文章编号:1007 - 4252(2022)05 - 0005 - 448　　DOI:10.20027/j.gncq.2022.0050

平面型硅阴极发射稳定性研究

史东方,刘　梦,李　铁,王跃林*
(中国科学院上海微系统与信息技术研究所,上海 200000)

摘要:平面电子管器件的阴极发射稳定性、可持续性和可靠性是器件实际应用前需要解决的关键问题。本文对空气和真空环境中平面型硅阴极的长时间发射特性进行了系统的测量和分析。实验结果发现,在空气环境中,阴极存在一个约 1 h 的电流稳定过程,而真空中的样品不存在这样的过程。研究还发现器件关断后放置在空气环境中会导致重新开启后电流衰减。此外,使用透射电子显微镜(TEM)观察平面型硅阴极表面的微观结构,发现长时间发射后阴极表面部分区域变得粗糙且高度下降了 5 ~ 6 nm。本文的研究结果有助于提高研究者们对平面电子管器件失效机理的认识,并为平面型硅阴极的平面电子管器件设计和应用提供有价值的指导。

关键词:阴极;平面电子管;稳定性;真空微电子学;场发射
中图分类号:O462.4　　**文献标志码**:A

Emission Stability Research ofA Flat Silicon Cathode

SHI Dong-fang, LIU Meng, LI Tie, WANG Yue-lin*
(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200000, China)

Abstract: The emission stability, sustainability and reliability of cathodes are among key issues to be solved before the practical application of planar electron tube devices. In this article, the long-term continuous emission characteristics of a flat silicon cathode have been measured and analyzed in air and vacuum environment systematically. A stabilization process of about an hour exists for all samples in air while no such a process exists for samples in vacuum. The current sustainability between turn-on states has also been studied and the air ambient during turn-off states is found to be the main reason of emission unsustainability. In addition, the microstructure features of the flat-type silicon cathode have also been revealed by TEM observation. A height drop of 5 ~ 6 nm on the silicon surface is observed along with obvious roughness in the emission area. The results in this work will help researchers improving the understanding of failure mechanisms in planar electron tube devices, and provide valuable guidelines for the design and operation of planar electron tube devices with flat-type silicon cathodes.

收稿日期:2022-08-31;　　**修订日期**:2022-10-08
基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(62104242);上海市青年科技英才扬帆计划(20YF1456500).
作者简介:史东方(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为平面真空器件(E-mail:shidf027@163.com).
通信作者:王跃林(1959-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为 MEMS (E-mail:ylwang@mail.sim.ac.cn).

Key words: Cathodes; Planar Electron Tube; Stability; Vacuum Microelectronics; Field Emission

0　引言

平面电子管器件通过在阴极和阳极之间构建纳米量级的真空或空气沟道,利用电子的场发射进行电流的传输。和固体沟道器件相比,平面电子管器件具有较高的响应速率上限和对极端环境的耐受性[1-2]。从 2012 年平面电子管具有里程碑意义的工作[3]以来,该研究领域在材料[4-5]、器件结构[6-7]、仿真[8]和制造[9-10]等方面都取得了重大进展。然而,有关器件长时间工作时的发射稳定性和可靠性的研究仍然很少。由于这对于平面电子管器件的实际应用具有重要的意义[11],因此也越来越受到重视。在平面电子管器件的阴极结构上,平面型阴极被认为比单尖端型阴极具有更好的发射稳定性,因为后者的结构更容易受到破坏以至于会产生严重的电流退化[12]。此外,小于电子平均自由程的沟道长度也使平面型阴极可以实现以往尖端型阴极才能达到的低开启电压、大电流、快速响应等特性[2,13],因此,其有望为平面电子管器件的应用提供一种技术解决方案。

