

国防电子情报研究课题

DB: BFQ90—915

CC:

序号: 4

国际真空微电子学概况

机电部电真空专业情报网

1991.1

关键词

真空微电子 VME (Vacuum Microelectronics)

国际真空微电子会议 IVMC (International Vacuum Microelectronics Conference)

国际场发射会议 IFES (International Field Emission Symposium)

可调制阵列场发射阴极 GFEC (Gated Field Emission Cathode)

薄膜场发射阴极 TFEC (Thin Film Field Emission Cathode)

真空微电子器件 (Vacuum Microelectronics Device)

多束电子束曝光系统 MEBES (Multiple Electron Beam Exposure System)

斯坦福研究所 SRI (Stanford Research Institute)

爱泽尔会聚透镜 ECL (Eingle Condensing Len)

真空晶体管 VT (Vacuum Transistors)

真空集成电路 VIC (Vacuum Integrated Circuit)

阵列场发射体场效应晶体管 FEAFET (Field Emitter Array Field Effect Transistor)

全硅场发射体阵列 ASFEA (All Silicon Field Emitter Arrays)

路易斯研究中心 LRC (NASA Lewis Research Center)

美军电子学司令部夜视实验室 AECNVL (U. S Army Electronics Command Night Vision Laboratory)

美国国防开发计划局 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)

美国纽约空军司令部格里弗斯基地 AFSCGAFB (Air Force Systems Command Griffiss Air Force Base)

美军电子学司令部蒙默斯堡 AECFM (U. S. Army Electronics Command, Fort Monmouth, NJ)

马克斯普郎克研究所 MPI (Marx Planck Institute)

场电离源 FIS (Field Ionization Source)

火山型离子源 VIS (Volcano Ion Source)

极高真空电离计 XHVG (Extremery High Vacuum Ionisation Gauge)

电子激励介吸 ESD (Electron Stimulated Desorption)

超元胞电话通讯网络 SCTN (Super Cellular Telephone Network)

海军研究实验室 NSL (Naval Research Laboratory)

场致发射阵列 FEA (Field Emission Array)

微腔集成真空管 MCIVT (Micro - Cavity Integrated Vacuum Tube)

乙二胺、邻苯二酚、水的混合溶液 EPW (ethylenediamine-pyrocatechol-water)

返波管 BWT (Backward-Wave Tube)

返波管振荡器 BWO (Backward-Wave Oscillators)

劳伦斯国家试验室 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)

磷硅玻璃 PSG (Phosphorus-doped silicon dioxide glass)

场发射三级管分布放大器 FETRODE'S (Field-Emission Triodes)

扫描隧道电子显微镜 STM (Scanning Tunneling Microscope)

neling Microscope)

原子力显微镜 AFM (Atomic Force Microscope)

扫描针尖显微镜 STM (Scanning Tip Microscope)

真 空 微 电 子 VME (Vacuum Microelectronics)

隧道电流敏感器 FCS (Tunneling Current Sensor)

国际真空微电子学概况

目 录

关键词

1、序言	(1)
1-1、国际真空微电子学的发展背景	(1)
1-2、真空微电子学的应用潜力	(3)
2、与 VME 相关的微电子学领域	(6)
2-1、细线条曝光技术	(6)
2-2、TFEFC 专用多电子束曝光系统 MEBES	(7)
2-3、二氧化硅膜的产生	(8)
2-4、离子铣与等离子体腐蚀	(9)
2-5、真空晶体管	(10)
3、新型不加热电子源	(11)
3-1、近代不加热电子源概貌	(11)
3-2、低压阵列场发射阴极 TFEFC 与 ASFEA	(15)
3-3、受控场效应真空场发射阴极	(17)
3-4、液态金属离子源、电子源	(18)
3-5、负电子亲和势 (NEA) 表面	(18)
3-6、等离子体电子源	(19)
4、微波器件与高能电子学方面	(22)
4-1、超小型行波管	(22)
4-2、宽带场发射三极管分布式放大器	(23)
4-3、毫米波返波管振荡器	(25)
4-4、千兆管 Gigatron	(28)
4-5、毫米波发生器 Orottron	(34)
5、微腔集成真空二极管和三极管	(36)
6、微尖锥荧光显示器 MFD	(41)
7、与 VME 相关的表面分析技术	(46)
7-1、扫描隧道显微镜 STM	(46)
7-2、原子力显微镜 AFM	(48)
7-3、弹道电子发射显微镜 BEEM	(49)
7-4、扫描离子电导显微镜 SICM	(49)
7-5、近贴场发射电子源投影显微镜 PFESSTM	(50)
7-6、扫描隧道电流计 STP	(50)

