

阵列场发射电子源的新进展¹

刘光诒 夏善红 朱敏慧 刘武*

(中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室 北京 100080)

*(华中师范大学物理系 武昌 430070)

摘 要 阵列场发射阴极与真空微电子学是当前国际电子学领域的研究热点之一,发展迅速,某些先进电子物理装置内的真空不加热电子源也有相应发展。根据这一趋势,按真空电子发射学科的特点,抓住其中研究与报道相对集中的阴极类型,进行了扼要的总结、归纳与评价;对近年来信息显示学科领域内已发展为实用的阵列等离子体电子源也进行了简单的介绍。

关键词 阵列场发射阴极,规则阵列场发射体,随机阵列场发射体,阵列等离子体电子源
中图分类号 O462.4

1 引 言

自 1988 年第一届国际真空微电子学会议 IVMC(International Vacuum Microelectronics Conference) 召开以来,约十多个国际学术会议将真空微电子学与场致发射列为该会的会议内容之一。这不仅说明人们开始认识到了真空微电子学将对该学科领域产生重要影响,同时也说明真空微电子学学科本身取得了实质性的进展。事实上,长期从事电子发射研究的工作者近期内确实看到了许多新成果,这个学科领域内的新事物不断出现,人们不仅发现了许多制作阵列场发射体的新方法、新工艺、新技术、新材料,获得了许多令人鼓舞的发射数据或性能,而且看到了各学科领域广泛应用真空微电子学成就的工作的萌芽。

基于现代微加工技术制造出来的真空微电子学元器件有许多超过固体器件的优点,例如,真空微电子学器件能提供出很高的电流密度 ($>100\text{A}/\text{cm}^2$),它的工作原理和特性很像与它们对应的大尺寸的真空管,但体积小,功率耗损极小,能承受的功率可提高,电子在静电场中的弹道输运方式不同于固体器件中荷电粒子的传输过程,因而反应速度快,工作特性基本上受环境温度及辐射影响不大。新出现的进展说明,真空微电子学的应用潜力决不止于目前人们看到的微波、毫米波器件^[1-3],各种传感器^[4],场发射平板显示器等。近来在固态集成电路结构中结合阵列场发射体的努力正在取得成效。应用真空微电子学的相关学科领域的范围不断在扩展。

阵列场发射体是真空微电子器件中最重要也是最难作的元件,本世纪 70 年代初发展的 Spindt 技术涉及一种双源渐缩门极孔径的汽相沉积技术制作规则阵列金属钨尖锥^[5,6];与此技术类似,80 年代又发展了其它基于微加工、部份基于微加工或其它技术的新方法,可以作出阵列场发射阴极,解决了阴极样品与超大规模集成电路 (ULSI) 工艺程序衔接的问题,与实用器件的结构也能兼容^[7];例如在阵列场发射体制造工艺中占主导地位,由 H.Gray 首先发展的制造规则阵列场发射体的单晶硅系列技术^[8,9];90 年代后发展的模铸技术^[10,11],横向阵列场发射体制作技术^[12],汽-液-固相法^[13],直接由连续薄膜制造电子发射体(对应的,我们称之为随机阵列场发射阴极)^[14],制造超长纤维状阵列发射体的定向共熔技术(对应的,我们称之为亚规则阵列场发射体)^[15],及制造阵列金属钨的光电子学方法^[16,17]等。上述技术均已作过报道,这里已给出了部份参考文献,本文不再赘述。下面仅介绍一些重要阵列场发射阴极的新进展,按该阴极的实用性、研究热点集中程度与发展前景选择。

