

微型真空电子器件和太赫兹辐射源技术进展

廖复疆

(北京真空电子技术研究所,北京 100016)

摘要: 微加工技术为真空电子技术的发展提供了新的领域和新的应用. 场致发射阵列阴极 (FEA) 是最突出的代表. 本文综述了 FEA 近年来的发展, 特别给出了我所在 FEA 研究方面的新进展. 已经获得 5 A/cm^2 左右的电流密度, 为进一步的应用奠定了良好的基础. 国际上正在开展微型真空电子器件研究, 该项研究将导致微波管体积、重量、成本的降低和工作频率、可靠性的进一步提高. 微型真空电子器件可为太赫兹频段提供 1W 的大功率发射源.

关键词: 微加工; 真空微电子; 太赫兹技术

中图分类号: TN12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 09-1361-04

Micro-Vacuum Electron Devices and Terahertz Vacuum Sources

LIAO Fu-jiang

(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100016, China)

Abstract: Recent developments in microfabrication have produced new opportunities in vacuum electronics. The variety of microfabrication applications in vacuum electronics is steadily growing. The impressive achievements are field emitter arrays (FEAs) for cold cathodes. A new class of microfabricated vacuum electron devices or "μVED" will make the microwave/millimeter wave tubes miniature and low costs. They will also work in terahertz frequency with power output up to 1W.

Key words: microfabrication; vacuum microelectronics; terahertz technique

1 引言

微加工技术进展为微尺寸三维结构的批量制造提供了一套很好的方法. 也为真空电子器件的发展开辟了新的领域和新的应用^[1]. 这些新的领域和应用包括: (1) 用微加工制造的场致发射阵列阴极 (FEA) 来代替普遍应用的热阴极; (2) 可靠的、精确制造的小型微波/毫米波/亚毫米波电路和器件代替普通机械加工和手工装配的电路和器件; (3) 批量生产的低价元件和部件的应用; (4) 提高系统和器件的集成度, 减小体积和重量.

微加工技术在真空电子学中应用的研究正在逐步扩大. 最重要的进展是场致发射阵列阴极的研究. 钼微尖、栅控、硅基场致发射阵列阴极 (FEA) 在 650 A/cm^2 电流密度下, 已经显示出大于 8 年的长寿命和可靠性, 2000 A/cm^2 电流密度也已经获得^[2]. 微加工制造的 FEA 阴极成功地应用于行波管中^[3~5], 并获得 27W 和 55W 功率输出, 是一个令人振奋的信息. 碳纳米管作为发射源的研究也取得了很好的结果, 获得了 4 A/cm^2 的电流密度^[6].

特别值得注意的动向是微型真空电子器件 (μVED) 的研究及其在太赫兹频段作为电磁辐射源的应用. 太赫兹频段是介于毫米波和远红外之间的亚毫米波频段, 即波长在 $1000 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$, 频率在 $300 \text{ GHz} - 3 \text{ THz}$ 的一段频段^[7]. 这一频段最显著的特点是可以用于成像并探测介质材料内部的物质, 这些介质材料可以是衣服、皮革、塑料、纸板和其他的包装材料, 可区分这些材料内部放置的不同化学成分的物质^[7]; 太赫兹射

线不仅可成像, 而且可提供该频段的频谱信息, 用于遥感, 探测未知的气体云和空降的生物物质; 太赫兹技术可用于高速数据率通信. 300GHz 以上的载波, 其 10% 的带宽就可为无线通信实现大于 10 Gbits/s 的高速数据速率^[9]. 过去十年中由于缺少功率源和检测器件, 太赫兹技术的发展遇到困难, 但这一频段所展示的应用前景, 正吸引更多的科学家投入该研究领域.

微加工技术和真空电子学结合形成的微型真空电子器件 (μVED), 克服了普通三、四极管的渡越时间效应, 或者利用微波管分布作用原理, 使工作频率可以达到太赫兹频段. 早在上世纪 80 年代, 美国宇航局 (NASA) 就开始了一项支持深空探测计划的亚毫米波返波管研究计划, 采用光刻技术在金刚石基片上制造微型梯形线慢波结构, 器件的工作频率可以在 400 GHz 到 1.8 THz 范围^[10,11]. 虽然这项计划尚未完全实现, 但是它是一次采用微加工技术制造微型真空电子器件的探索. 现代微加工技术具有更高的精度, 更精确的加工方法, 再次引起人们用来制造微型电子器件的兴趣^[1,8,12,13].