7-7、磁力显微镜 MFM	(50)
8、与 VME 相关的敏感元器件技术	(52)
8-1、悬臂梁隧道电流敏感器 TCS	(52)
8-2、硅压敏器件	(52)
9、与 VME 相关的真空技术	(56)
9-1、场离子源 FIS	(56)
9-2、TFEFC 用于遥控质谱计	(57)
9-3、采用 TFEFC 的极高真空电离计 XHVG	(58)
10、国外从事 VME 工作的单位统计	(59)
11、国内 VME 发展概况与国家投资建议	(64)
11-1、对国际上几个 VME 强国的估计	(64)
11-2、国内开展 TFEFC 工作的条件与对策	(65)

1、序 言

1-1、国际真空微电子学的发展背景

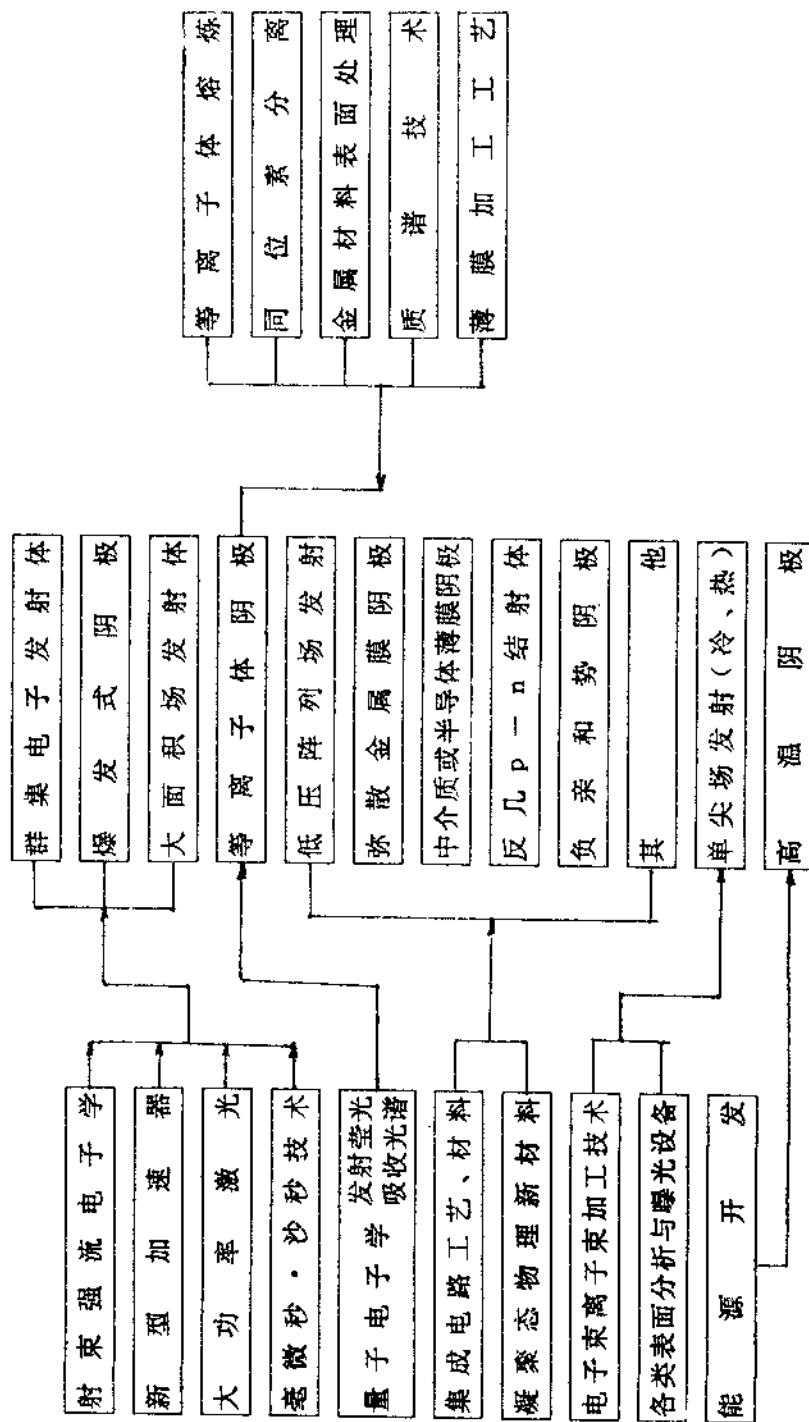
当前,一门新兴的真空微电子(Vacuum Electronics,简称 VME)学科正在兴起,VME 采用最先进的集成电路与微加工技术,利用表面与微区分析或处理手段,引入强场强下电子运动的特点,结合近代高速电路、材料科学的最新成就,将主要立足于传统电动力学的电真空器件、固体器件推向量子电子学领域。一场新的电子学革命的序幕正在高高拉起。

