应进入到氧化硅的导带中, 并在电场力的作用下向阳极运动, 由于多种散射机制的存在, 其在运动过程中会受到大量散射, 从而改变其运动方向和能量, 当其恰好运动到氧化硅-真空界面且能量高于氧化硅的电子亲和势时, 其就能以一定的概率发射到真空中。利用该理论, 我们成功解释了氧化硅衬底上岛状金属薄膜的电子发射, 证明其电子发射并不是来源于岛状金属薄膜本身, 而是来源于其氧化硅衬底^[20]。

定量地, 作者用 FN 隧穿公式^[28]描述电子从阴极隧穿到氧化硅导带的过程; 用牛顿运动学和费米黄金定则^[29]描述电子在氧化硅沟道的漂移、散射过程; 用 Kuhr 等^[30]提出的公式描述电子在氧化硅和真空界面的发射概率。同时, 借鉴 Jacoboni 等^[29]提出的蒙特卡洛模拟框架, 利用上述的定量化公式对氧化硅隧穿电子源的理论性能进行了计算, 发现当氧化硅沟道长度为 50 nm, 电极厚度为 3 nm, 在 1.4 V/nm 的强电场作用下, 其发射电流密度可达 $3.0 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, 发射效率可达 87%。同时在这一仿真结果的指导下, 成功制作出了极限电压条件下发射电流密度为 $4.4 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ (以实际发射面积计算), 发射效率为 83.7% 高性能氧化硅水平隧穿结电子源^[21], 该性能远优于传统 MIM 隧穿结电子源目前所报道的 0.24 A/cm^2 的最高发射电流密度^[13]和 48.5% 的最高发射效率^[31]。

作者还对氧化硅水平隧穿结电子源在不同真空度下 ($10^{-4} \sim 10^2 \text{ Pa}$) 的发射性能进行了研究。如图 4(a)所示, 当真空度在 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ Pa}$ 变化时, 其发射电流保持不变, 表明在该区间内氧化硅水平隧穿结电子源的发射对工作环境的真空度不敏感。当环境压强高于 10^{-1} Pa 时(图 4(b)), 发射电流和传导电流都急剧下降, 在 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ Pa}$ 这一区间内, 二者分别下降了 3 个和 1 个数量级。这一现象可以归因于氧化硅的阻变效应, 该效应实际上是由

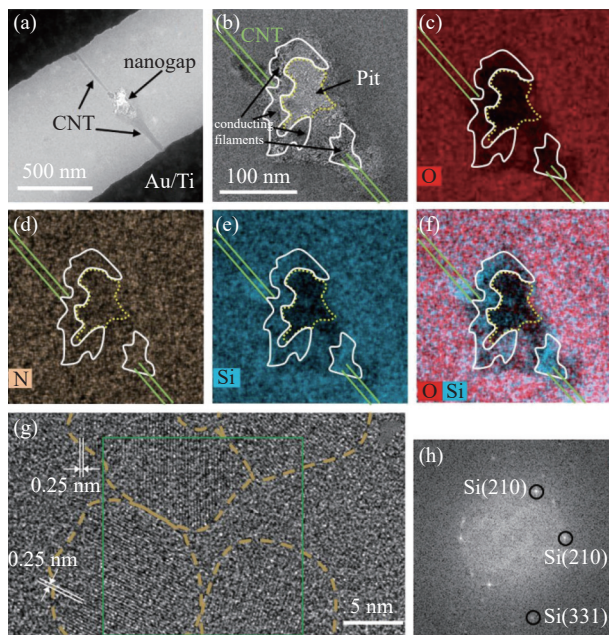


图2 氧化硅水平隧穿结高阻态下的透射电镜表征。(a)透射电镜图, (b)~(f)相关元素的 XEDS 元素分布图, (g)硅纳米晶体的高分辨透射电镜图, (h)为 (g)图中绿色区域的快速傅里叶变化图^[21]

Fig. 2 Transmission electron microscopy (TEM) characterization of a silicon oxide horizontal tunneling junction in the high-resistance state. (a)TEM image, (b)~(f) XEDS elemental mapping of the elements of interest, (g) high-resolution TEM image of the silicon nanocrystals, (h) fast Fourier transformation of the green region in (g)^[21]

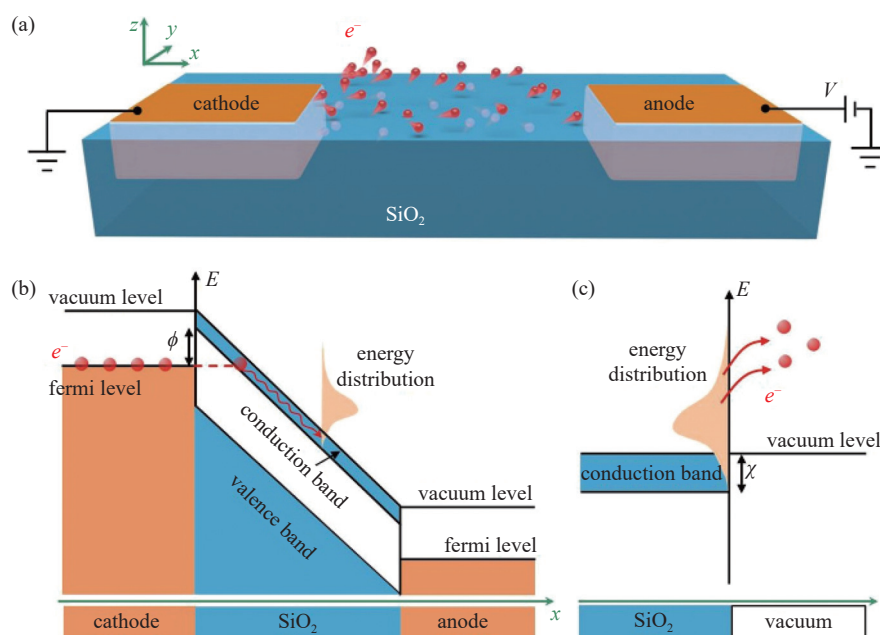


图3 氧化硅水平隧穿电子源的工作原理。(a)该电子源的结构示意图,(b)沿着氧化硅沟道的能带示意图,(c)垂直于氧化硅-真空界面的能带示意图^[21]