本文将结合我们在场致阵列发射阴极研究中的情况讨论这种阴极的制造和应用, 探讨微型真空电子器件和太赫兹真空辐射源的发展.

2 场致发射阵列阴极

场致发射阵列阴极 (FEA) 的研究已经有 20 多年的历史^[14]. 近十年来, 各国科学家探索了各种不同的制造方法, 以图获得能够实用的场致发射阵列阴极, 来代替真空电子器件中的热阴极, 或者用它来制造新型平板显示器件和其他新型

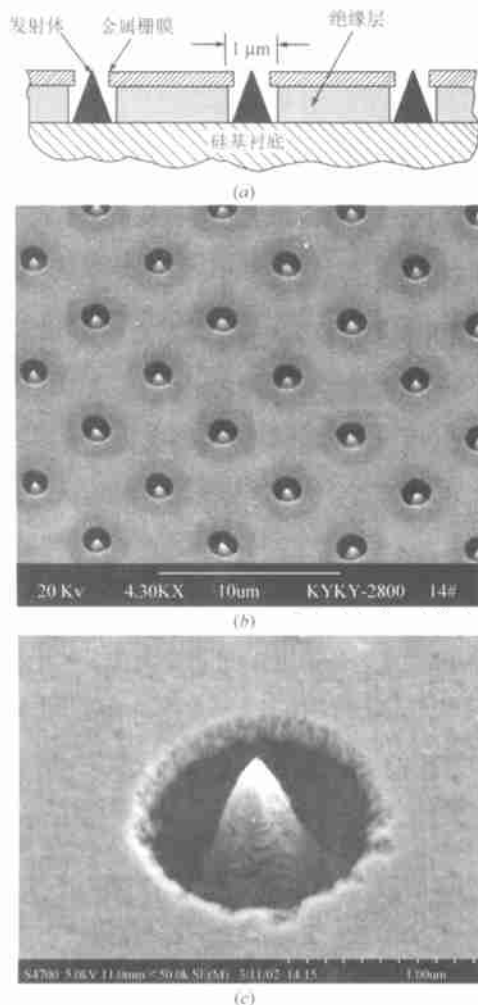


图1 场致发射阵列阴极照片 (a) Spindt 阵列阴极示意图; (b) Spindt 阵列阴极显微照片; (c) 单个微尖的显微照片

器件。到目前为止,真正具有稳定发射,能够应用于平板显示器或微波管中的只有微尖型场致发射阵列阴极^[15]。我国进行场致发射阵列阴极的研究始于1990年,而Spindt阴极的实验性研究工作是“九五”末才开始的。图1显示的是我们研制Spindt阵列阴极的示意图和照片^[16]。微尖制造在硅基衬底上,衬底覆盖了1 μ m厚二氧化硅(SiO₂)绝缘层,二氧化硅(SiO₂)上再覆盖0.25 μ m厚的钼金属栅层,在金属层上刻蚀出直径为1 μ m的圆孔阵列,并进一步刻蚀穿透SiO₂层,到达硅基表面,形成圆柱孔阵列。通过薄膜沉积技术^[14],在圆柱孔阵列内形成图1所示的钼微尖阵列。显然,用同样的办法,可以形成不同金属和绝缘材料,不同尺寸的微尖阵列。如图2所示,在栅极之上还可再增加一个或多个电子注成形,有助于电子注聚焦。