VME 的再度兴起并不是偶然的,它是基于长期以来场致电子发射现象与一些重大新兴学科相互渗透的结果。伴随着尖端科学技术的发展,揭示出一些新的科学现象,提供了一些新的方法与手段,一些新的电子运动规律被发现了,一些新的获取电子发射的途径出现了,并且各具特点。表 1 列出了近年来在重大新兴学科发展的促进下出现的一些新型电子发射源。国际场发射会议 IFES(International Field Emission Symposium)集中反映了这方面的成就。39 年来,正是这个会议蕴育了表面科学、凝聚态物理、薄膜场致电子源 TFEC、真空微电子学等学科的发展,也可以说,IFES 的历史也是 VLSI 与微加工技术发展的历史。

在表 1 所列的电子源工作方式中,薄膜场发射阴极 TFEC(Thin Film Field Emission Cathode)是其中的佼佼者。这种由美国斯坦福研究所教授 C. A. Spindt 等人发明的 TFEC,曾被美国三军阴极工作会议(1982)及欧洲真空器件会议誉为革新性成果,在各类电子器件中取代原来的热电子阴极取得成功,并在 80 年代中期获得了大大超过热阴极的电子发射水平,电流密度达到 $300\text{A}/\text{cm}^2$,总电流 800mA,寿命长达 7 万小时以上。

原则上讲,立足于最新微加工技术和大生产的 TFEC 有取代一切电真空器件及电子装置中电子源的潜力。这是因为,它所采用的阴极加工方法抛弃了传统电子源的手工生产方式,从而彻底解决了阴极的参量另散问题,开辟了获得均匀发射与发射重复性的新纪元。此外,由于现代微细精密加工的能力已足以使阴极中电子运动的量子性质有些体现,因此,受到美国、英国、苏联、日本、法国、中国、德国、加拿大、奥地利、西班牙及波兰等国科学家的高度重视。美国 IBM、ATS 等权威电子学单位广泛开展了应用研究。事实已清楚地证明,真空器件中采用 TFEC 作电子源决不是一种简单的另件取代,而是一种新型元器件的设计与研制,带来的不仅仅是器件整体结构的改善、精度的提高、体积的减小、参数的改进、一致性的获得、功率界限的突破。正如在微波电子学领域内的情况一样,由于微米或亚微米级可调制阵列场发射阴极 GFEC(Gated Field Emission Cathode)的采用,新原理的放大与振荡机制应运而生。一系列联合利用尖端效应、隧道效应及立体微型封装技术的真空微电子器件的出现,进一步引起了材料科学、电磁学、及电子物理学科的大飞跃。而三维微制备与微加工技术的发展,则掀起了对于新一类微型电真空器件及与之有关的新领域的与日俱增的兴趣,为响应同样日益增长的对微米、亚微米区域内场致发射的理解与利用,国际学术界针对其中影响较大的课题,发起了一系列新的国际学术会议,鉴于真空微电子学领域内的成就已不足以在国际场发射会议上反映,经美国真空学会发起,第一届国际真空微电子会议 IVMC(International Vacuum Microelectronics Conference)于 1988 年在美国威廉斯堡举行。会议所复盖的课题如表 2 所示。IVMC 的成功,标志着电真空器件的再度复兴。