本文研究了平面型硅阴极有关发射稳定性的三个方面,包括在空气/真空条件下的连续发射稳定性、关断后的发射恢复能力以及长期发射前后的结构特征。

1　正文

1.1　测试系统和基本电学性能

本工作中的平面型阴极是通过在硅衬底和金顶层之间选择性腐蚀二氧化硅而制成的[13]。通过控制腐蚀时间,形成具有纳米沟道的二极管结构(沟道宽度约为 100 nm,高度约为 80 nm)。稳定性测量系统如图 1(a)所示,实验中使用半导体参数测试仪(Keithley 4200 SCS)进行电学性能测试,使用真空探针台来提供真空条件(~10^{-5} torr)。图 1(b)显示了测试样品的电流-电压(I-V)特性。当电压大于 1 V 时,电流会随着外加电压的增加呈指数型增长。此外可以观察到,空气条件下的电流比真空条件下的电流小。在图 1(c)中,当电压大于 1 V 时,真空条件下的福勒-诺德海姆(F-N)曲线呈现更陡直的线性递减特性,表明真空条件下阴极的表面更加清洁[14]。

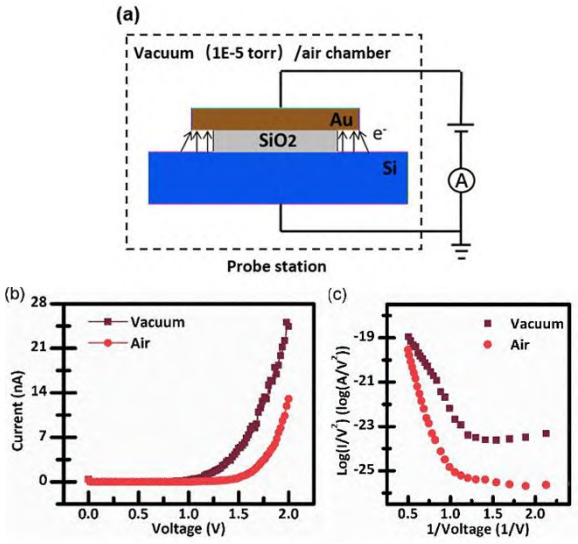

图 1　基本测试系统和样品电学性能 (a)测试系统;(b)样品在空气和真空中的 I-V 特性;(c)相应的 F-N 图

Fig. 1 The basic test system and sample electrical performance. (a) The measurement setup; (b) The typical I-V properties of a sample in air and vacuum; (c) The corresponding F-N plot

1.2　发射稳定性和可恢复性

为进一步研究器件的长期持续发射稳定性,实验中对空气和真空环境中的样品分别施加了 2 V 的恒定电压,并让器件持续工作 22 h。实验结果发现,在空气中测试的样品,电流在第一个小时内衰减了近 45%(图 2(a))。此后的 21 h 里,电流进入了一个较为平稳的阶段,其电流的标准差仅为 4.09 nA,相应的标准差系数为 9.05%。而在真空中测试的样品,在 22 h 的持续测量中,没有观察到明显的电流衰减,发射电流的标准差系数仅为 7.85%(图 2(b))。对比上述标准差系数,真空中样品的持续发射稳定性明显优于空气中样品。此外,与以往报道相比,平面型阴极在空气和真空中都能保持稳定,而其他类型的阴极要达到类似的稳定性通常需要更高的真空度或更长的稳定时间,如表 1 所示。