Fig. 3 Working principle of SiO_x HTJES. (a) Schematic structure of the HTJES, (b) energy band diagram along the silicon oxide channel, (c) energy band diagram perpendicular to the SiO_x -vacuum interface^[21]

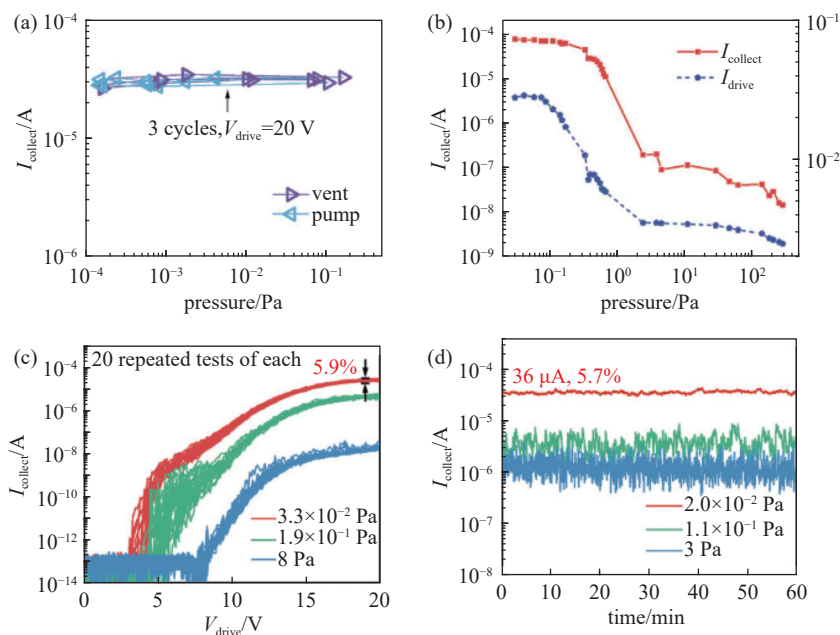


图4 氧化硅水平隧穿结电子源对真空度的敏感性。(a)在 10^{-4} Pa ~ 10^{-1} Pa的连续变化中所测到的发射电流,(b)发射电流与传导电流随真空度的变化曲线,发射电流在不同真空度下的(c)可重复性和(d)稳定性^[40]

Fig. 4 Vacuum pressure sensitivity of electron emission from SiO_x HTJES. (a) Emission current measured under vacuum pressure between 10^{-4} Pa and 10^{-1} Pa, (b) emission and conduction current versus vacuum pressure, (c) reproducibility and (d) stability of electron emission from SiO_x HTJES under different vacuum pressure^[40]

$\text{SiO}_x \rightleftharpoons \text{Si} + \frac{x}{2}\text{O}_2$ 这样一个可逆的氧化还原反应主导的,因此其发射性能与周围环境中氧气的含量有关。

当压强变大时,环境中氧气的含量升高,半金属硅导电细丝的形成被抑制,导致隧穿结中氧化硅沟道

变长。因此当两端偏压维持不变时,隧穿结中电场强度减弱,使得隧穿电流减小,进而抑制了电子发射。同时,还在不同压强下对氧化硅水平隧穿结电子源发射的可重复性(图 4(c))和稳定性(图 4(d))进行了测试,发现虽然发射电流随压强的变高会有所减小,但其仍保持良好的可重复性和稳定性。综合上述结果可知,氧化硅隧穿电子源能够耐受的极限真空度为 $\sim 10^{-1}$ Pa,且能在不同压强下维持稳定的发射,这一性能远优于目前所报道的其它场发射电子源^[32-34]和热电子源^[35-36]。同时,要想制成独立封装的片上真空电子器件,片上真空的获得是必不可少的,但片上高真空的获得还是一个尚未解决的难题。目前能够达到的片上真空也仅为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ Pa^[37-39],而在这一区间,氧化硅水平隧穿结电子源已能正常工作^[40],说明其作为片上电子源具有显著的优势。

2 氧化硅水平隧穿结电子源的阵列化集成

氧化硅水平隧穿结电子源全流程采用微纳加工工艺,且使用的是与硅基集成电路兼容的氧化硅衬底,使得其能够大规模阵列化集成。另外,尽管氧化硅水平隧穿结电子源发射电流密度高,是传统 MIM 隧穿结电子源的 10^5 倍以上,但是单个器件能够产生的发射电流仅为 $1 \mu\text{A}$ 量级,不能较好地满足

行波管、X 射线源、中和器、紫外光源等真空电子器件的需求,还需要通过大规模阵列化集成来提高其电流发射能力。为了达成这一目标,本课题组探索了级联式和并联式两种阵列化集成方案,这两种方案对电子源的发射性能有着不同的提升。

