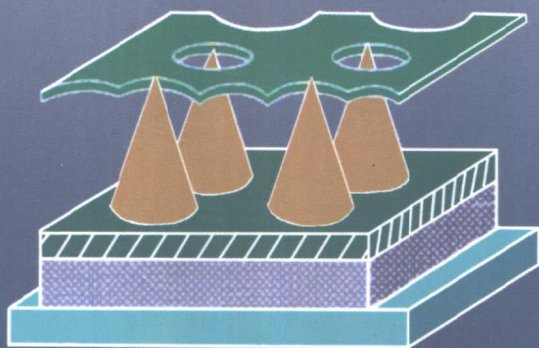
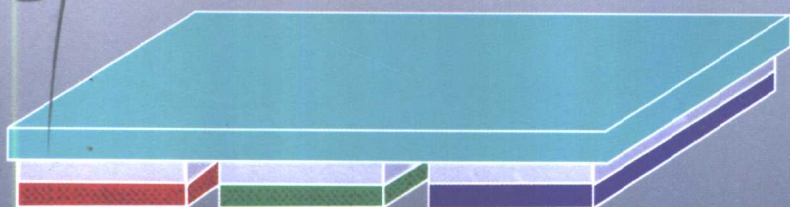




真空微电子学 及其应用

ZHENKONG WEIDIANZIXUE JIQI YINGYONG

王保平 雷 威



东南大学出版社

真空微电子学及其应用

王保平 雷威

东南大学出版社

·南京·

内 容 简 介

真空微电子学是一门新兴交叉学科,涉及到真空电子学、微电子学、薄膜技术和材料科学等多门学科和技术。本书从真空微电子学的形成、发展历史和最新动态出发,系统地介绍了真空微电子学的物理基础,即场致发射理论和其他相关物理原理,详细地讨论了微细结构制造技术、真空微电子器件工作特性的数值模拟和器件结构设计,着重阐述了真空微电子学的应用及其对未来电子学发展的巨大影响。

本书可作为高等院校电子信息技术、通信技术、微电子学及相关专业的高年级本科生教材,也可供从事真空微电子学研究与开发的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

真空微电子学及其应用 / 王保平主编. —南京:东南大学出版社,2002.4

ISBN 7-81050-915-2

I. 真... II. 王... III. 真空电子技术: 微电子技术 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 007681 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人: 宋增民

江苏省新华书店经销 东南大学激光照排印刷中心印刷
开本: 850 mm × 1168 mm 1/32 印张: 5.25 字数: 132 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 定价: 9.50 元

(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话: 025-3792327)

出版说明

书籍是人类进步的阶梯。教材是教师教学成果的结晶,应是书籍中的珍品。一本好的教材,哺育和影响一代乃至几代人。东南大学一贯重视教材建设工作。近一个世纪来,一批一批的优秀教师写出了一批批优秀教材。据不完全统计,数十年以来,东南大学编写出版了近千种教材,并且在从1989年开始的三届全国优秀教材评选中,共有82种教材获奖,获奖数居全国高校前列。这一成果也是使得东南大学成为全国首批本科教学工作优秀学校的一个重要支撑条件。

面对即将到来的21世纪,东南大学将更加重视人才培养,重视本科和研究生教学,重视教材建设。2002年,东南大学将迎来建校100周年的盛大庆典。为了以实际行动迎接这一节日的到来,学校决定,到2002年出版100本高水平教材,并且在政策上给予大力扶持。经过慎重的讨论和评审,规划工作已经完成,正在逐年落实出版。从今年起,将有一批面向21世纪、体现东南大学教学改革成果的教材陆续面世。我们高兴地看到,中国高等教育的教材园地将更加绚烂多彩。

东南大学教学委员会

1998年8月

前 言

真空微电子学是一门新兴学科,它是涉及真空电子学、微电子学、材料科学、薄膜技术等多门学科的交叉学科。1988 年在美国 Williamsburg 召开了第一届国际真空微电子学学术会议,此后真空微电子学得到了迅速发展。

真空微电子学是以场致发射理论作为理论基础,其应用领域十分广泛,主要包括冷阴极电子源(Cold Electron Source)、场致发射平板显示器件(Field Emission Display Panel)、传感器(Sensor)以及大功率微波器件(RF Device)等。其中,场致发射平板显示器件是目前真空微电子学应用最为集中的领域。许多国外大公司和研究机构,如 Motorola, Pixtech, Futaba, Candescent, FEPET, Samsung 等都将场致发射显示器件作为平板 CRT 器件大力研究和开发。美国军方已经在机载和车载指挥系统上采用了 FED 显示器件。