¹ 1999-07-20 收到, 2000-01-21 定稿

国家自然科学基金 (No.68971029, No.69971011), 国家 863-512 资助项目

2 发展门控金属、半导体阵列场发射阴极的新趋势

90 年代初期在真空微电子学领域内形成的纷纷追求“超高封装密度”和“超尖锥”^[7]，以期将门极电压降低至 10–20V 以下的努力获得了成功，如美国 MIT 科学家 D. G. Pflug 等用三层光阻蚀剂（抗反射层–氧化物中间层–正性光阻蚀剂层）技术^[18]，制造出了门极孔径仅 100 nm，孔间距 200nm 的阵列阴极。能够在 17V 门极电压下给出 $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 电流密度。但是这一发展趋势受到设备、条件限制，工作仅能在少数单位进行。90 年代中期以后，在遍及元素周期表范围内寻找新阴极材料，寻求更廉价、性能更好的新结构，或产生新构思方面也形成了热点，如：

(1) 在金属 Mo 锥或 Si 锥上敷别的材料 这是为了改善当前阵列场发射阴极的发射性能，或是为了降低阈值场强，改善发射均匀性，增强抗污染、抗溅射能力等。1996 年美国 Portland 年会后，这方面的努力更加走上正轨。历史上在热电子源及其它电子发射体研究中积累多年的经验被结合到阵列场发射阴极的研究中，例如，经研究发现，无论金属或半导体阵列场发射阴极，表面敷上过渡金属碳化物薄膜后，发射能力会大大增强，达到相同发射电流所需的门极电压平均可降低 30%^[19]。

(2) 追求低电容的阵列场发射体结构 这个问题是发展阵列场发射阴极应用时必然会遇到的问题。也确实出现过一些新的结构，例如文献 [16] 的方法。又如 1998 年美国海军实验室 Gray 和 Hsu 发明的“多层薄壁金属圆筒阵列场发射体”，这是一种低压、大电流、抗污染，低电容、耐离子轰击的阵列场发射冷阴极^[20]，这种阴极由薄壁阵列圆筒组成，以圆筒端部边缘为发射尖锥，筒壁由金属薄膜 Ru/Li/Ru 或 Pt/Li/Pt/Li/Pt 等三夹层或多层组成，总壁厚 60–70nm，筒高 $0.4\mu\text{m}$ ，直径 400nm。它可工作在 10^{-3}Pa 真空度下，在 62V 阳极电压下可支取 $16\mu\text{A}$ 发射电流，可曝露大气，曝大气前后电流–电压特性无显著变化，不再需要激活处理，工作不随天气季节变化等。这种阴极由一种化学沉积法制成，成本仅为 Spindt 型阴极制造成本的三分之一。目前已用于高频功率放大器，获得了高跨导。存在的问题是噪声尚大。另一种“烟囱形发射体与台阶形门极”也是为降低电容而开发的。

(3) 实用化的横向金属阵列场发射体 汉城 C. M. Park 等发展的新型横向场发射三极管性能优越，他用一种多晶硅钛化物 (polycide) 作阴极尖锥，形成的三极管无需在真空中工作，能在大气压强下成功地工作，而且发射电流密度大，跨导高，开启电压低，阳极电流稳。已经使这种阴极与薄膜 MOS 晶体管集成在一起，可以预计将开创新局面^[21]。

(4) 随机阵列场发射阴极 岛状膜或某些连续膜在电场作用下的电子发射现象早在 40 年前就已被发现^[14]。目前，不少科学家希望进一步发展这种技术，使之实用化，达到大大简化结构的目的。在此，与热门的规则阵列阴极相对应，我们称这种由连续薄膜构成的阴极随随机阵列场发射阴极。

3 金刚石、碳膜与其他宽禁带阵列场发射阴极

用金刚石作阵列场发射阴极的兴趣是因为发现了它的负电子亲和势 (NEA) 性质而引发的。这个课题在 90 年代中、后期形成了极大的热点，后来发现，不仅大多数不同类型的金刚石都有场发射能力，许多碳材料也易于产生电子发射。以产生一定发射电流所需要的阈值电压大小作实用价值的衡量标准之一，可对最近新开发出来的各种金刚石阴极进行比较。实际上，高质量的金刚石具有 5.5eV 的宽带隙，由于电阻太高，很难得到场发射。掺硼形成 p 型后，发射性能有改善，但阈值场强仍较高。掺磷，更令人注意的掺氮能使阈值场强降低至 $0.5\text{V}/\text{m}$ ^[22]。化学气相沉积 (CVD) 多晶金刚石由于晶粒边界有导电性而易获得场发射能