2.1 级联式阵列化集成

如图 5(a)所示,将多个氧化硅水平隧穿结电子源进行首尾相连即可构成级联式阵列^[41]。当该阵列的两端加上一定偏压后,多个电子源同时工作,其传导电流会串行地经过所有器件,每通过一个器件就会有一部分传导电流转变为发射电流。由此可以看出级联式的优点在于:下级电子源重复利用了上级电子源未被发射的传导电流(如图 5(b)所示),因此理论上可以提高该电子源的电流发射效率。对于级联式阵列,可以使用一个自治方程组来描述 n 级级联式阵列:

$$\begin{cases} V = \sum_{i=1}^n V^i \\ E^i = \frac{V^i}{d}, & i = 1, 2, \dots, n \\ I_c^i = I(E^i), & i = 1, 2, \dots, n \\ I_c^{i+1} = I_c^i (1 - \eta(E^i)), & i = 1, 2, \dots, n \\ I_e = I_c^1 - I_c^{n+1} \\ \eta = \frac{I_e}{I_c^1} \end{cases} \quad (1)$$

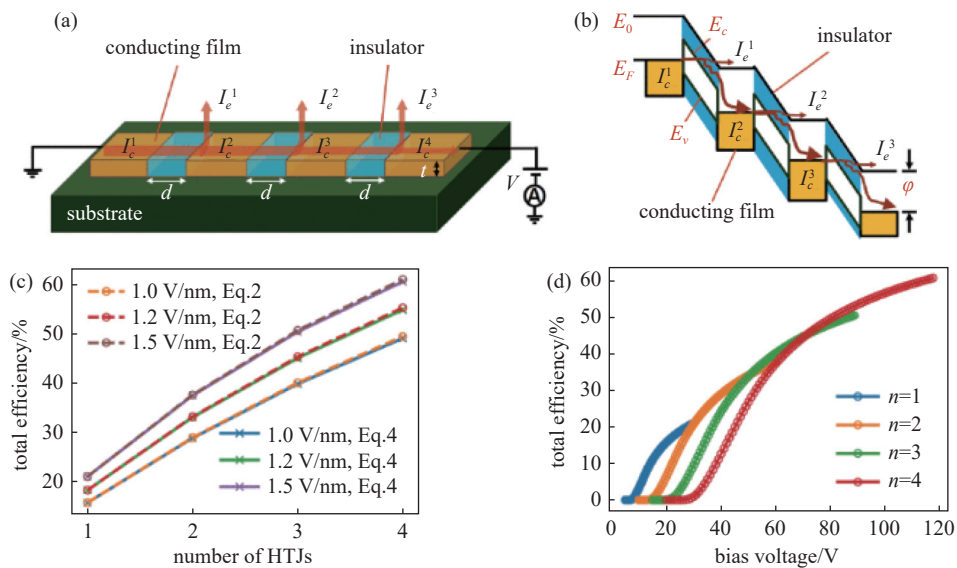


图5 氧化硅水平隧穿结电子源的级联式集成。(a)结构示意图,(b)能带示意图,(c)不同电场强度下总发射效率和级联电子源个数的关系图,(d)不同级联数下总发射效率与阵列总电压的关系图^[41]

Fig. 5 Cascaded integration of SiO_x HTJES. (a) Schematic structure, (b) energy band diagram, (c) emission efficiency versus the number of electron sources, (d) emission efficiency versus bias voltage^[41]

其中, V 是施加在整个阵列两端的电压, 其为单个器件两端电压 V^i 之和; E^i 是施加在第 i 个器件上的平均场强, 传导电流 $I(E^i)$ 和发射效率 $\eta(E^i)$ 都是关于它的函数, 该函数关系可以通过对单个器件的电学测量获得; 总的发射电流 I_e 则可以通过左右两端器件的传导电流 (I_c^i 和 I_c^{n+1}) 之差获得; 总的电流发射效率 η 则被定义为总发射电流 I_e 与第一个隧穿结的传导电流 I_c^1 的比值。利用该方程组结合已有的单个电子源的相关数据, 给出了如图 5(c) 中实线表示的不同电场强度下总发射效率 η 和级联电子源个数 n 的关系图。可以看到, 在场强一定的情况下, 总的发射效率 η 随级联数 n 的增加而增加。图 5(d) 是不同级联数下总发射效率 η 与阵列总电压 V 的关系, 不难发

现, 级联数 n 越大, 能够达到的最大发射效率 η 越大, 需要的驱动电压也越大。

如图 6(a) 和 (b) 所示, 利用金纳米线加工出具有 3 个氧化硅水平隧穿结电子源的级联阵列。先对每个电子源依次单独进行活化, 其典型的发射曲线如图 6(c) 所示, 可以看到最高发射效率为 15.9%。再直接在阵列的两端进行扫描偏压得到图 6(d) 的三级级联后的发射曲线, 其最高发射效率升至 47.6%, 是单个器件的近 3 倍, 且与理论计算结果较为吻合。通过对测试后的器件进行 SEM 表征 (如图 6(e)), 发现 3 个电子源的纳米间隙中均有明显的无定形碳沉积痕迹, 说明这 3 个电子源均发生了自由电子发射^[42]。