根据场致发射材料的不同,目前的场致发射源主要分为钨锥阵列、硅锥阵列、金刚石薄膜等。进入 20 世纪 90 年代以后,碳纳米管作为一种性能优越的场致发射材料受到各研究机构的高度重视。本书从真空微电子学的发展历史和最新发展动态、趋势出发,在第 1 章至第 3 章系统介绍了场致发射理论;第 4 章讨论了场致发射体发射特性的数值模拟;第 5 章详细讨论了微细机构制造技术;第 6 章简要介绍了真空微电子器件的结构设计以及真空微电子学的应用等方面知识。

本书可以作为高等院校电子信息技术、通信技术、微电子及相关专业的高年级本科生教材,也可供从事真空微电子学研究与开发的专业技术人员参考。

本书作者对东南大学童林夙教授在本书编著过程中所给予的帮助表示衷心感谢,同时也对东南大学显示技术研究中心的全体同仁以及东南大学出版社所给予的帮助和支持表示感谢。由于编者水平有限,书中可能还存在不妥和错误之处,殷切希望使用本教材的师生和读者批评指正。

作 者

2001.5 东南大学

目 录

1 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 真空微电子学的发展历史	(2)
1.3 真空微电子学的特点和内容	(6)
1.3.1 真空微电子器件的主要特性	(6)
1.3.2 真空微电子学的主要内容	(7)
1.4 真空微电子学的应用与发展趋势	(9)
思考题与习题	(11)
参考文献	(11)
2 场致发射	(14)
2.1 引言	(14)
2.2 表面电子特性	(15)
2.3 金属场致发射	(18)
2.4 半导体场致发射	(20)
2.5 内场致发射	(21)
2.5.1 金属或半导体表面介质薄膜	(22)
2.5.2 金属-介质-金属(MIM)	(25)
2.5.3 反向偏压 p-n 结	(27)
2.5.4 负电子亲合势阴极	(28)
2.6 场致发射电子的能量分布和 Nottingham 效应	(31)
2.7 空间电荷效应	(34)

思考题与习题	(35)
参考文献	(35)
3 器件物理与特性分析	(38)
3.1 引言	(38)
3.2 场致发射公式的特性	(38)
3.3 真空条件和 FEA 结构分析	(42)
3.4 FEA 结构优化和理论极限	(47)
3.5 FEA 热稳定性和材料选择	(51)
3.6 FEA 阵列特性估算	(53)
思考题与习题	(54)
参考文献	(55)
4 数值计算与器件特性模拟	(56)
4.1 引言	(56)
4.2 数值计算模型的建立	(57)
4.2.1 基本方程	(57)
4.2.2 计算模型及边界条件	(58)
4.3 静电场的数值模拟	(60)
4.3.1 有限差分算法	(60)
4.3.2 区域细化反复迭代的有限差分算法	(65)
4.3.3 非正交曲线坐标系下的有限差分算法	(69)
4.4 电子轨迹及发射电流的计算	(77)
4.4.1 直角坐标系下的二维四阶龙格-库塔方法	(78)
4.4.2 非正交曲线坐标系下电子轨迹的计算	(82)
4.4.3 场致发射器件发射电流及其分配	(83)
4.5 场致发射器件特性模拟	(84)

4.5.1	塔形微尖场致发射体的静电特性·····	(84)
4.5.2	鸡尾酒杯形边缘场致发射体的静电特性 ·····	(86)
4.5.3	新型火山口形场致发射体静电特性的数值模拟 ·····	(92)
4.5.4	平面聚焦系统 ·····	(96)
	思考题与习题·····	(100)
	参考文献·····	(101)
5	器件制造与工艺 ·····	(104)
5.1	引言 ·····	(104)
5.2	纵向器件的制备 ·····	(105)
5.2.1	钼锥场致发射体阵列的制备 ·····	(105)
5.2.2	硅锥场致发射体阵列的制备 ·····	(107)
5.2.3	模塑技术 ·····	(111)
5.3	横向器件的制备 ·····	(112)
5.3.1	非自对准器件的制备 ·····	(112)
5.3.2	自对准器件的制备 ·····	(114)
5.4	器件封装 ·····	(115)
5.5	器件制备中所涉及的重要工艺 ·····	(118)
5.5.1	氧化锐化 ·····	(118)
5.5.2	平面化技术·····	(119)
5.5.3	静电键合技术 ·····	(120)
	思考题与习题·····	(122)
	参考文献·····	(122)
6	真空微电子器件 ·····	(124)
6.1	引言 ·····	(124)
6.2	真空集成电路有源元件 ·····	(125)