力。而类金刚石 (DLC) 获得场发射一般比金刚石容易。它是一种半导体, 带隙宽度在 1-4eV 内变动, 取决于含 Sp^3 键的强度。典型的 DLC 阵列场发射阴极的阈值场强为 20-40V/ μm , 氮掺杂后可能达到 5V/ μm 。用过滤的阴极真空电弧法沉积的四面体非晶碳, 或“ta-C”, 当膜中 Sp^3 键含量高时, 阈值场强可降至 25-10V/ μm 。到此为止, 在金刚石阵列场发射体研究领域内得到的最好的结果, 是 1996 年 Yu. V. Gulyaev 等发展的纳米晶态金刚石^[23], 及 1997 年 W, Zhu 发展的在氢等离子体中烧结而成的纳米晶态金刚石织构膜^[24], 后者在电流密度 10mA/cm² 下, 阈值场强为 3-5V/ μm 。碳纳米管是另一种有希望的材料, 发射较大, 阈值场强为 15V/ μm 。O. H. Wang 在 1997 年发表的阈值场强数据是 0.8V/ μm 。Motorola 公司制造的 14cm 对角线全色场发射平板显示器中, 用的是一种表面呈珊瑚状的纳米结构的碳膜, 阈值场强 5-10V/ μm , 发射点的密度很高。

除金刚石与碳膜阵列场发射体外, 其它宽带隙半导体材料如 BN, SiC, GaN, AlN 等 III-V 族氮化物及它们的合金, 所谓超硬材料, 也常被认为是一组金刚石类型的材料。这类材料的化学键很强, 在高温下稳定, 不易形成缺陷, 能阻止掺杂剂扩散。近年来, 由于发现这类材料的电子亲和势很低, 通过表面处理甚至可以使电子亲和势变为负, 从而引起了用它制作阵列场发射体的兴趣。有关的研究工作刚刚开始, 尚未获得肯定的结果。一般认为这类材料适合高功率应用场合, 要求高发射电流场合, 或要求抗溅散场合^[25]。

碳纤维发射体按材料性质分类应放在此段, 考虑本文侧重实用阴极、该阴极的加工背景及历史, 故将其归类于长纤维阵列场发射体。

4 铁电体场发射阴极

铁电体如 BIT(层状钙钛矿晶体), PZT(钛酸铅锆晶体 $PbZr_xTi_{1-x}O_3$), PbT(层状钛酸铅铋 $Pb_2Bi_4Ti_5O_{18}$ 铁电体), PLZT(钛酸铅镧锆铁电体), $LiNb_2O_3$ 单晶, 及 PZT/BIT, BIT/PZT/BIT 等多层结构有优良的铁电, 介电和电光性能。在外加电场作用下, 能产生快速的自发场致极化反转, 发生晶相转换, 并伴随有显著的表面电荷释放和电子发射现象。其电子发射电流密度在 20 世纪 80 年代后期已达到 100A/cm² 数量级, 已发展成一种脉冲工作状态下的新型高电流密度电子源^[26], 电子束亮度可达 $10^{12}A/(m^2 \cdot rad^2)$ 。这种电子源由极化铁电陶瓷盘组成, 在盘的上、下两面敷以金属膜, 作为阴极的上表面的金属膜被刻蚀成周期性的栅条, 曝露出线条状的陶瓷阴极工作表面。K. Geissler 等将这种阴极用于加速器, 获得了良好的稳定性和高的可靠性。铁电体阴极工作时要求的电场强度为 $10^8V/cm$ 左右, 一般认为具有高自发极化强度, 快速反转, 及低矫顽强度等性质的材料, 易于产生高发射电流密度, 是合适的电子发射材料。由于铁电发射材料坚硬, 化学稳定性好, 容易保存、易于处理, 可工作在恶劣环境, 如 $10^{-1}Pa$ 真空度或等离子体放电的环境中。上述优点引起了科技界的广泛兴趣, 认为在大功率微波器件, 强流电子束器件与装置, 及真空微电子学领域会有好的应用前景。

