

冷阴极电子源在微波器件上的应用^{*}

邓少芝¹⁾ 陈 军¹⁾ 许宁生^{1,2)}

(1) 中山大学物理学系, 广州 510275; 2) 中国科学院物理所表面物理国家重点实验室)

摘 要 介绍了冷阴极电子源的研究进展和它们在现代微波器件和系统上的应用, 并预测它们在这一方面应用的可能发展趋势.

关键词 电子发射, 冷阴极电子源, 微波器件

分类号 O 462. 4, O 462. 1

近 10 年来, 场致电子发射的研究所取得的喜人进展, 使冷阴极电子源的研制和应用受到了越来越明显的重视^[1~3]. 有些学者甚至认为, 在某些情况下, 尤其是在感性的微波器件和系统中, 冷阴极电子源是现用的热阴极电子源最有希望的替代品^[3]. 与热阴极电子源比较, 冷阴极电子源的特点列于表 1.

冷阴极电子源所具有的特点, 为解决微波等器件和系统的电子束的质量问题提供了机会. 推进这一研究, 可直接促使未来微波等器件和系统的性能改善和功率水平提高.

1 冷阴极电子源的研究进展

单个钨尖针就是一个简单的冷阴极电子源. Spindt 在 80 年代成功地发展了用薄膜沉积技术制作钼尖针阵列的片状电子源, 如图 1a 所示. Spindt 等后来用相似的技术制成了尖劈阵列. Thomas 等还发展了用常用的集成工艺制作硅尖针阵列的技术. 这一类电子源利用了一个物理理论结果: 即由于尖端局部电场增强而易于引起导电体表面发生 Fowler-Nordheim 电子发射过程.

表 1 冷阴极电子源的特点

Tab. 1 Characteristics of cold cathode electron source

项 目	冷阴极	热阴极
温度 /K	≤ 300	$\geq 1\,000$
电流密度 $I/(A^{\circ} cm^{-2})$	10^7	≤ 100
电容	小	受限制
工作频率 /GHz	> 10	受限制
启动	立即	需预热

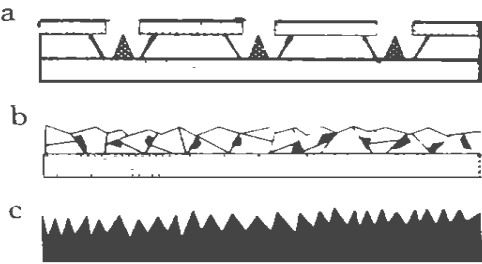


图 1 冷阴极电子材料

Fig. 1 Cold cathode material

(a) 尖针阵列; (b) 金刚石薄膜; (c) 天鹅绒

^{*} 国家杰出青年科学基金 (59525206) 资助项目

收稿日期: 1998-04-20 邓少芝, 女, 35岁, 副教授

90年代初期，英国和美国的 3 个研究组分别对 CVD 金刚石薄膜表面^[4]，半导体-CVD 薄膜-金属多层结构^[5]和类金刚石薄膜表面^[6]的电子发射现象作了开创性的研究。这些工作引起了国际同行的极大兴趣，不少研究者现在正致力于研究如图 1b 所示的薄膜型冷阴极电子材料。这类电子材料利用的物理原理是：金刚石薄膜表面具有较低以至负表面电子亲和势的条件^[4]，易于受电场诱发电子发射。而且，这类薄膜中的石墨颗粒等杂质和缺陷也被普遍认为有利于引起低电场诱发电子发射^[4,7]。特别是这类薄膜可相对容易地沉积在不同形状的电极表面上，构成不同形状的冷阴极，这一优点对一些微波器件和系统来说是重要的。

在微波或大功率脉冲型器件和系统中，还经常用到天鹅绒作冷阴极电子源的材料（如图 1c 所示）^[8]。它的优点是便宜，实用方便；在强脉冲电场作用下能产生足够强的电流。电脉冲会引起天鹅绒表面产生等离子体，而电子则是从这些等离子体中，在电场的作用下发射出来的。

近几年来，被研究得比较多的另一类冷阴极电子源的材料是：场诱发电子发射铁电体薄膜^[2,9]。其电子发射机制普遍认为：储存在薄膜表面的电子，当内电场快速翻转时，会被其束缚电荷排斥而滑出薄膜表面。我国工程物理研究院的研究人员对此类冷阴极材料的制作技术与发射机制都作了比较系统的研究^[2]，其成果受到国际同行的重视。