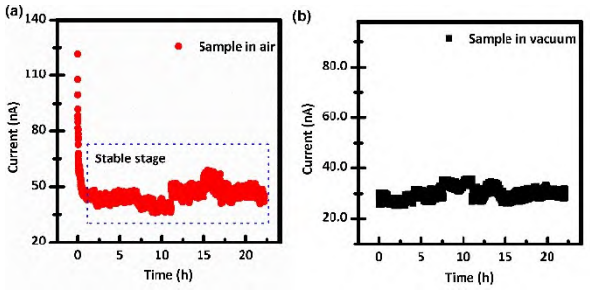

图 2 22 h 连续发射试验 (a)在空气中;(b)在真空中

Fig. 2 The 22-hour continuous emission tests. (a) In air and (b) in vacuum

表 1 不同类型阴极的持续发射稳定性比较

Table 1 Continuous emission stability comparison of different cathodes

阴极类型	材料	测试时间/h	压强/torr	电流衰减
尖端型	Au[15]	0.25	~ 10^{-6}	~ 50%
	Au[16]	>1 000	> 10^{-8}	< 10%
	GaN[11]	55	~ 10^{-5}	前 22 h 衰减 ~ 80% 之后 30 h 衰减低于 10%
平面型	Au[17]	0.1	~ 10^{-6}	< 10%, 0.1 h 后不稳定
			~ 10^{-3}	< 10%, 0.1 h 后不稳定
	石墨烯[18]	0.28	~ 10^{-6}	< 10%
			~ 10^{-3}	> 50%
	SiC[19]	24	~ 10^{-2}	< 10%
		2	760	> 70%
	Si (本工作)	22	~ 10^{-5}	< 10%
			760	第一个小时衰减 ~ 60% 之后 21 h 衰减低于 10%

在实际应用中,器件关断后的发射恢复能力也是一个值得关注的问题。为了研究这个问题,我们考虑了两种典型的平面电子管器件封装情况,一种是真空封装,另一种是空气封装。为了模拟两种封装状态,我们进行了两组实验。在第一组实验中,将探针台设置为密封的空气腔体来模拟空气封装状态下的阴极。测试样品首先在空气中进行 11 h 的持续发射,然后关断状态下在空气中继续放置 12 h,之后再施加同样的电压,进行 11 h 的持续发射。图 3(a)显示,在第二次 11 h 的持续测试过程中,稳定后的电流相比于第一次持续测试过程中的稳定电流退化了 53%,这与图 2(a)中的 22 h 连续发射的结果有很大的不同。器件连续发射的稳定性被 12 h 的空气储存所中断。之后,对更多的样品进行类似条件下的发射-放置-发射的测试。实验结果发现,样品在每个 11 h 持续发射的测试中,都可以达到一个相对稳定的状态;但稳定状态下的电流在不断降低,例如图 3(b)中一个样品所示,在前 5 次持续 11 h 的发射测试中,稳定后的电流从 18.17 nA 降低至 0.82 nA,但电流下降的幅度在不断减小。从第六次测试开始,稳定后的电流大小基本一致,约为 0.45 nA,相比于初次测试的稳定期电流,此时已经衰减了 98%。但图 3(b)中的插图显示,样品的电流随着电压增加呈指数型增长,相应的 F-N 图也具有单调递减的特征,说明尽管电流在衰减,但测试到的电流均具有电子发射的特征。

在第二组实验中,将探针台设置为一个密封的真空腔(~10^{-5}torr)来模拟真空封装的情况,并在真空条件下,进行和空气中同样时间的发射-放置-发射的测试。如图 3(c)所示,当第二次测试开始时,电流立即回到了原来的水平,并且和关断前一样稳定。此结果显示,真空封装可有力提高器件关断后的发射恢复能力。此外,为进一步研究影响发射恢复能力的因素,另一组实验将样品在关断期间从真空腔中取出,在空气中放置了 12 h 后再放回真空腔中测试时,如图 3(d)所示,观察到了类似图 3(a)中的电流衰减情况。在接下来的 11 h 内,电流不会回到原来的水平,这表明在空气中放置所导致的电流衰减有可能是不可逆的。空气中的水和二氧化碳的吸附可能是导致电流衰减的主要原因。据报道,通过将阴极加热到 350 ℃以上可以实现吸附物的解吸附[14],但这会使器件的结构和应用变得更加复杂。因此,根据上述实验结果,真空封装是用来维持器件开关状态之间发射稳定性的一种实用和有效的方法。