从原理上说,Spindt微尖型阴极应当具备高电流密度发射能力。因为在金属内部,有10¹² A/cm²电流密度,撞击在金属内



图2 用于电子注成形的多极结构

表面。由于隧道效应,只有一小部分电流可从金属中逸出。表面隧道位垒超过费米能级 E_F 的值称之为功函数 ϕ ,没有外加电场时,功函数 ϕ 约为2-5eV。当外加电场为 E_0 时,金属表面的位垒要降低 $(-eE_0x)$, x 是从微尖表面算起的距离。在表面附近,发射的电子要受到一个来自金属内部,由感生的正电荷产生的吸引力。加有外电场时,金属表面有效的功函数约为:

$$\phi_{\text{eff}} \sim \phi - 3.8F^{1/2}$$

位垒高度降低了 $\phi_{\text{eff}} = 3.8F^{1/2}$,这一现象称之为肖特基(Schottky)效应。电子在费米能级 E_F 的位垒宽度是:

$$x = \phi / (eE_0)$$

当 $E_0 < 10^7$ V/cm时,位垒的宽度很大,对金属中的电子而言,实际上是不透明的;当 $E_0 > 2 - 3 \times 10^7$ V/cm时,出现隧道效应,电子可以穿过位垒而进入真空中。

Fowler和Nordheim给出了一个描述场致发射的公式:

$$I \sim A^2 V^2 \exp(-B / V^{3/2})$$

I 是总电流,单位A, V 是外加电压,单位V, $A = (1.5 \times 10^{-6} / a) \exp(10.4 / a^{1/2})$ 是 a 的函数, a 是发射面积(cm²), B 近似是一个常数, $B = E_0 / V$ 是和发射体面积有关的系数。 $\ln(I / V^2)$ 和 $1 / V$ 曲线称之为Fowler-Nordheim曲线。它实际上是一根直线,其斜率和截距可用来决定 A 和 a 的值。

表1给出了一些场致发射阵列阴极的数据。

表1 场致发射阵列阴极的数据^[17]

FEA 材料	Mo	Mo	Mo	Si	Si
单位	SRI	MIT	MIT	MCNC	MCNC
微尖数	10000	6000	70300	3300	28074
微尖/cm ²	1.3 × 10 ⁶	10 ⁹	10 ⁹	3 × 10 ⁶	3 × 10 ⁶
最大电流	180mA	15mA	22mA	6mA	21.5mA
电流密度	DC	脉冲	脉冲	DC	DC
	A/cm ²	A/cm ²	A/cm ²	A/cm ²	A/cm ²
微尖曲率半径	25nm	10nm	10nm	5nm	5nm

在真空电子器件内部实际的真空环境下,场致发射阵列阴极能否以高电流密度稳定地工作,是我们研究的目标之一。电流密度和跨导(阳极电流对栅极电压曲线的斜率)是场致发射阵列阴极的重要参量。电流密度直接和发射阵列中微尖的密度有关,跨导和阵列中微尖总数有关。因此,在许多应用中,微尖的包装密度是一个重要的参数。由于湿法刻蚀的钻刻(undercut)效应,包装密度将限制在2.5 × 10⁶ 微尖/cm²(圆柱孔中心至中心间距为6 μ m)。采用反应离子刻蚀(RIE)可以消除钻刻,将微尖密度提高到1.6 × 10⁷ 微尖/cm²。现代光刻技术可以获得10⁸ 微尖/cm²的包装密度^[18]。我们从图1(c)所示的单个微尖上测得了8.6 μ A的发射电流。我们目前使用的包装密度是4 × 10⁶ 微尖/cm²,用这样的微尖应当能获得34A/cm²的电流密度,我们实际上只测得3.75A/cm²的电流密度^[19]。这是由于阵列中微尖制造得不均匀,不是所有微尖都参与发射。这种不均匀可能是薄膜制造过程不均匀或各个微尖的物理状态不均匀所致。制造过程的不均匀性和设备的状态及采用的工艺有关。也和每个微尖所受的污染有关。文献^[18]采用微尖低电流自加热法,分解微尖上的污染源达到微尖清洗的

目的, 可以提高阵列微尖发射的均匀性. 我们采用同样的低电流自加热法, 对 25×25 的微尖阵列进行了 200 小时的老练, 获得了 5.38 A/cm^2 的电流密度^[19]. 图 3 显示了老练前后发射特性的比较. 发射电流的增加, 说明有更多的微尖参与发射电子. 图 4 是该实验结果的 Fowler-Nordheim 曲线, 可以看到, 经过老练之后, 场致发射特性更加规则, 线性性更加明显.