2 应用例子

一些重要的微波系统或器件，如自由电子受激辐射微波放大器（即 Masers）性能，往往受到电子束的质量限制。为了解决这一问题，人们正在探索冷阴极电子源在克服上述困难所能发挥的作用。英国 Strathclyde 大学的 Allen Phelps 教授领导的研究组做了不少开创性工作。我们将以他们的工作为例来说明冷阴极电子源在微波器件与系统的应用潜力。

在他们建立的可调频（20~ 100 GHz）Gyrottron 系统中，采用了图 2a 所示的冷阴极二极管结构。起初，阴极是一根机械加工出来的金属尖针，电子在强的脉冲电场的作用下，主要从尖端发射出来。但在上百个脉冲作用后，尖端变钝，电子便无规则地从尖端周围的表面发射出来。而经过几百个脉冲后，在实验条件允许的电场强度下，阴极停止发射电子。为

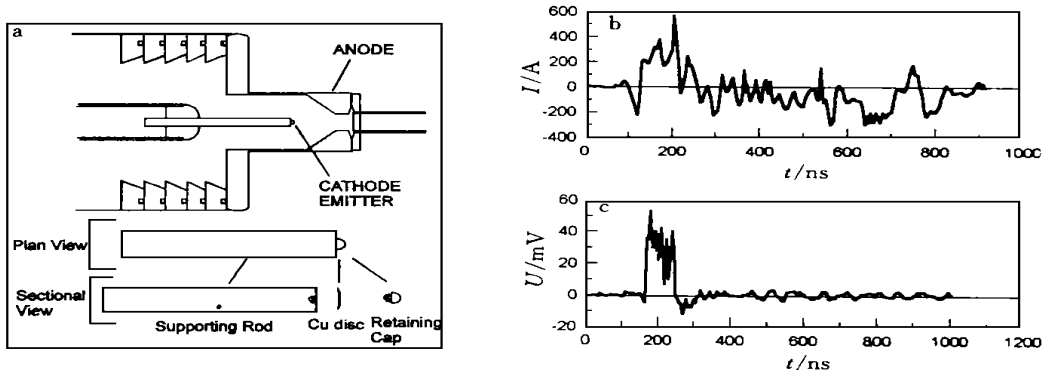
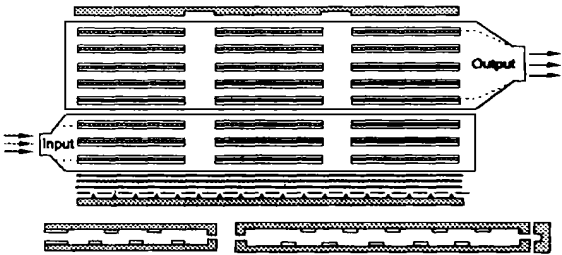


图 2 冷阴极二极管的结构 (a) 脉冲电流波形 (b) 和输出微波波形 (c)
Fig. 2 (a) Structure of electron gun; (b) Waveform of pulsed current;
(c) Waveform of microwave output

了降低所需诱发电场强度, 进一步提高电子束质量, 并增长阴极使用寿命, 他们设计了图 2a 的阴极结构, 采用了英国 Aston 大学所研制的材料做冷阴极材料^[4]. 按设计需要把阴极做在铜圆台的周边表面上, 技术上是一大难题. 采用制作尖端阵列的微电子加工技术直接加工, 或用天鹅绒阴极材料都无法解决这个问题. 图 2b 描绘了从图 2a 所示的二极管测到的脉冲电流, 其峰值接近 600 A. 图 2c 采用了图 2a 的二极管结构的 Gyrotron 系统上测量到的毫米波脉冲. 从这些初步结果, 可以感觉到冷阴极电子源在这一类系统的应用前景.

上述研究组还把冷阴极电子源引入磁控管 (magnetron). 在这一应用中, 他们采用硅尖针阵列的冷阴极电子源, 获得了一些有意义的成果. 但是, 他们同时发现有两个暂时无法解决的问题. 一是采用贴片的方法来安装电子源很难达到它们正常工作要求的条件; 二是在 1.333×10^{-4} Pa 的环境气压条件下, 所用电子源工作不稳定. 可见, 要在这方面的应用获得成功, 还需要下大功夫才能找到出路.

另外, 片状冷阴极电子源 (图 1a) 在分布式微波放大器 (图 3) 上的应用也受到较多关注. 最近, 环形片状冷阴极电子源在射频微波放大器上应用获得成功^[3, 10].



3 今后的发展趋势

未来的研究还会集中在 3 个方面:

- ① 新式的分布式微波放大器 (distributed amplifier) 中的冷阴极电子源.
- ② 传统微波管, 如行波管和速调管 (klystron or twystrode amplifier tubes) 等器件中的冷阴极电子源.
- ③ 采用真空电弧脉冲电子源的大功率微波系统, 如自由电子受激辐射微波放大器 (masers).