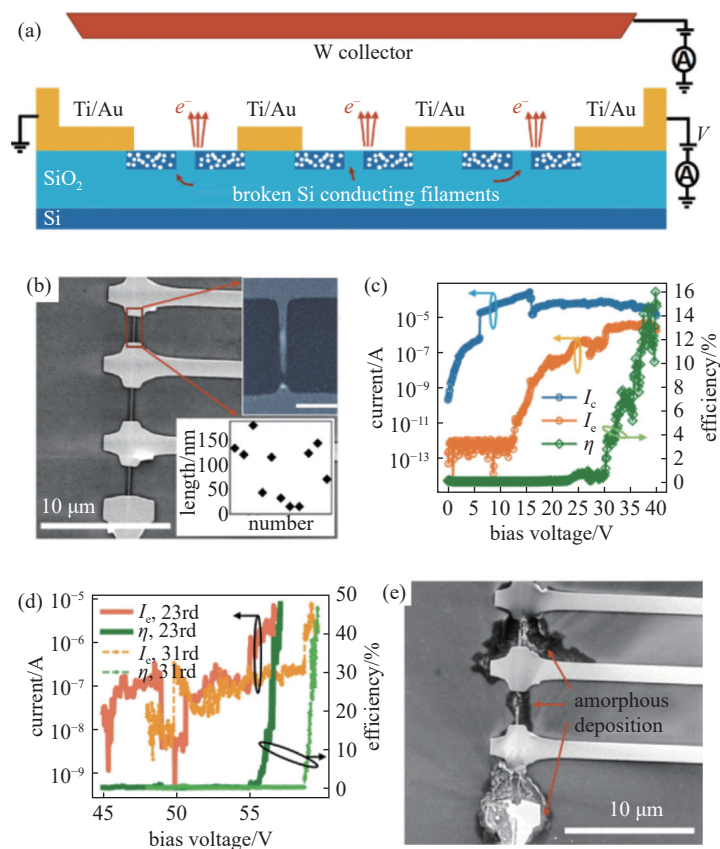


图6 对 3 个氧化硅隧穿电子源的级联式集成。(a)结构示意图, (b)测试前 SEM 表征图, (c)单个电子源的发射特性图, (d)阵列的发射曲线图, (e)测试后 SEM 表征图^[41]

Fig. 6 Cascaded integration of 3 SiO_x HTJES. (a) Schematic structure, (b) pre-test SEM image, (c) emission characteristics of a single electron source, (d) emission characteristics of the array, (e) post-test SEM image^[41]

2.2 并联式阵列化集成

级联式集成方式虽然能够提升器件整体的发射效率, 但是若其中某个器件损坏就会导致阵列整体无法工作, 为此作者发展了一套并联式阵列化集

成的方法。如图 7(a) 所示, 使用石墨烯条带和叉指电极制作了 5×20 个并联集成的氧化硅水平隧穿结电子源阵列, 其发射特性如图 7(b) 所示, 可以看到其传导电流也具有阻变的特征, 同时其在偏压为

24.8 V 时发射电流能够达到 73.5 μA , 相较于单个电子源 3.2 μA 的发射电流增大了近 23 倍。同时我们还在 5×10^{-6} Pa 的真空环境下使其连续工作 24 h, 发现其发射电流均方根噪声比 $\langle \Delta I^2 \rangle^{1/2} / \langle I \rangle$ 小于 4% (如图 7(c)), 具有较好的发射稳定性。

除了上述平面并联式的集成阵列, 还提出了一种基于氧化硅通孔的并联集成方案, 其单个电子源的结构如图 8(a) 和 (b) 所示, 其主要由两块同心的石墨烯薄膜构成, 二者由一个宽度约为 100 nm 的纳米狭缝隔开^[43]。内圈的石墨烯通过氧化硅通孔与底层的重掺杂的硅衬底接触, 外圈的石墨烯则与 Ti/Au 电极相连, 电子源的偏置电压则通过顶部的金属电极和底层硅衬底加在纳米狭缝上。通孔结构相较于上述的纯平面结构主要有两个好处: 一是电子源工作中产生的热量能够由内圈的石墨烯导

到底层的重掺杂硅上, 能够解决纯平面结构难以散热的问题。二是通孔周围一圈全是纳米狭缝, 提高了衬底空间的利用率, 相同的面积下其能集成更多的发射单元。基于此, 作者在一块 $594 \mu\text{m} \times 594 \mu\text{m}$ 的方形区域上集成了 1296 (36×36) 个发射单元, 图 8(c) 是其光学显微镜照片。通过对特定区域的 SEM 表征 (图 8(d)) 可发现, 各个发射单元加工的均一性较好。对其发射特性进行测量, 得到如图 8(e) 所示的发射曲线图, 发现对于集成 1296 个发射单元的阵列, 在偏压为 38 V 时, 其发射电流可达 1 mA, 此时对应的发射电流密度达到了 $283 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 。还分别测试了单个发射单元、 8×8 、 20×20 和 36×36 阵列电子源在偏压为 38 V 时的发射电流, 得到如图 8(f) 的曲线图, 发现发射电流随集成数目线性增加, 表明该阵列具有良好的可扩展性。