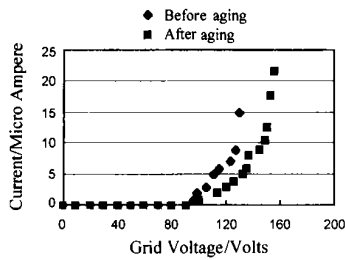


图 3 脉冲老练前后发射电流的变化

场致发射阵列阴极可以直接应用在行波管中. NEC 公司采用 FEA 阴极在 X 波段获得了 27W 功率输出. 2000 年美国诺斯罗普公司研制成功 C 波段输出功率 59W 的小型行波管. 场致发射阵列

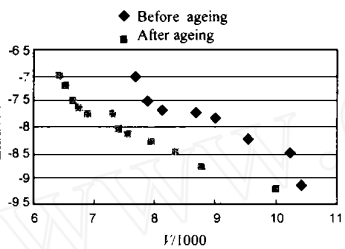


图 4 老练前后发射电流的 Fowler-Nordheim 曲线

阴极发射的电子比热阴极发射的电子具有更大的发射角度, 使初始电子的横向运动速度增加, 给电子注的聚焦带来困难. 由于微尖阵列阴极目前只能作成平面形状, 和 Pierce 电子枪中的球形热阴极不同, 也给电子注的会聚带来困难. 图 5 是一个微尖上发射的电子注的形状. 可以看到电子注是发散的. Spindt 曾建议采用多电极结构来会聚和保持电子注形状^[20]. Whaley 等人曾经将微尖阵列阴极直接放入 Pierce 电子枪中代替热阴极, 并估计电子注的聚焦情况^[4]. 多次实验证明 Pierce 电子枪可以聚束低电流密度的电子注, 一旦电流密度超过给定的阈值, 电子注就会散焦. 中功率行波管的电流将在几



图 5 微尖发射的电子注轨迹

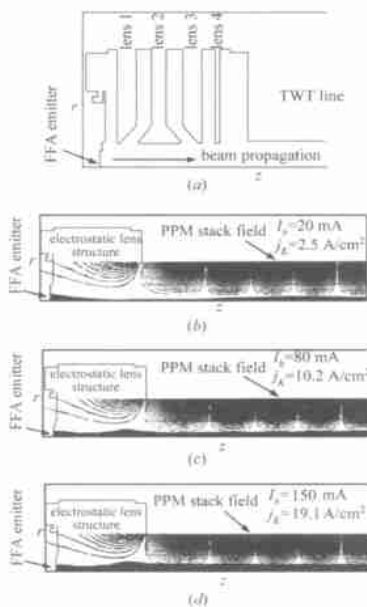


图 6 一种用场致发射电子源的电子枪结构

十至几百毫安之间, 因此 Pierce 电子枪必须修改才能够用于采用场致发射阵列阴极的行波管.

诺斯罗普公司发展了一种新的电子枪结构, 以克服高电流密度下电子注的发散问题. 新枪采用一个级联的静电透镜来控制 FEA 表面和电子注加速区的电场. 这把电子枪可以聚焦 150mA 以下的电流和 19 A/cm^2 以下的电流密度. 电压可以高达 5000V. 图 6 是一种可用的电子枪结构.

直到 150mA 总电流和 19.1 A/cm^2 电流密度, 聚焦依然良好.

场致发射阴极可以直接采用射频调制技术, 用射频电压直接获得发射电流. 表 2 给出了采用场致发射射频调制阴极的行波管和热阴极行波管参数的比较. 可以看到采用 RF 调制的场致发射阵列阴极, 不仅整管长度可以缩小, 效率可以提高, 线性性也得以改善.