① 和② 方面都采用针尖阵列式的真空微电子源, 并有比较高的性能要求. 以后者为例, 目前其电子源已经达到的工作指标为: 长期稳定性 > 8 500 h, 电流密度 > 10^6 A/cm², 总电流 > 180 mA, 电容 < 10 nF/cm², 电导 电容 > 2×10^2 .

稳定性的问题受环境条件、针尖表面和材料纯度制约. 在针尖表面镀上金刚石薄膜是提高稳定性的一条出路. 其次, 为了达到指标二, 必须制作尖端半径更小, 尖针密度更高的 (超过 $10^8 \sim 10^9$ tips/cm²) 带控制电极的电子源. 做到这一点, 再加上提高每个针尖能承受的电流, 即超过 15μ A/tip, 会帮助实现指标二. 不过, 要在一个 600μ m 半径大小的芯片上诱发出超过 180 mA 的电

图 3 分布式微波放大器

Fig. 3 Distributed microwave amplifier

表 2 决定指标的因素和达到指标的途径
Tab. 2 The factors deciding the operating parameters and the ways to achieve the parameters

参数	决定因素	措 施
稳定性	环境条件, 尖针表面, 材料纯度	阴极尖针表面镀金刚石薄膜
电流密度	阴极结构	制作尖端半径更小的阴极, 尖针密度更高 (超过 $10^8 \sim 10^9$ tips/cm ²) 带控制电极
电容	带栅极发射尖针阵列结构, 栅极与衬底之间材料参数	增加尖针的高度获小电容, 采用高频介电常数小的材料
电导	发射尖针材料, 尖针尖端结构	增加尖针密度来提高电导, 采用纳米尖端

流, 如何解决散热的问题也必须解决. 要降低电容, 则必须增加针尖的高度, 而这一参数的提高要受到针尖的机械稳定性考虑的限制. 最后, 人们可以通过增加尖针密度来提高电导. 表 2 归纳出了决定工作指标的因素和达到指标的途径.

未来材料的发展, 还会向人们提供可以满足真空电弧脉冲电子源要求的冷阴极材料, 以及特殊加工工艺的要求.

参 考 文 献

- 1 Latham R V, Xu N S. Electron pin-hole: the limiting defect for insulating high voltages by vacuum, a basis for new cold cathode electron sources. *Vacuum*, 1991, 42: 1173~ 1181
- 2 Zhan E G, Yan X L. Experiment studies of ferroelectric cathodes. *Proc of 1994 Tri-Service/NASA Cathode Workshop*, 1994. 205~ 209
- 3 Parker P K, Jensen K L, Abrams R H. Field emitter array development for high frequency applications. *10th International Vacuum Microelectronics Conference*, 1997. 92~ 97
- 4 Xu N S, Latham R V, Tzeng Y. Field dependence of the area-density of 'cold' electron emission sites on broad-area CVD diamond films. *Electron Lett*, 1993, 29: 1596~ 1597
- 5 Gies M W, Gregory A, Pate B B. Electron field emission from diamond and other carbon materials after H_2 , O_2 and Cstreatment. *Appl Phys Lett*, 1995, 67 (9): 1328~ 1330
- 6 Wang C W, Garcia A, Ingram D C, et al. Cold field emission from CVD diamond films observed in emission electron microscopy. *Elect Lett*, 1991, 27: 1459~ 1461
- 7 Zhu W, Kochanski G P, Jin S, et al. Field emission from chemical vapor deposited diamond. *J Vac Sci Technol (B)*, 1996, 14 (3): 2011~ 2019
- 8 Hughes T P, Carlson R L, Moir D C. High-brightness electron-beam generation and transport. *J Appl Phys*, 1990, 68 (6): 2562~ 2571
- 9 Gundel H, Handerek J, Riege H. Time-dependent electron emission from ferroelectrics by external pulsed electric fields. *J Appl Phys*, 1991, 69 (2): 975~ 982
- 10 Zakharchenko Y F. Two stage distributed amplifier on field emitter arrays. *J Vac Sci Technol (B)*, 1996, 14 (3): 1982~ 1985

Application of Cold Cathode Electron Source in Microwave Devices

*Deng Shaozhi** *Chen Jun* *Xu Ningsheng*

Abstract An introduction is presented on progresses in the research of cold cathode electron sources and their application in modern microwave devices. A prediction is given about the future development of this kind of application.

Keywords electron emission, cold cathode electron source, microwave device

* Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China