5 长纤维阵列场发射阴极极

在发展 Spindt 型阴极的过程中, 从一开始就有科学家在探寻不通过昂贵的大规模集成电路工艺, 由其它技术实现门控阵列场发射体的途径。60 年代美国 GIT(Georgia Inst. of Tech.) 通过定向共熔技术^[15]作出的 Chapman 型阴极(W 纤维埋藏在绝缘体 UO_2 中), 以及通过光电子学法制造成的大面积阵列场发射体(W 纤维埋藏在玻璃绝缘体中)^[16,17], 实际上都属于长纤维阵列场发射体范畴。这类阴极曾因可达到低的门极-阴极电容, 易制成大面积(如曾制成 $40 \times 60cm^2$), 阴极尖锥直径极均匀, 价廉而受到青睐。90 年代初, 碳纤维的场

发射性质被发现, 并迅速受到国内外科学家重视。单根碳纤维的直径为 $5\mu\text{m}$, 可以制成亚规则阵列(纤维间互不接触), 随机阵列(纤维间互相接触)或碳毡^[27]。部分上述阴极已解决了制造门电极及电引线的技术, 形成了门控型阵列场发射体及非门控型阵列场发射体, 已有了实际应用。它们有一定的电子发射能力, 表面化学性能稳定, 抗污染。科学家相信, 这类阴极在一定时期内, 会以极低的制造成本而在某些领域获得应用。

6 等离子体阵列场发射电子源

利用电极间的放电等离子体, 及等离子体与电极间的相互作用来获取电子, 并能长期维持稳定工作电流的组件叫等离子体电子源。这种电子源是在约三十多年前出现的。过去多用于强流电子枪, 可以设计出电流范围极宽(由微安到兆安)的各类电子枪。已经在工业、民用、特别是在国防领域有过许多应用。20 世纪末期, 主要在真空微电子学、信息显示技术等学科的促进下, 在争相发展各类平板显示器的竞争中, 在等离子体平板显示器 PDP 迫切需要的促进下, 等离子体电子源有了革命性的进展。这种电子源被制造成了微型元件, 不仅尺寸小, 而且是阵列式的, 是可寻址的矩阵式结构。

从学科出发, 按等离子体放电机理区分, 可将等离子体电子源分为稳态等离子体电子源与非稳态等离子体电子源两大类。稳态等离子体电子源有表面放电电子源、气体放电电子源, 后者又可分为弧光放电电子源, 高压雪崩放电电子源(空心阴极电子源、空心阳极电子源), 低压雪崩放电电子源(空心阴极电子源、有反射放电的电子源)。非稳态等离子体电子源有火花放电电子源, 爆发发射电子源(阴极尖端材料爆发的等离子体电子源, 激光激励的等离子体电子源, 活动放电电子源), 以及一种在等离子体内有电流突变的电子源等。等离子体电子源一般从以下几项指标进行衡量和比较: 起动电流(或最小工作电流); 起动电压; 维弧电压; 最大工作电流(稳态支取时, 不考虑空间电荷与象差条件下, 由等离子体聚焦束中能得到的最大电流密度); 射频调制深度(影响等离子体表面电子发射稳定度的参量); pd 值(放电压强与阴极孔径的乘积)等参量。

等离子体平板显示器中使用的阵列微型阴极是一种低温烧结的 $(\text{CaLa})\text{CrO}_3$ 复合涂层阴极, 也有用 $(\text{LaSr})\text{CoO}_3$ 或 $\text{LaB}_6 + \text{BaAlO}_4$ 。阴极上面有厚膜复合氧化物层保护。单个电子源与放电空间的尺寸小至 $0.1\text{--}0.15\text{mm}$, 寿命可到 30000h 。这种阴极引起了大家的关注。

