

# 真空微电子毫米波器件

庄学曾

(中国科学院电子学研究所, 北京, 100080)

**摘要** 介绍了真空微电子分布放大器和真空微电子微波管两类器件, 对其优点和问题进行了探讨, 并就我国发展真空微电子毫米波器件提出了看法.

**关键词** 真空微电子, 毫米波器件, 真空集成电路, 微波管, 薄膜场致发射阴极.

## 引言

真空微电子学 (VME) 是研究微米和亚微米量级空间的真空电子学. 这门新兴学科在器件方面的应用发展, 目前主要集中在平板显示器和微波器件两个方面. 本文讨论 VME 微波器件的发展问题. 固态微波器件与真空微波管相互之间既竞争、又促进发展的关系已持续了近 30 年. 在毫米波段, 不论是固态器件还是真空器件均未成熟. 在提高工作频率、效率、输出功率、带宽、工作寿命和成品率, 特别是在发展新材料和更先进的制造技术等方面仍在进行着艰巨的研究与发展工作. 20 世纪 80 年代中后期开始得到重视和发展的真空微电子器件, 将有可能成为兼具上述两类器件某些优点的又一类新型器件. 目前, VME 微波和毫米波器件的发展工作主要可归纳为 VME 分布放大器和 VME 微波管两类. 前者主要是以微型三极管 (或 FET) 阵列为基础的真空集成电路; 后者主要是指应用了薄膜场致发射阴极 (以下简称 TFEC)<sup>[1]</sup> 的新型微波管. 为便于讨论, 本文首先介绍微波和毫米波段的真空器件和固态器件的发展简况.

## 1 真空器件和固态器件

真空三极管是利用栅极来控制流通的电流, 以实现信号的放大. 为了提高三极管工作的截止频率, 曾千方百计地设法减小电子在管内的渡越时间、极间电容和引线电感等, 因而开发了橡胶管和灯塔管等. 但它们的截止频率仍低于 10 GHz, 而且其功率容量也受到了限制. 电子的调制与群聚理论、空间电荷与电磁波的相互作用理论、各种微波电路的发展, 从一个全新的角度即将电子渡越时间这个消极因素转化为被利用的积极因素, 为微波管的繁荣发展提供了基础. 目前微波管的最高工作频率已达 1800 GHz (如返波振荡器); 最大脉冲输出功率达 15 GW; 单个长脉冲的能量达 0.1 MJ. 但是, 当工作频率超过

30 GHz (即进入毫米波段) 后, 传统慢波型微波管 (不包括回旋管、脉塞等快波器件) 的设计和制造就变得越来越困难, 各项性能急剧下降. 这是因为其内部相互作用区的尺寸随着频率的增加成反比地缩小, 导致毫米波管内的关键零部件的尺寸很小, 要求加工和装配的精度非常高; 工作电流密度极高, 即使采用了高收敛性电子枪, 阴极的发射能力、电子注的形成与维持等仍十分困难. 因此, 传统的毫米波管除了个别管种 (如返波振荡器、扩展作用器件等) 外, 其工作频率都低于 100 GHz.

自从半导体三极管研制成功以来, 固态器件 (包括集成电路) 取得了惊人的发展. 固态器件以其效率高、寿命长、工作电压低、体积小和成本低等等优点, 不但在应用中逐步替代了许多中、小功率的真空器件, 还带动了新材料和微细加工技术的发展, 使世界进入了微电子时代. 在微波和毫米波段, 为了提高其工作频率和输出功率, 固态器件从微波晶体管 (BJT) 和场效应晶体管 (MESFET) 发展到高电子迁移率晶体管 (HEMT) 和异质结双极晶体管 (HBT), 以及在毫米波段 (100 GHz 以下) 广为应用的二极管型器件, 如耿氏管 (Gunn) 和碰撞雪崩渡越时间管 (IMPATT). 提高微波固态器件工作频率的途径, 一是缩小“结”或“沟道”的尺寸 (如 FET 的栅极长度为  $0.25\ \mu\text{m}$  时, 只能工作到 50 GHz 左右); 另一途径是探索新的材料或新奇的“异质多层结构”以提高电子迁移率, 例如晶体管从锗发展到硅, Gunn 氏管的材料从 GaAs 发展到 InP, MESFET 的沟道由单一 GaAs 材料掺杂构成, HEMT 基本上是以 GaAs/AlGaAs 或 GaAs/AlGaAs/InGaAs 异质结构代替 MESFET 的沟道结构, HBT 是一种异质结双极晶体管等. 但是, 进一步缩小尺寸已非常困难, 因为它涉及到微细加工技术和一系列设备的巨大投资, 而且功率容量也将急剧降低. 更难的是半导体内电子迁移率是有上限的, 因此, 毫米波固态器件的发展也不容过分乐观.