6.3 高频和微波器件	(128)
6.3.1 分布式放大器	(128)
6.3.2 线性束器件	(129)
6.3.3 预聚焦束器件	(130)
6.4 电子源和微电子光学系统	(133)
6.5 场致发射显示屏	(135)
6.5.1 引言	(135)
6.5.2 研制历史	(136)
6.5.3 工作原理及发展现状	(137)
6.5.4 场致发射显示屏产品设计的相关技术	(142)
6.6 传感技术	(144)
6.7 显微技术	(146)
思考题与习题	(149)
参考文献	(149)

1 绪 论

1.1 引 言

20 世纪初期,热阴极的出现和发展,促进了无线电通讯、广播电视和早期计算机的发展。由于阴极到阳极间的渡越时间、极间电容和引线电感的限制,器件工作频率难以提高。同时,真空电子器件还存在工作电压高、功耗大、体积大、重量重等缺点。

20 世纪 40 年代后,半导体器件的出现和应用促进了电子设备的小型化和轻量化。与真空电子器件相比,半导体器件具有体积小、重量轻、集成度高、功耗小等优点,在许多应用领域逐步取代了真空电子器件。但半导体器件不能耐高温,不能抗辐射。在大功率、高频率、抗辐射等应用领域,半导体器件难以满足实际应用对器件性能的要求。

进入 20 世纪 60 年代后,随着大规模集成电路技术和微机械技术的出现和应用,进一步推动了电路小型化,促进了计算机的发展与智能化的应用。同时,也为真空微电子学的诞生创制了条件。

1988 年在美国 Williamsburg 召开了第一届国际真空微电子学会议^[1],正式提出真空微电子学的概念,其发展的条件就是场致发射和微电子学的微细结构技术。真空微电子器件以薄膜场致发射阵列为基础,采用大规模集成电路技术和微细加工技术,使阴极到阳极的间距减小到微米级。真空工作的条件又使得电子在真空微电子器件中的运动完全类似与真空电子管中完全弹道式的运动^[2]。因此,真空微电子器件可以达到更高的开关速度或工作频

率,同时又具有真空电子管的优点即耐高温和抗辐射。

真空微电子学是一门新型交叉学科,它不仅包括了以场致发射阴极阵列为基础的器件,而且还包括微型热离子源以及由硅和砷化镓 PN 结制备的热电子源。此外,利用负电子亲和势原理的金刚石薄膜也包括在真空微电子学的研究领域。本书主要研究和讨论以场致发射阴极阵列为代表的真空微电子学的物理基础、制备工艺、结构设计和实际应用。本章将在下面几节中分别介绍真空微电子学的发展历史、真空微电子学的特点和基本内容,以及真空微电子学的应用和发展趋势。

1.2 真空微电子学的发展历史

微型真空管的概念最早源自于美国 SRI 的 K.R.Shoulders 教授。1961 年,他发表了一篇题为“使用电子束激活加工技术的微电子学”^[3]的文章,在这篇文章中,他的基本思想就是将真空电子管的尺寸缩小到微米量级。这种微型真空三极管如图 1-1 所示,可工作在 50V 左右,开关时间在 10^{-10} s 范围,输入阻抗高,对温度效应不敏感,工作温度可达 1000℃,寿命很长。

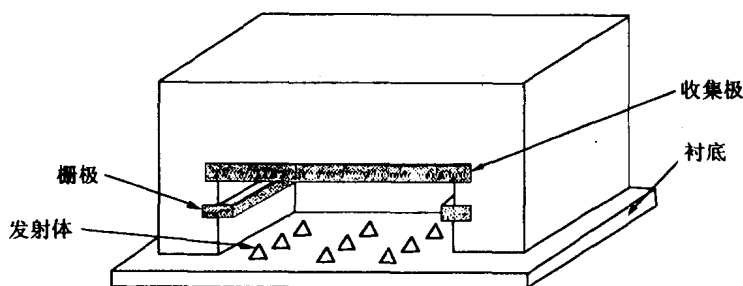


图 1-1 早期的微型真空三极管

1968年,K.R.Shoulders 教授的继承人 C.A.Spindt 提出了著名的 Spindt 阴极结构,即每个尖端发射体拥有各自的控制栅极,并研究出一种制造方法即薄膜技术^[4],同时采用这种薄膜技术制备了钼锥微型场致发射阴极阵列。