7 讨论

在全球真空微电子学科学家的努力下, 在相关学科领域内新技术的促进下, 阵列场发射阴极在 20 世纪末期得到了实质性的进展。各类阵列场发射阴极在不到十年内已接近实用, 可以预期真空微电子学将在科学技术、工业、国防等领域得到应用。目前, 通过各种新技术开发出来的阵列场发射阴极在实用化的进程中, 正面临着各种各样的问题待进一步解决, 如满足各种器件的特殊性能要求问题, 与器件的原有结构如何形成一体化的问题, 发射均匀性问题, 发射重复性问题, 被本底气体或来自器件内其它部件材料污染的问题, 离子反轰问题, 空间电荷效应问题, 界面相互作用问题等。此外, 必须着重指出的是, 应用阵列场发射电子源的各类新型真空微电子器件的实现, 在很大程度上还取决于新构思的出现。

参 考 文 献

- [1] 刘光诒, 李建平, 陈善化, 等, 国际真空微电子学概况, 机电部电真空情报网, DB, BFQ90-915, 1991, 1-66.
- [2] Hu Hanquan, Liu Guangyi, A new milestone of an active device-vacuum microelectronics and its preliminary research in PRC, 2nd Int. Conf. on Millimeter Wave and Far-Infrared Tech., Beijing, China, Edited by Gail M. Tucker, Electron. Indus. Pub. House, 1992, 17-21.

- [3] Liu Guangyi, Zhuang Xuezheng, Wu Ersheng, Hu Hanquan, Recent status in the field of mmW-VME in the early 1990s, Proc. of 3rd ICMWFST'94, Guangzhou, China, edited by GIT, USA, The CIE Pub., 1994, 1-9.
- [4] Xia Shan hong, Liu Jia, Cui Dafu, Han Jinhong, *et al.*, Investigation on a novel vacuum micro-electronic pressure sensor with stepped field emission array, J. Vac. Sci. Tech., 1997, B-15(4), 1573-1576.
- [5] C. A. Spindt, K. R. Shoulders, L. N. Heynick, U. S. Patent, 1974, No.3, 789, 471.
- [6] 彭自安, 柯春和, 冯进军, 李兴辉, Spindt 型阴极的研制, 电子器件, 1994, 17(3), 76-76.
- [7] 刘光诒, 九十年代初期阵列场发射阴极研究进展, IEEE 北京分会专题报告会, 北京, 电子部 12 所印发, 1993 年 12 月, 1-29.
- [8] H. F. Gray, C. Moglestue, Voltage saturation in n-type silicon field emitter arrays, experiments and electron transport modelling, 34th IFES, Osaka, Japan, 1987, 121-121.
- [9] Xia Shan hong, Liu Jia, Vacuum microelectronic pressure sensor with novel "stepped" or "cured" cathode, J. Vac. Sci. Tech., 1998, B-16(3), 1226-1232.
- [10] 王保平, 童林凤, 赵琴等, 硅尖阵列场发射微二极管的制备及特性研究, 电子器件, 1994, 17(3), 55-60.
- [11] W. P. Kang, J. L. Davidson, M. Howell, B. Bhuvu, D. L. Kinser, D. V. Kern, Li Qi, Xu Jinfang, Micropatterned polycrystalline diamond field emitter vacuum diode arrays, J. Vac. Sci. Tech., 1996, B-14(3), 2068-2071.
- [12] M. S. Lim, *et al.*, Undoped poly-Si lateral field emitter arrays with stable anode current by self current limiting, Tech. Digest of 11th IVMC, Asheville NC, USA, 1998, 113-114.
- [13] E. I. Givargizov, Ultrasharp tips for field emission applications prepared by the vapor-liquid-solid growth technique, J. Vac. Sci. Tech., 1993, B-11(2), 449-453.
- [14] Nishida Jun, Field emission from SiC whisker, J. Appl. Phys., 1967, 38(13), 5417-5421.
- [15] S. J. Magnus, *et al.*, Characterization of emission patterns in field emitter array cathodes, Technical Digest of 6th IVMC, Newport, USA, 1993, 120-121.
- [16] Liu Guangyi, Zhu Minghui, Tang Shiweng, Zhu Changchun, Liu Jinsheng, Manufacturing a patternable metallized substrate for tungsten ultra-long field emitter array by use of the double ion beam deposition method, J. Vac. Sci. Tech., 1996, B-14(3), 1963-1965.
- [17] 刘光诒, 朱世棋, 吕庆年, 金能文, 王德安, 刘金声, 制造大面积超长钨发射体阵列 W-UFEA 的光电子学方法, 电子器件, 1994, 17(3), 42-46.
- [18] D. G. Pflug, *et al.*, 100 nm gate aperture field emitter arrays, Tech. Dig. of 11th IVMC, Asheville NC, USA, 1998, 130-131.
- [19] P. R. Schwoebel, C. A. Spindt, E. Brodie, Electron emission enhancement by overcoating molybdenum field-emitter array with titanium, zirconium and hafnium, J. Vac. Sci. Tech., 1995, B-13(2), 338-343.
- [20] D. S. Y. Hsu, H. Gray, A low-voltage, low-capacitance, vertical multi-layer thin film edge dispenser field emitter array electron source, Tech. Digest of 11th IVMC, Asheville, NC, USA, 1998, 82-83.
- [21] M. S. Lim, *et al.*, New lateral field emitter array inherently integrated with thin film transistor, Material Issues in Vac. Microele., MRS, ISBN 1-55899-415-7, 1998, 509, 9-14.
- [22] K. Okano, *et al.*, Low-threshold cold cathodes made of nitrogen-doped chemical-vapor-deposited diamond, Nature, 1996, 381, 140-141.
- [23] Gulyaev Yu V, *et al.*, Carbon nanotube structures—a new material of vacuum microelectronics, Tech. Digest of 9th IVMC, St Petersburg, Russia, 1996, 5-9.
- [24] W. Zhu, *et al.*, Defect-enhanced electron field emission from chemical vapor deposited diamond, J. Appl. Phys., 1995, 78, 2707-2711.
- [25] W. Zhu, *et al.*, Electron emission from nano-structured diamond, Materials Issues in Vacuum Microelectronics, MRS, ISBN 1-55899-415-7, 1998, 509, 53-58.
- [26] K. Geissler, *et al.*, Intense laser-induced self-emission of electrons from ferroelectrics, Phys. Lett., 1993, A-176(9), 387-392.
- [27] A. G. Chakhovskoi, *et al.*, Method of fabrication of matrix carbon fiber emission cathode structures for flat-panel indicators, J. Vac. Sci. Tech., 1993, B-11(2), 511-513.