## 2 真空微电子器件 (VMED)

因为电子在真空中的速度上限可以比在半导体内大 1~2 个数量级, 而且 TFFEC 的研究结果其峰值发射密度已达  $100\ \text{A}/\text{cm}^2$ <sup>[2]</sup>, 所以人们期望开拓一类新型器件, 即真空微电子微波和毫米波器件. 它们将利用现有的真空器件技术和固态器件技术 (特别是集成电路的微细加工技术), 使新器件的工作频率比现有器件高出一个数量级以上, 并兼有上述两类器件的优点, 如: 效率高、寿命长、工作电压低、耐高温、抗辐射、体积小、重量轻、便于集成化和参量一致性好等. 近几年国外有关 VMED 的报道不少, 我国科学家也已进行了一些很有意义的研究工作. 从有关报道可见, 新的器件大致可分为两类. 其一是以 I. Brodie, C. E. Holland, H. F. Gray, N. E. McGruer, H. G. Kosmahl 等为代表的真空微电子分布放大器 (以下简称 VMEDA)<sup>[3~7]</sup>. 其二是利用了 TFFEC 和某些微细加工技术的真空微电子微波管 (以下简称 VMEMT). VMEDA 和 VMEMT 的共同点是都使用了 TFFEC, 但它们开发的思路是不同的.

VMEDA 实际上是利用集成电路微细加工技术, 在基片上制造微波真空集成电路, 包括场致发射尖锥、栅极、收集极 (或阳极) 以及输入输出匹配和传输电路等. 从理论上说, 这是一类相当理想的器件, 既全面具备 VMED 的各种优点, 又可能工作到极高的频率 (如

1000 GHz) 和可观的输出电平 (瓦级, 甚至能再高出 1~2 个数量级). 事实上, 目前这仍然只是一种设想和构思, 只进行了一些理想条件下的计算分析, 或在较低的频率 (如 0.8 MHz 和 1 GHz) 开始取得一些初步的实验结果. 这类器件的构思和设计十分关键, 尚需继续探索和实验; 但制造 VMEDA 的条件和技术上的困难也将是多方面的. 例如: 需要一整套线宽为亚微米级的集成电路微细加工设备, 电极间电容减小 (目前单列 TFFEC 栅板与发射底板间的电容已做到 0.07 pF/mm), 毫米波输入输出匹配和传输问题等. 还有一类与器件设计相关的真空技术方面的难题: 在一个间距为微米量级的空间内, 如何获得并保持器件能长期、可靠地工作所必须的真空环境. 根据 TFFEC 的发明者 C. A. Spindt 介绍, 二极管试验显示, TFFEC 的发射能力对环境十分敏感, 后处理过程不当, 或真空环境不佳, 将导致 TFFEC 的发射能力下降 5~6 个数量级, 因此是必须解决的一个课题.