1974年,Thomas 等人首次报告了采用硅制造技术制备无栅极的 N型和 P型单晶硅尖端场致发射体^[5],展示了采用硅技术制造场致发射体阵列的广阔前景。

1976年,SRI 的 C.A.Spindt 等人改进制造技术,成功地采用双源旋转蒸发技术制备了大面积钼锥薄膜场致发射阴极阵列^[6]。1979年,I.V.Brodie 和 C.A.Spindt 所发表的实验结果^[7]表明 Spindt 阴极寿命已超过 25 000h(工作在 $12\text{A}/\text{cm}^2$,真空度可达 1.3mPa)。1985年,美国海军实验室的 Greene 和 Gray 在 IEDM85 年会上作了题为“集成真空电路”的报告,引起了与会者的极大兴趣,形成了真空微电子学的基本框架。^[8]

1986年,法国 Leti 的 R.Meyer 等人首次报告了采用 Spindt 阴极的矩阵选址平板单色显示器^[9]。同年,Lally 等人首次报告了采用 Spindt 阴极的微波管研究成果。这些开创性的应用研究为真空微电子学在场致发射显示屏和微波器件方面的实际应用所取得的辉煌成就奠定了基础。

1986年,美国海军实验室 H.F.Gray 博士首次采用硅材料和微电子技术成功地制备了世界上第一只横向真空晶体管^[10]。这一研究成果被誉为真空微电子学诞生的前奏。

1988年,第一届国际真空微电子学会议在美国 Williamsburg 召开,大会主席由美国 SRI 的 C.A.Spindt 和美国海军实验室的 H.F.Gray 共同担任。美国著名物理学家,SRI 的 I.Brodie 教授作了题为“迈向真空微电子学进程”的大会特邀报告^[2]。此次大会正式向世人宣告真空微电子学的诞生。1988年之后,真空微电子学会每年召开一次。从 1988 到 1997 年期间共召开了 10 届国际真空

微电子学会议,分别在英国、美国、日本、奥地利、法国、俄罗斯、韩国召开。历届国际真空微电子学年会时间见表 1-1。

表 1-1 历届国际真空微电子学会议简表

No.	时间(年份)	地点	大会主席
第一届	1988	美国	C. A. Spindt 和 H. F. Gray
第二届	1989	英国	R. Lee
第三届	1990	美国	C. A. Spindt 和 H. F. Gray
第四届	1991	日本	Namba
第五届	1992	奥地利	Mitterauer
第六届	1993	美国	M. A. Hollis
第七届	1994	法国	R. Baptist
第八届	1995	美国	A. Bell 和 W. A. Mackie
第九届	1996	俄罗斯	Y. Gulyaev
第十届	1997	韩国	JongDuklee 和 JohnKoo

1990 年,在法国 Leti,以 R. Meyer 为代表的 FED 小组首次展出了 256×256 像素单色 FED 电视样机。在 R. Meyer 的领导下,在 1993 年欧洲显示会议上,他们又展示了世界上第一只 6 英寸彩色 FED 电视样机^[15]。1994 年之后, PixTech 和 Futaba 公司开始将 FED 推进到产业化阶段,从而成为 20 世纪 90 年代末期显示技术研究和开发的热点之一。1996 年,国际信息显示协会决定将 Jan. Rajchman 奖授予 C. A. Spindt 和 R. Meyer,以表彰他们对 FED 的发展所作出的杰出贡献。真空微电子学发展历史大事记见表 1-2。