表 2 采用场致发射射频调制阴极的行波管和热阴极行波管参数的比较

参 数	RF 调制 TWT	高效率热阴极 TWT
电路长度	8.9cm	12.5cm
输出功率 (I_k 取 100mA)	192W	158W
电路效率	0.40	0.33
总效率	待定	0.61
饱和点增益压缩	3dB	9dB
小信号增益	25dB	33dB
1dB 增益压缩点	回落 4dB	回落 12dB
饱和增益	22dB	24dB
最大谐波功率	- 17dB	- 12dB
饱和输入功率	30dBm	30dBm

3 微型真空电子器件(μ VED)

微加工技术可以用来制造微型真空电子器件 (μ VED). 这些器件可以用在毫米波和太赫兹频段, 因为在这么高的频率范围, 高频电路加工中的任何粗糙度和不规则性, 都将引起高频损耗, 机械加工和电火花切割将不能采用. 图 7 是使用 LIGA 技术 (LIGA 是采用 X 射线刻蚀和电铸相结合的技术) 加工的 94GHz 速调管高频电路的照片^[1]. 国际上有几个研究组正在进行 THz 频段 (0.3 - 3.0THz) 输出功率为 0.001 - 1.0W 的 μ VED 研究. 美国加州理工学院喷气推进实验室正在研究工作在 0.3, 0.6 和 1.2THz 的微型速调管. 采用多次光刻, 深反应离子刻蚀制造谐振腔. 腔体先分成两半, 镀金后用压力扩散焊形

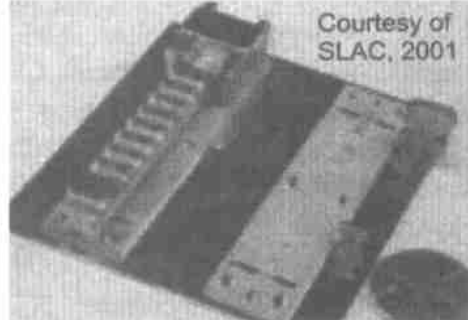


图 7 LIGA 技术加工的 94GHz 速调管

成腔体^[12].

威斯康星大学和美国宇航局正在研制输出功率为 1W 的高功率 THz 辐射源. 图 8 是他们正在研制的 560GHz, 56mW 输出的折叠波导管振荡器示意图和刻蚀的照片. 其输出功率返回一部分进入输入端, 产生振荡. 在模拟中采用 6.6mm 长的慢波电路, 10.9kV 电压和 0.5mA 电子注电流, 在 520 - 580GHz 获得大于 10dB 的增益^[9].

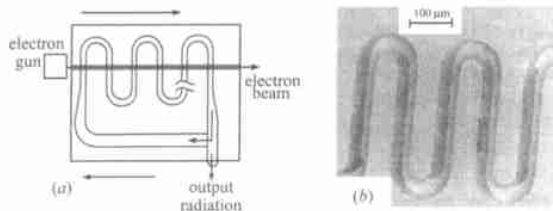


图 8 56mW, 560GHz 折叠波导管振荡器

4 结论

经过近十几年的努力, 真空微电子学得到巨大的发展, 特别是场致发射阵列阴极 (FEA), 在高发射电流密度和稳定工作方面取得了实质性的进展, 已成功地应用于小功率行波管的试验. 可以预期, FEA 一定能够在未来的真空电子器件中得到更加广泛的应用, 从而为微波管的高可靠、长寿命、高效率提供更加有用的技术. 我国 FEA 的研究, 也取得了重要进展, 为进一步的应用奠定了良好的基础.

微加工技术, 包括 MEMS 和 LIGA 技术和真空电子技术的结合, 可以制造微型真空电子器件. 这种器件具有更高的工作频率、更小的体积、更低的重量、更低的成本. 它将带来微波管制造技术的重大变革, 具有重要的应用前景.

太赫兹频段在高数据率通信、保密通信、精确制导和隐藏武器探测等方面有重要的应用, 正在受到各国科学家的关注. 微型真空电子器件可以在 THz 频段提供大功率发射, 是一种很有前途的器件.