VMEMT 是将 TFFEC 引入微波管中, 替代热阴极而发展成的一类 VMED, 其工作原理基本上与微波管相同. 慢波型微波管的理论、设计和制造技术已相当成熟, 其性能优良, 应用也十分广泛; 但在要求长寿命、高效率和快速启动等应用场合, 却遇到很大困难, 这主要是使用了热阴极的缘故. 发展毫米波管的主要困难之一是受阴极发射密度的限制. TFFEC 是一种工作电压相当低的冷阴极 (一般  $V_g \approx 100$  V), 其发射电流密度可达  $100$  A/cm<sup>2</sup> 以上. 与传统的热阴极相比 TFFEC 的这两大优势首先引起微波管 (特别是毫米波管) 设计师们的浓厚兴趣, 并研制了空间应用的超小型毫米波管. 其中有美国 NASA Lewis 实验室与 Analex 公司合作的超小型行波管 (频率为 30 GHz, 输出功率为 1.5 W, 增益大于 20 dB, 效率大于 50%, 整管长度仅 5 cm<sup>[8]</sup>); Utah 大学与 MIT Lincoln 实验室合作研制的返波振荡器 (最高工作频率达 600 GHz, 其慢波结构是用光刻工艺在钻石膜上制成的曲折线, 将用于星载射电天文望远镜)<sup>[9]</sup>. 前苏联科学家在超小型化真空微波器件方面的研制工作也很活跃, 成果也不少, 但未作详细报道. 然而从一种 X 波段的返射速调管重量不足 1 g, 即可见其发展水平<sup>[10]</sup>. Teledyne MEC 的 P. M. Lally 等人<sup>[11]</sup>设计的一种调谐放大器, 是将长条形 TFFEC 作为输入腔相互作用隙缝的一部分, 看上去像一个双腔速调管, 他们期望在 X 波段达到的性能为: 输出功率为 10 W、增益为 10 dB、带宽为 50 MHz, 并设想将来工作到 100 GHz. 利用 TFFEC 的冷阴极和高发射电流密度等特点, 研制高频率、高效率和长寿命的 VMEMT, 是一项具有现实意义的研究工作. 例如: 一个工作在 95 GHz 的中小功率行波管, 其电子束密度大于  $200$  A/cm<sup>2</sup>, 如能将 TFFEC 取代其热阴极, 则电子束的形成结构将能简化, 并易实现栅控; 若再对其它部分进行某些改进, 则有可能将其工作频率提高到 300 GHz 以上. 欲将 TFFEC 应用于毫米波管, 尚需解决的问题也不少, 例如, 通常电子枪要求阴极是具有一定曲率的球形表面, 而 TFFEC 是一种平面结构; 从 TFFEC 发射的电子初速和方向很不一致, 需对其能量及横向速度的分布进行研究, 并采取措使其均匀; 需研制适合于带状电子注和在 100~1000 GHz 内性能良好又便于制造的新型慢波电路等.

### 3 结语

在毫米波段, 无论是固态器件还是真空器件都难以满足毫米波技术发展的要求. 真空

微电子学的发展为毫米波器件的研究与开发提供了新的方向. 真空微电子毫米波器件将比现有的固态器件和毫米波管具有更高的性能和更全面的优点. 相对来说研制 VMEMT 可能会更易取得一些实用的结果, 研制出一批新型毫米波管, 可满足应用方面的某些急需; VMEDA 则具有更多诱人的优点, 但近期内尚难有所突破, 需要继续努力进行探索和开发, 总之, 新一代的真空微电子毫米波器件的发展将为毫米波技术的迅速发展起到关键作用.

发展真空微电子毫米波器件需要加强的研究工作主要有:

在研究和发展 VMEMT 和 VMEDA 的同时注意探索新的器件工作机理, 从理论上发现并在实验中验证某种新的原理 (如同从三极真空管研究发展到微波管), 才能使真空微电子毫米波器件的研究取得突破性的进展; 加强实用的高性能 TFFEC 制造技术、工艺和应用特性的研究, 如减小栅极与发射极间的电容、提高实际可利用的电流及工作稳定性, 包括对 TFFEC 发射噪声 (发射电子的速度矢量和能量的分布) 的研究等, 为顺利地开展器件研究打下基础; 进行相应的毫米波电路结构和有关技术的研究等.

### 参考文献

- 1 Spindt C A. *J. Appl. Phys.*, 1968,**39**(6):3504~3505
- 2 Macaulay J M, Brodie I, Spindt C A, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1992,**61**(8):997~999
- 3 Brodie I, Spindt C A. *Application of Surface Science*, 1979,**2**:149~163
- 4 Holland C E, Rosengreen A, Spindt C A. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1991,**38**(10):2368~2372
- 5 Gray H F, Campisi G J, Greene R F. *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meeting*, 1986, 776~778
- 6 Kosmahl H G. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1989,**36**(11):2728~2737
- 7 McGruer N E, Johnson A C, McKnight S W, et al. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1991,**38**(3):666~671
- 8 Dayton J A, Jr, Kasmahl H G. *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meeting*, 1986, 780~783
- 9 Barnett L R, et al. *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meeting*, 1985, 364~365
- 10 Gulyaev Y V, Sinitsin N I. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1989,**36**(11):2742
- 11 Lally P M, Goren Y, Nettesheim E A. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1989,**36**(11):2738

## ON VME MM-WAVE DEVICES

Zhuang Xuezheng

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Two ways to develop vacuum micro-electronic devices (VMED) in the microwave and millimeter wave bands, i.e. the VME distributed amplifiers (VMEDA) and VME microwave tubes (VMEMT) are introduced. A brief review about the development of vacuum and solid state MM-wave devices, a discussion on the two kinds of VMED's merits and problems, and some ideas on developing mm-wave VMED in China are given.

**Key words** vacuum micro-electronics, millimeter wave devices, vacuum integrated circuits, microwave tubes, thin film field emission cathodes.