表 1-2 真空微电子学发展历史大事记

年份	主 题	研 究 者
1961	真空微电子学的开创;提出微型真空场致发射三极管的概念并研究电子束制造技术	Shoulders
1968	首次报告钨锥场致发射阴极的制备和实验,形成 Spindt 阴极的概念	Spindt
1969	展示正向偏置硅 PN 结中热电子发射	William 和 Simon
1970	提出使用 Spindt 阴极制备薄显示屏设想	Crost. et al.
1971	利用铯化负电子亲和势的热电子发射	Kohn
1972	首次报告采用氧化物热阴极的集成微型真空电路	Geppert
1974	首次报告场致发射硅尖制备技术	Thomas et al.
1976	大面积 TFEC 和物理特性分析	Spindt et al.
1979	Spindt 阴极寿命超过 25 000h($12\text{A}/\text{cm}^2$ 工作电流),可工作在 1.3mPa 压力下	Brodie 和 Spindt
1980	首次报告微型火山口状场离子源	Spindt 和 Aberth
1983	首次报告金属边缘场致发射阴极	Spindt et al.
1986	首次报告矩阵选址平板单色场致发射显示屏	Meyer et al.
1986	首次报告采用 Spindt 阴极的微波管	Lally et al.
1986	首次报告横向真空二极管	Gray et al.
1986	为分析哈雷彗星慧尾,利用 Spindt 阴极的电子碰撞离子器	Gurtis 和 Hsieh
1988	第一届国际真空微电子学会议	Gray 和 Spindt
1989	小于 10V 激励下的场致发射	Makhov
1990	亚纳米曲率半径的硅尖	Marcus et al.
1991	256×256 像素单色 FED 电视样机	Meyer et al.
1993	6 英寸彩色 FED 电视样机	Meyer et al.
1994	1 英寸 $\times$ 1 英寸单色金刚石薄膜显示屏	C. Xie et al.

1.3 真空微电子学的特点和内容

真空微电子学是真空电子学与现代微电子工艺相结合的产物。真空微电子器件可以称之为真空集成器件。这些器件的电子运输均在真空中,并采用固体器件工业中已发展成熟的现代微细加工技术制备而成,因而既有真空电子器件的优点,又有固体器件的优点。真空微电子器件采用 TFEFEC 作电子源决不是一种简单的零件取代,而是一种新型元器件的设计和研制。它不仅改善了器件整体结构,减小了体积,而且从根本上革新了原有器件的工作原理。

1.3.1 真空微电子器件的主要特性

(1) 薄膜场致发射阴极阵列,无需加热,可以在室温下工作。

(2) 采用亚微米固体器件制造技术和硅集成电路技术可使场致发射阴极阵列的电流密度比热阴极高几个数量级,并可工作在低电压调制下。

(3) 真空微电子器件可以工作在低于 500°C 的温度下,工作温度范围宽。

(4) 真空微电子器件可以抗辐射。

(5) 真空微电子器件中电子运动具有真空电子管中完全弹道式的运动,其漂移速度高于固态器件中由散射所限制的漂移速度。因此,真空微电子器件可以获得更高的开关速度或更高的工作频率。

(6) 真空微电子器件中,极间距离可以做到微米量级以下,因而真空微电子器件可以工作在低真空环境下,并且不产生放电和环境的变化。

真空微电子器件与真空电子器件、半导体器件的比较见表

1-3.从表中所列性能的比较,可以看出真空微电子器件兼有真空电子器件和固体器件的优点,同时又融汇出新的优点,即高频率和高集成度,因而具有广泛的应用前景。

表 1-3 真空微电子器件与真空电子器件、半导体器件的比较

	截止频率 /GHz	功率	功耗 /mW	集成度 /(个/mm ²)	抗辐射	温度敏感性 /℃
真空微电子器件	< 100 ~ 1000	中等 ~ 大	1	10 ⁴	很好	< 500
真空电子器件	< 4 (WE416A)	中等 ~ 大	1	10 ⁴	很好	< 500
半导体器件	< 20(Si) < 100(AsGa)	小 ~ 中等	10	10 ²³	差	- 30 ~ 50

1.3.2 真空微电子学的主要内容

1) 物理基础

真空微电子学以场致发射理论为主要理论依据。场致发射理论分为金属场致发射、半导体场致发射和内场致发射三部分。对于半导体发射体来说,由于掺杂浓度很高,其导电性能已接近导体,在实际理论计算中,可以近似采用金属场致发射理论。当然,更精确的描述需要修正的场致发射理论^[12]。此外,由于电子源种类不同,发射机理还涉及负电子亲和势原理(金刚石薄膜)^[13]、量子井效应(多孔硅)^[14]以及其他发射模型和理论^[15,16]。

物理基础还将考虑与场致发射现象相关重要参量的研究,如场致发射电子的能量分布、场发射体功函数、场发射现象所引起的温升效应以及寿命和噪声等^[17,18]。同时还将考虑真空条件的作用和影响,研究表面的原子吸附和迁移,研究电离及离子对表面的作用,研究空间电荷效应对器件特性的影响。

2) 器件制造