参考文献:

- [1] J H Booske. New opportunities in vacuum electronics through the application of microfabrication technologies [A]. Proc IVEC 2002 [C]. California, USA: IVEC, 2002. 11 - 12.
- [2] C Spindt. FEA fabrication [A]. IEEE Innovative Vacuum Electronics Mini-course, PPS-2001 Conference [C]. Las Vegas: IEEE IVEM, 2001.
- [3] D R Whaley et al. Experimental demonstration of an emission traveling wave tube amplifier [J]. IEEE Trans Plasma Science, 2002, 30(3): 998 - 1008.
- [4] D R Whaley et al. Application of field array to microwave power amplifiers [J]. IEEE Trans Plasma Science, 2000, 28(3): 727 - 746.
- [5] H Imura et al. Electron gun design for traveling wave tubes (TWTs) using a field emitter array (FEA) cathode [A]. IEEE IEDM [C]. USA: IEEE IEDM, 1997.
- [6] M E Read et al. Carbon Nanotube Cathode for Microwave Tubes [A]. IEEE Proc IVEC, Davis [C]. USA: IEE IVEC, 2001.
- [7] P H Siegel. Terahertz technology [J]. IEEE Trans on MIT, 2002, 50(3): 910 - 928.
- [8] K Kincade. Terahertz rays find new ways beef up security [J]. Laser Focus World, 2003, 39(4).
- [9] S Bhattacharjee, et al. Comprehensive simulations of compact THz radiation sources using microfabricated, folded waveguide TWTs [A]. IVEC [C]. USA: Monterey, 2002. 26 - 27.
- [10] H F Gray et al. A vacuum field effect transistor using silicon field emitter arrays [A]. IEDM [C]. Washington D C, USA: 1986. 776 - 779.
- [11] J A Dayton, Jr H G. Kösmahl. Ultra small electron beam amplifiers [A]. IEDM [C]. Washington D C, USA: 1986. 780 - 783.
- [12] H M Manohara et al. Fabrication and emitter measurements for a nanoklystron: a novel THz micro-tube source [A]. Proc IVEC, Monterey [C]. USA: 2002: 28 - 29.
- [13] A G Rozhnev, et al. Novel concepts of vacuum microelectronic microwave devices with field emitter cathode arrays [A]. Proc IVEC Monterey [C]. USA: IVEC, 2002. 69 - 70.
- [14] C A Spindt. A thin-film field-emission cathode [J]. J Appl Phys, 1968, 39(7): 3504 - 3505.
- [15] C A Spindt. Field-emitter arrays for vacuum microelectronics [J]. IEEE Trans on ED, Oct 1991, 38(10): 2355 - 2363.
- [16] Xing Hui Li et al. Investigation of FEAs applied in vacuum electron gun [A]. Proceedings IVESC '2002 [C]. Saratov, Russia: IVESC, 2002. 145 - 147.
- [17] J A Nation, et al. Advances in cold cathode physics and technology [J]. PIEEE, 1999, 87(5): 865 - 889.
- [18] P R Schwoebel, et al. High-current processing of microfabricated field emitters for enhanced emission uniformity and high-current-density-operation [A]. IEEE IVEC [C]. Monterey, USA: IVEC, 2002. 65 - 66.
- [19] Xin Hui Li, et al. Study of field emission arrays for traveling wave tubes [A]. IEEE IVEC [C]. Seoul, Korea: IEEE, 2003.
- [20] C A Spindt, et al. Field emission cathode array development for high current density applications [J]. Applications of Surface Science, 1983, 16: 268 - 276.

作者简介:



廖复疆 男, 1937 年 12 月生于江西省, 1960 年毕业于山东大学物理系, 同年分配至电子工业部第十二研究所工作, 1960 ~ 1980 年从事微波电子学, 特别是行波管研究, 1980 至 1982 年在美国辛辛那提大学从事集成光学研究, 1989 ~ 1990 年在美国乔治亚理工学院研究所从事光控微波技术研究; 1995 ~ 1996 年在英国兰卡斯特大学从事工业加热大功率微波器件研究; 现任中国电子科技集团公司第十二研究所科技委主任, 大功率真空电子学国家重点实验室主任, 博士生导师. 近十年来, 一直从事微波真空电子器件, 特别是微波功率模块和真空微电子学研究, 发表有关论文数十篇, 中国电子学会会士, IEEE EDS 高级会员, IEEE EDS 北京分部主席.