[28] K. H. Schoenbach, Microhollow cathode discharges, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(1), 13-15.

NEW DEVELOPMENT OF FIELD EMISSION ARRAY

Liu Guangyi Xia Shanhong Zhu Minhui Liu Wu*

(*State Key Lab. of Transducer Tech., Inst. of Electron., CAS, Beijing 100080, China*)

(*Department of Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430070, China*)

Abstract Some hot-spots of research in the field of the field emission array (FEA) and the vacuum microelectronics (VME) have been developed abroad in the last phase of 1990s. The expand speed of the FEA subject is very fast, and the non-heated electron emission sources inside some advanced electron-physics equipments have also got a relevant development during this period. Considering those trends in the fields of basic science—FEA and VME abroad, according to the particularity of the vacuum electron emission, to seize the centralized relatively cathodes in the research or the report, a brief summary, review or comparison has been made, a more important type of the field emission array—the plasma electron source array which has already been developed into practical use recently in the information display has also been introduced simply.

Key words Field emission array (FEA), Regular FEA, Random FEA, Plasma electron source array

刘光诒: 女, 1936 年生, 副研究员, 现从事电子发射、真空微电子学与光电功率转换技术研究.

夏善红: 女, 1958 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 副所长, 国家重点实验室副主任, 现从事真空微电子学与传感技术研究.

朱敏慧: 女, 1943 年生, 研究员、博士生导师、所学术委员会主任, 现从事遥感技术与真空微电子学研究.

刘 武: 男, 1946 年生, 教授、博士生导师、系主任, 现从事场致发射、表面科学与信息技术研究.