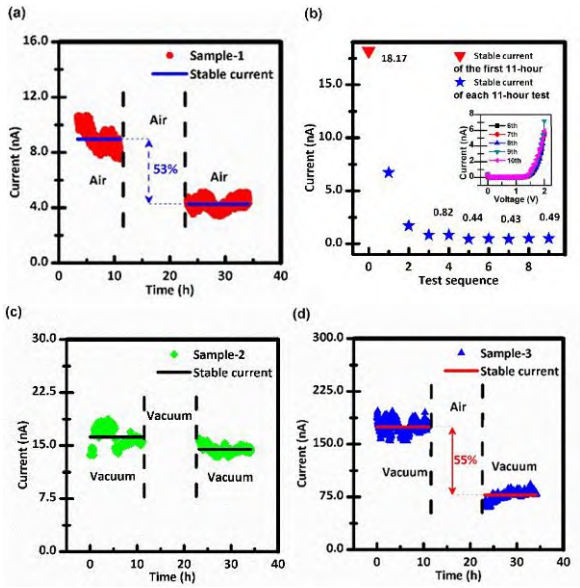

图 3　在空气和真空中器件关断后的不同发射恢复情况(a)在空气中关断后,电流是不可持续的;(b)空气中稳定电流的稳定过程,每个星号图标代表一个 11 h 的测试,两个星号之间是一个 12 h 的关断过程。插图显示最后五次测试中电流虽然相对较小,但仍具有电子发射的特征;(c)在真空中关断后,电流是可持续的;(d)关断后放置于空气中打断了真空中电流的可恢复性

Fig. 3 The different emission recoverability after turn-off in air and vacuum. (a) The stable current is unsustainable after turn-off in air; (b) The stabilization process of stable currents in air, each star icon represents an 11-hour test and between two stars is a 12-hour turn-off in air. The inset shows the relative smaller currents in the last five tests are still of characteristics of electron emission; (c) The stable current is sustainable after turn-off in vacuum; (d) Turn-off in air interrupts the recoverability of currents in vacuum

1.3　阴极表面的微观机制

此外,为了研究阴极表面在空气里长时间发射过程中的微观演变规律,实验中利用透射电子显微镜(TEM)对发射前后的阴极表面进行了表征。实验中使用了两种样品,一种只在空气中进行了短于 1 min 的发射,以确认样品具有阴极发射功能;另一种在进行 TEM 表征之前,已在 2 V 的电压条件下工作了 110 h,作为长期持续发射后的样本。

对于只有少量发射的样品,如图 4(a)和 4(b)所示,硅表面是非常平坦和连续的(在图 4(a)和 4(b)中用一条黑色虚线标出),它与硅表面上的其他区域位于同一高度。而在空气中发射了 110 h 的样品的 TEM 图像,如图 4(c)所示,在沟道区域的硅表面呈现明显的不均匀性,其高度比硅表面的其他部分低 5 ~ 6 nm(图 4(d)和 4(e)),表明发射区域可能存在微小的硅原子损耗。这种损耗将增加阴极表面和阳极底部之间的距离,这也可以对应图 3(b)中电流最终减小的现象。

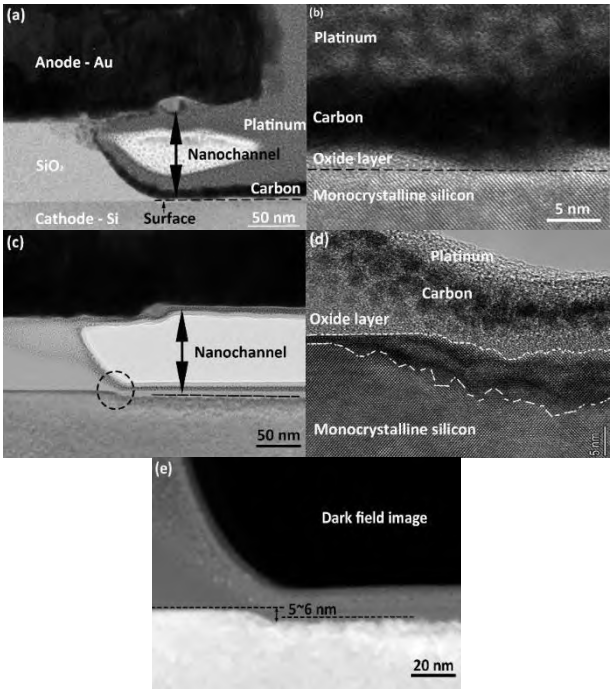

图 4　在空气中长期发射样品的透射电镜图像(a)只有少量发射的样品的横截面图像;(b)为(a)的放大图像;(c)在空气中发射了 110 h 的样品的横截面图像;(d)和(e)为(c)的放大和暗场图像,在沟道区域的硅表面观察到明显的不均匀和高度下降