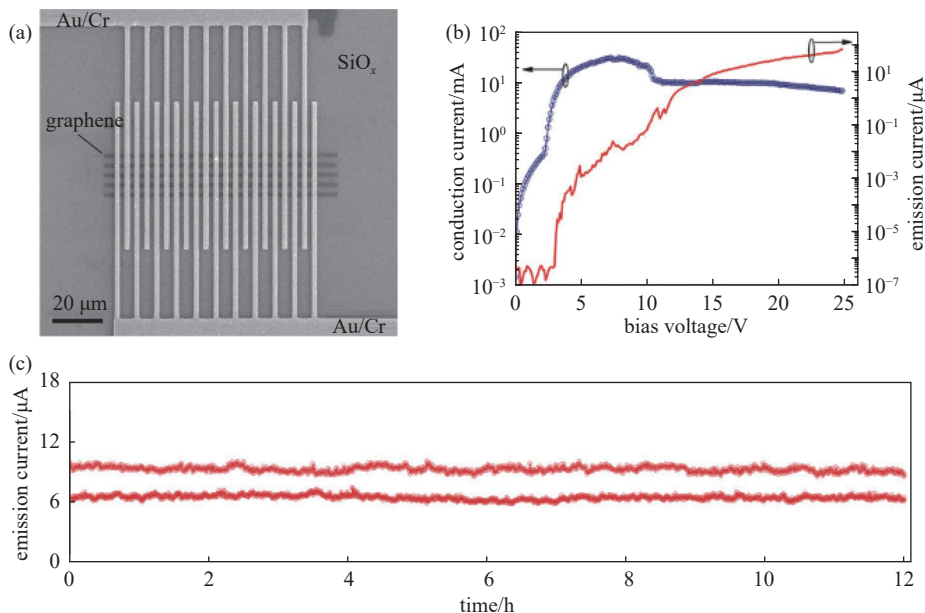


图7 5×20 个并联式集成的氧化硅水平隧穿结电子源阵列。(a) SEM 表征图, (b) 发射特性图, (c) 长时间工作的稳定性曲线^[18]

Fig. 7 An array of 5×20 parallel integrated SiO_x HTJES. (a) SEM image, (b) emission characteristics, (c) long-term stability test^[18]

电子源阵列的发射均一性也是一个较为重要的指标, 对一个集成了 225 (15×15) 的通孔结构的阵列的发射均一性进行了研究。由于氧化硅水平隧穿电子源在正常工作时会伴有明显的发光, 可以通过此现象来研究该阵列电子发射的空间分布^[44]。图 9(a) 展示是固定偏压为 30 V 时, 阵列传导电流、发射电流以及空间分布随时间的演变关系, 可以看到传导电流和发射电流随时间同步地增大, 到 1 h

左右接近饱和。同时每隔 5 min 记录的光学照片也证明, 激活的发射单元数也与发射电流的增长趋势一致。在最后发射电流稳定时, 225 个发射单元中有 222 个单元同时发射, 工作率约为 99%, 表明其电子发射具有较好的空间均一性。需要注意的是, 这一随时间增长阵列发射的空间均一性逐渐变好的过程是器件的激活过程, 而非器件的正常工作状态。由于单个阵列包含多个发射单元, 每个发射单元初

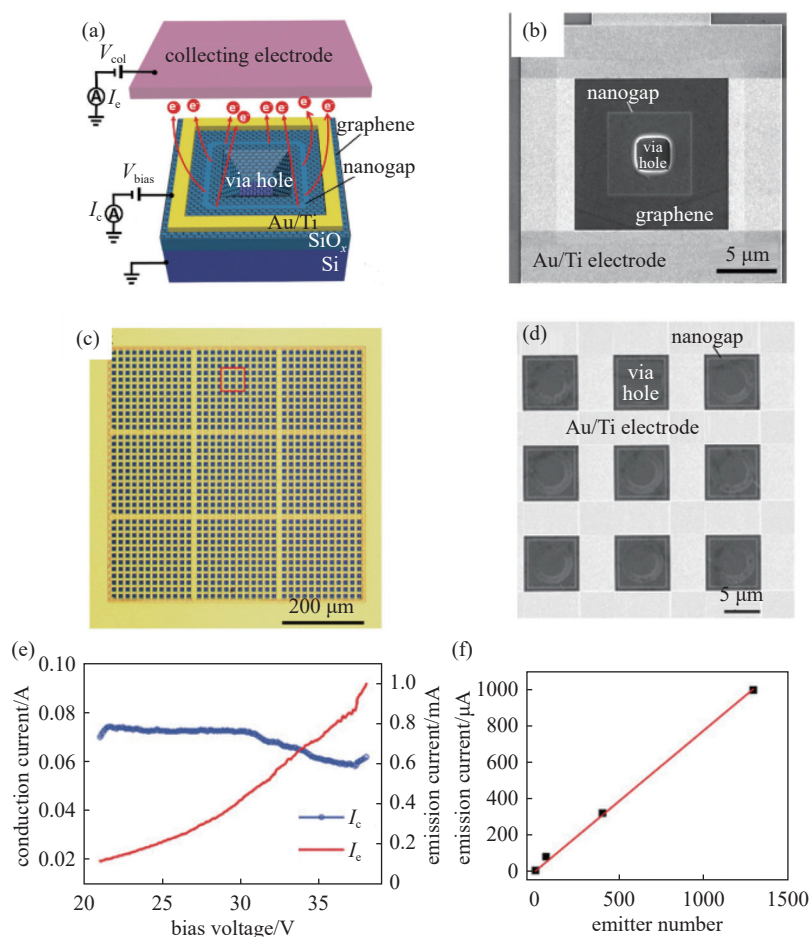


图8 通孔结构的并联式氧化硅水平隧穿结电子源阵列。单个电子源的(a)结构示意图和(b) SEM表征图, (c) 36×36 阵列的光学显微镜图, (d)为(c)图中圈中的区域的 SEM 表征图, (e) 阵列的发射特性图, (f)阵列发射电流与集成的电子源数目的关系图^[43]

Fig. 8 Array with parallel-integrated SiO_x HTJES using via-structure. (a) Schematic structure and (b) SEM image of single emitter, (c) optical microscope image of a 36×36 emitter array, (d) SEM image of the framed area in (c), (e) emission characteristics of the array, (f) dependence of emission current on emitter number of emitter arrays^[43]

始状态并不一致,因此需要采取一定的方法使阵列内的发射单元达到相同的发射状态,此处采用的便是固定偏压连续工作的激活方法。同时,还考察了不同宽度的纳米狭缝对发射的影响(图9(b)和9(c)),发现该电子源的发射性能在60~150 nm这一范围内对纳米狭缝宽度不敏感,这是其阵列的发射具有良好空间均一性的主要原因。

3 氧化硅水平隧穿结电子源的应用

通过上述对单个以及阵列化的氧化硅水平隧穿结电子源的系统研究,发现其发射性能优异,具有满足多种真空电子器件实际应用需求的潜力。下面,将以微型电离真空传感器为例,演示基于氧化硅水平隧穿结电子源的实际应用。

电离真空传感器是一种测量高真空常用的真空传感器,其基本原理是利用加速的电子与环境中的气体分子发生碰撞电离,通过测量并计算离子电流与电子电流的比值来获取环境压强^[45-46]。常用的电离真空传感器多由机械加工的方式制造,体积较大,不能够满足测量微小空间压强的需求。同时在大体积的高压强环境中,少量的初始电子即可电离产生大量的离子和次级电子(即电子繁流现象^[47]),会严重影响电离真空传感器的性能和寿命,因此其测量上限一般不能超过1 Pa。如果能够将电离真空传感器微型化、片上化,在克服传统结构体积大的缺点的同时,还能够有效抑制电子繁流,从而提高其探测上限^[48]。

如图10(a)所示,结合前文提出的集成225个

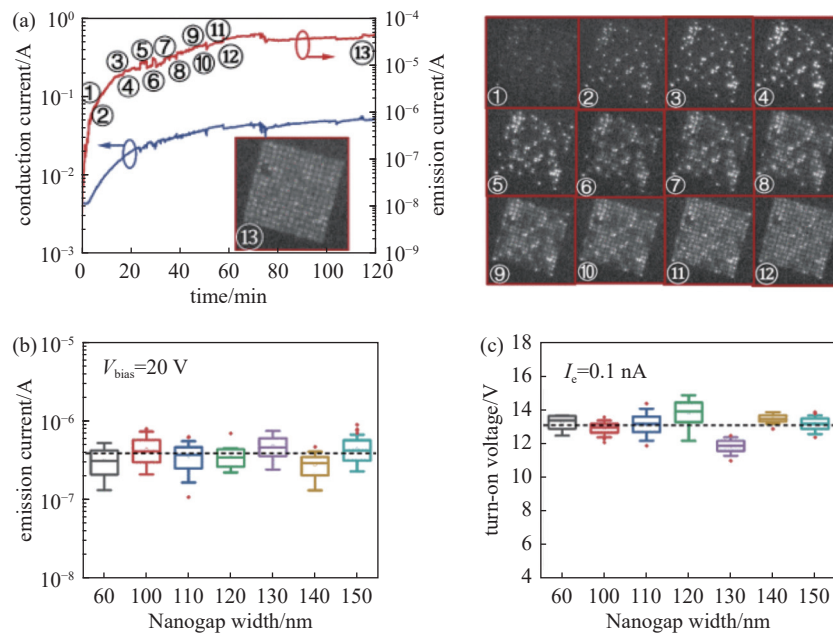


图9 集成 225 个发射单元阵列的均匀性。(a) 活化过程中传导电流、发射电流、发射空间分布随时间的演化, (b) 发射电流和 (c) 开启电压与纳米狭缝宽度的关系图^[44]

Fig. 9 Study of the uniformity of an integrated array of 225 emitting units. (a) The evolution of conduction current, emission current and spatial distribution of electron emission during the electrical activation process, (b) emission current and (c) turn-on voltage versus nanogap width^[44]

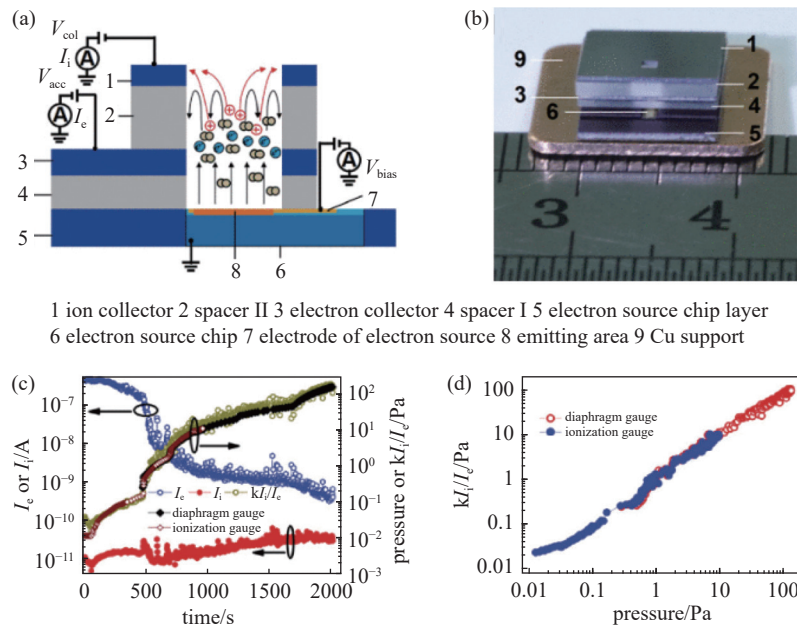


图10 微型电离真空传感器。(a)结构示意图, (b)实际光学照片, (c)在环境压强变化下, 收集到的电子电流 I_e 、离子电流 I_i 、计算得到的压强 KI_i/I_e 以及由商用真空规实际测到的压强, (d)利用商用真空规校准得到的片上真空传感器的测量曲线^[49]