Fig. 4 TEM observation of samples before and after long-term air emission. (a) The cross section image of a sample with only a few emission; (b) Zoom-in image of (a); (c) The cross section TEM image of a sample with 110-hour air emission; (d) and (e) the zoom-in and dark field image of (c), obvious unevenness and the lower of silicon surface near the channel area are observed

2　结论

本文研究了平面型硅阴极在空气和真空环境中 22 h 的持续发射稳定性。在空气条件下,样品的稳定过程大约为 1 h;而在真空条件下,样品没有这样的过程,迅速进入稳定状态。本文还研究了在空气/真空条件下器件关断后的电流可恢复性,发现器件关断后的储存环境可能是导致电流不可恢复的主要

原因;在真空环境中,关断后的发射电流可以很好地恢复,这从实验上说明了真空封装的有效性。此外,TEM 表征结果显示,在空气中长时间发射后,样品的发射区域表面变得粗糙且有部分损耗。本文揭示了平面型阴极长时间持续发射的电流特征和阴极微观演变规律,有助于提高研究者对平面电子管器件失效机制的理解。

参考文献:

[1] Han J W, Meyyappan M. The device made of nothing [J]. IEEE Spectrum, 2014, 51(7): 30-35.

[2] Samizadeh Nikoo M, Jafari A, Perera N, et al. Nanoplasma-enabled picosecond switches for ultrafast electronics [J]. Nature, 2020, 579: 534-539.

[3] Han J W. Vacuum nanoelectronics: Back to thefuture? — Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(21): 1858-2847.

[4] Liu M, Fu W, Yang Y, et al. Excellent field emission properties of VO2(A) nanogap emitters in air [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(9): 093104.

[5] Bartolomeo A D, Urban F, Passacantando M, et al. A WSe_2 vertical field emission transistor [J]. Nanoscale, 2019, 11(4): 1538-1548.

[6] Chang W T, Chuang T Y, Su C W. Metal-based asymmetric field emission diodes operated in the air [J]. Microelectronic Engineering, 2020, 232(7): 111418.

[7] Han J W, Seol M L, Meyyappan M. Nanoscale vacuum field emission gated diode with an umbrella cathode [J]. Nanoscale Advances, 2021, 3(6): 1725-1729.

[8] Xu J, Qin Y, Shi Y, et al. Design and Circuit Simulation of Nanoscale Vacuum Channel Transistor [J]. Nanoscale Advances, 2020, 2(8): 3582-3587.

[9] Li N N, Zhang B L, He Y, et al. Sub-Picosecond Nanodiodes for Low-Power Ultrafast Electronics [J]. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 2021, 33(33): 2100874.

[10] Shih P C, Rughoobur G, Cheng K, et al. Self-Align-Gated GaN Field Emitter Arrays Sharpened by a Digital Etching Process [J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(3): 422-425.

[11] 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.

[12] Song Y. Analysis of electron emission degradation insilicon field emitter arrays [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B Microelectronics & Nanometer Structures, 1998, 16(2): 815.

[13] Liu M, Liang S, Shi D, et al. An Emission Stable Vertical Air Channel Diode by Low-cost and IC Compatible BOE Etching Process [J]. Nanoscale, 2021, 13(11): 5693-5699.

[14] Bhattacharya R, Karaulac N, Chern W, et al. Temperature effects on gated silicon field emission array performance [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2021, 39(2): 023201.

[15] Ji X, Yutong S T, Yongjiao S J, et al. Study on electrical properties and structure optimization of side-gate nanoscale vacuum channel transistor [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(13): 135301.

[16] Bhattacharya R, Turchetti M, Keathley P, et al. Long term field emission current stability characterization of planar field emitter devices [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2021, 39(5): 053201.

[17] Ji X, Wang Q, Zhi T, et al. High-Quality and Stable Electron Emission DeviceWith Sub-30-nm Aligned Nanogap Arrays [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 5: 1-5.

[18] Xu J, Gu Z Y, Yang W X, et al. Graphene-Based Nanoscale Vacuum Channel Transistor [J]. Nanoscale research letters, 2018, 13: 311.

[19] 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.