Fig. 10 Miniature Ionization Vacuum Sensor (MIVS). (a) Schematic structure, (b) optical image, (c) simultaneously measured I_e and I_i , the pressure (KI_i/I_e) measured by MIVS, and the pressure measured by commercial gauges, (d) pressure (KI_i/I_e) measured by MIVS after calibration with commercial vacuum gauges^[49]

发射单元的通孔结构电子源阵列, 利用重掺杂的硅片作为电子加速极和离子收集极, 用带通孔的

BF33 玻璃作为绝缘间隔层, 使用阳极键合工艺制备出微型化五层堆垛台阶状的电离真空传感器^[49]。

图10(b)是该传感器的实物照片,整个传感器大小为 $14\text{ mm}\times 9\text{ mm}\times 2.7\text{ mm}$,其被固定到一个铜基座上以帮助散热。将其放在一个真空度随时间变化的真空腔室中,利用商用真空规标定真空腔室的压强,测量其电子电流 I_e 、离子电流 I_i ,并计算压强示值 KI_i/I_e (此处 $K=250\text{ Pa}$),得到如图10(c)的曲线图。从该曲线图中可以看到,制作的微型电离真空传感器在约 $10^{-2}\sim 10^2\text{ Pa}$ 内与商用真空规的结果有较好的一致性。进一步,利用商用真空规做标定,绘制出压强示值 KI_i/I_e 与环境压强的关系图,发现在 $1.3\times 10^{-2}\sim 133\text{ Pa}$ 范围内二者有较好的线性关系,表明此微型电离真空传感器的测量上限可达 $\sim 100\text{ Pa}$,较大地拓宽了电离真空传感器的测量上限。

由于对氧化硅水平隧穿结电子源的研究起步较晚,基于它构建的微型化、片上化真空电子器件目前并不多,但其优良的发射性能使我们相信未来会有更多基于其发展出的应用。

4 总结

基于氧化硅的软击穿和阻变特性,构建了一个氧化硅水平隧穿结,发现该结构具有电子发射的能力,利用SEM、TEM等多种表征手段解释了其中电子发射的微观过程并建立了理论模型。进一步结合蒙特卡洛模拟,指出该结构具有构成高效率和高密度电子源的潜力,并实际制造出发射效率为83.7%,发射电流密度为 $4.4\times 10^5\text{ A/cm}^2$ 的高性能电子源。还探索了该电子源阵列化集成的可能性,提出级联式和并联式两种集成方案。其中,级联式集成方案能够有效提高整个阵列的电流发射效率;并联式则更适合大发射电流的应用场景。在并联式集成中,改进了单个发射单元的形态,使用通孔结构建立顶部工作区域与底部重掺杂硅衬底的散热通道,使其更有利于高密度集成,最终实现了1296个发射单元的阵列化集成,并得到了1 mA的总发射电流。还考察了电子源发射空间均一性的问题,发现并联式集成阵列的发射在空间上具有较好的均一性。最后,演示了基于该电子源构建的微型电离真空传感器,表现出良好的性能,展现了氧化硅水平隧穿结电子源较高的实际应用潜能。

参 考 文 献

- [1] Yamamoto S. Fundamental physics of vacuum electron sources[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2006, 69(1): 181–232
- [2] Schagen P. Alternatives to thermionic emission[J]. *British Journal of Applied Physics*, 1965, 16(3): 293–303
- [3] Spindt C A. A thin-film field-emission cathode[J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, 39(7): 3504–3505
- [4] Fomani A A, Guerrero S A, Velasquez-Garcia L F, et al. Toward amp-level field emission with large-area arrays of Pt-coated self-aligned gated nanoscale tips[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, 61(7): 2538–2546
- [5] Huang J, Huang Y, Zeng M, et al. Fabrication of spindt-type nanometer-sized chromium tips for application as field-electron emitters by releasing the stress of the deposited thin film[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(1): 351–357
- [6] Schwoebel P R, Spindt C A, Holland C E. High current, high current density field emitter array cathodes[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2005, 23(2): 691–693
- [7] Hsu D S Y, Shaw J. Integrally gated carbon nanotube-on-post field emitter arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(1): 118–120
- [8] Zhang H, Tang J, Yuan J, et al. An ultrabright and monochromatic electron point source made of a LaB6 nanowire[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(3): 273–279
- [9] Chen Y, Deng S, Xu N, et al. Recent progress on ZnO nanowires cold cathode and its applications[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(8): 2150
- [10] Wang Y, Wu G, Xiang L, et al. Single-walled carbon nanotube thermionic electron emitters with dense, efficient and reproducible electron emission[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(45): 17814–17820
- [11] Wang Y, Fang L, Xiang L, et al. On-chip thermionic electron emitter arrays based on horizontally aligned single-walled carbon nanotubes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(2): 1069–1074
- [12] Mead C A. Operation of tunnel-emission devices[J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(4): 646–652
- [13] Suzuki M, Sagawa M, Kusunoki T, et al. Enhancing electron-emission efficiency of MIM tunneling cathodes by reducing insulator trap density[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, 59(8): 2256–2262
- [14] Murakami K, Miyaji J, Furuya R, et al. High-performance planar-type electron source based on a graphene-

- oxide-semiconductor structure[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(21): 213501
- [15] Kohn E S. Cold-Cathode electron emission from silicon[J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 18(7): 272–273
- [16] Sukegawa T, Kan H, Nakamura T, et al. GaP negative-electron-affinity cold cathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(5): 3780–3782
- [17] Takeuchi D, Makino T, Kato H, et al. Electron emission from a diamond (111) p–i–n+ junction diode with negative electron affinity during room temperature operation[J]. *Applied Physics Express*, 2010, 3(4): 041301
- [18] Wu G, Li Z, Tang Z, et al. Silicon oxide electron-emitting nanodiodes[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2018, 4(8): 1800136
- [19] Li Z, Wei X. A high-efficiency electron-emitting diode based on horizontal tunneling junction[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(7): 1201–1204
- [20] Zhan F, Li Z, Wang Y, et al. A new emission mechanism for island-metal-film-based electron sources[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(11): 5119–5124
- [21] Li Z, Zhang Z, Tian J, et al. Efficient and dense electron emission from a SiO₂ Tunneling diode with low poisoning sensitivity[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(3): 1270–1277
- [22] Yao J, Zhong L, Natelson D, et al. Silicon Oxide: A Non-innocent Surface for Molecular Electronics and Nanoelectronics Studies[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(4): 941–948
- [23] Yao J, Zhong L, Natelson D, et al. Intrinsic resistive switching and memory effects in silicon oxide[J]. *Applied Physics A*, 2011, 102(4): 835–839
- [24] Yao J, Lin J, Dai Y, et al. Highly transparent nonvolatile resistive memory devices from silicon oxide and graphene[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 1101
- [25] Yao J, Zhong L, Zhang Z, et al. Resistive switching in nanogap systems on SiO₂ substrates[J]. *Small*, 2009, 5(24): 2910–2915
- [26] Yao J, Sun Z, Zhong L, et al. Resistive switches and memories from silicon oxide[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(10): 4105–4110
- [27] Yao J, Zhong L, Natelson D, et al. In situ imaging of the conducting filament in a silicon oxide resistive switch[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2(1): 242
- [28] Fowler R H, Nordheim L. Electron emission in intense electric fields[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1928, 119(781): 173–181
- [29] Jacoboni C, Reggiani L. The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1983, 55(3): 645–705
- [30] Kuhr J C, Fitting H J. Monte Carlo simulation of electron emission from solids[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 1999, 105(2–3): 257–273
- [31] Murakami K, Adachi M, Miyaji J, et al. Mechanism of highly efficient electron emission from a graphene/oxide/semiconductor structure[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(7): 2265–2273
- [32] Busta H H. Vacuum microelectronics-1992[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1992, 2(2): 43–74
- [33] Busta H H, Pryor R W. Performance of laser ablated, laser annealed BN emitters deposited on polycrystalline diamond[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1998, 16(3): 1207–1210
- [34] Busta H H, Pogemiller J E, Zimmerman B J. Emission characteristics of silicon vacuum triodes with four different gate geometries[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1993, 40(8): 1530–1536
- [35] Jenkins R. A review of thermionic cathodes[J]. *Vacuum*, 1969, 19(8): 353–359
- [36] Gallagher H E. Poisoning of LaB₆ Cathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(1): 44–51
- [37] Gan Z, Huang D, Wang X, et al. Getter free vacuum packaging for MEMS[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 149(1): 159–164
- [38] Nemanič V, Umer M, Zajec B. Pressure determination in small electron tubes[J]. *Vacuum*, 2001, 61(2–4): 465–470
- [39] Bachmann M, Düsberg F, Langer C, et al. Vacuum-sealed field emission electron gun[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2020, 38(2): 023203
- [40] Zhan F, Li Z, Yang W, et al. Pressure sensitivity of electron emission from SiO_x tunneling diodes and their outstanding emission performance under rough vacuum[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2022, 8(9): 2200216
- [41] Li Z, Wei X. A cascade electron source based on series horizontal tunneling junctions[J]. *IEEE Transactions on*

- [Electron Devices](#), 2021, 68(2): 818–821
- [42] Reimer L. Transmission electron microscopy: Vol. 36[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1984
- [43] Yang W, Li Z, Wang Y, et al. High-performance on-chip electron sources based on electroformed silicon oxide[J]. [Advanced Electronic Materials](#), 2020, 6(7): 2000268
- [44] Zhan F, Yang W, Li Z, et al. SiO_x tunneling diode arrays with uniform electron emission[J]. [IEEE Electron Device Letters](#), 2022, 43(8): 1339–1342
- [45] Temple D. Recent progress in field emitter array development for high performance applications[J]. [Materials Science and Engineering: R: Reports](#), 1999, 24(5): 185–239
- [46] Jousten K, Boineau F, Bundaleski N, et al. A review on hot cathode ionisation gauges with focus on a suitable design for measurement accuracy and stability[J]. [Vacuum](#), 2020, 179: 109545
- [47] Yu-zhi W. A fundamental theory of high pressure hot cathode ionization gauges[J]. [Vacuum](#), 1984, 34(8-9): 775–778
- [48] Schulz G J, Phelps A V. Ionization gauges for measuring pressures up to the millimeter range[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 1957, 28(12): 1051–1054
- [49] Yang W, Liu W, Wang X, et al. A miniature ionization vacuum sensor with a SiO_x-based tunneling electron source[J]. [IEEE Transactions on Electron Devices](#), 2021, 68(10): 5127–5132