表 1 近年来在一些重大新兴项目促进下出现的新型冷阴极



人们高兴地看到,50年代被美国 K. R. Shoulders 等人发展的低温真空集成电路,20年后又因 C. A. Spindt 等人的成就而得以发展。然而,建立在新原理、新技术、新工艺基础上的真空微电子器件 VMD 与当年利用热阴极的真空集成电路之间发生了质的飞跃,它不再是仅仅基于老古电路观念的真空集成电路,而是一种揉合了近代尖端科学技术成就的产物,这就是为什么在真空微电子学科发展的过程中,在新成就、新思想的刺激下,同时开展了对于非平衡态物理学、极高场强下的电荷传输、微结构物理化学及其与波的相互作用等问题的研究,进一步为新材料、新器件与新型电路的研制打开了宽广的道路。此外,真空微电子学的发展还引起了一系列新的应用研究课题。这种发展趋势,可以从国际真空微电子会议 IVMC 所复盖的议题看出,IVMC 所涉及的理论与实践范围极宽,为清楚起见,我们将它归纳成表 2 所示情况供参考。

1—2、真空微电子学的应用潜力

真空微电子学 VME 或真空微电子器件 VMD 在九十年代初期的科技竞争中,获得了很大的成功。对 20 世纪九十年代直至 21 世纪的科学研究和经济发展具有关键性的影响。美国贝尔实验室的物理学家 R. B. Marcus 将 VME 的发展比拟为一场革命,他说:“这是一场静悄悄的革命,我预料这一革命将会扩大”。美国海军试验室的物理学家 H. Gray 说:“这是一门全新的真空微电子学 VME,由于电子通过真空的速度比穿过硅或者任何其他物质的速度都要快,因此,利用这种微型真空管可以建造成运算速度极快的计算机,而且这种微型真空电子器件不象现有晶体管集成电路那样容易受到核辐射、温度以及静电等的损害。因此,它可以作成防核爆炸辐射的高可靠军事电子设备”。日本佳能研究中心的付主任高夫宇津美(Takao UTSUMI)说:“这种微型真空管的结构如此简单,而且,当它作得愈小时,性能就会愈好”。而该薄膜场发射阴极 TFEC 的发明者,美国斯坦福研究所 SRI 的科学家 C. A. Spindt 则说:“这一技术将提供研制高清晰度平板显示的最佳方案的良好机会”。国际上许多研究工作者已着眼于利用它制造超高速计算机,因为迄今为止的数据已经显示出了高速的特性,用它建造的计算机工作电压更低,运算速度更快,频带更宽,美国 Temple 大学的 T. E. Sullivan 教授说:“没有其他任何电子器件,能够对信号具有如此宽广的响应频率,它可以工作在由直流直至 $0.6\mu\text{M}$ 光频的范围内”。美国 H. Gray 教授申请了一项建立在真空微电子学基础上的计算机记忆元件的专利。总之,目前这方面的研究工作正在美国宾州大学,贝尔实验室,德波尔大学等 40 多个单位中紧张地开展着。

真空微电子学也将是一系列现代军事应用技术的基础,因为真空微电子器件可以作到体积更小,重量更轻,集成度更高,反应速度更快,而且可以耐核辐射,可在高温或变温的环境下工作。正如美国通用电气公司的赫斯特(Hirst)所说:“军事上对真空微电子学很感兴趣”。H. Gray 曾建议利用真空微电子技术作成超元胞电话通讯网络(Super Cellular Telephone Network),这种电话网络可工作在 6×10^{10} 赫兹下,从而适用于星际通讯,并可消除信号干扰。

表 2 国际真空微电子会议涉及的研究课题

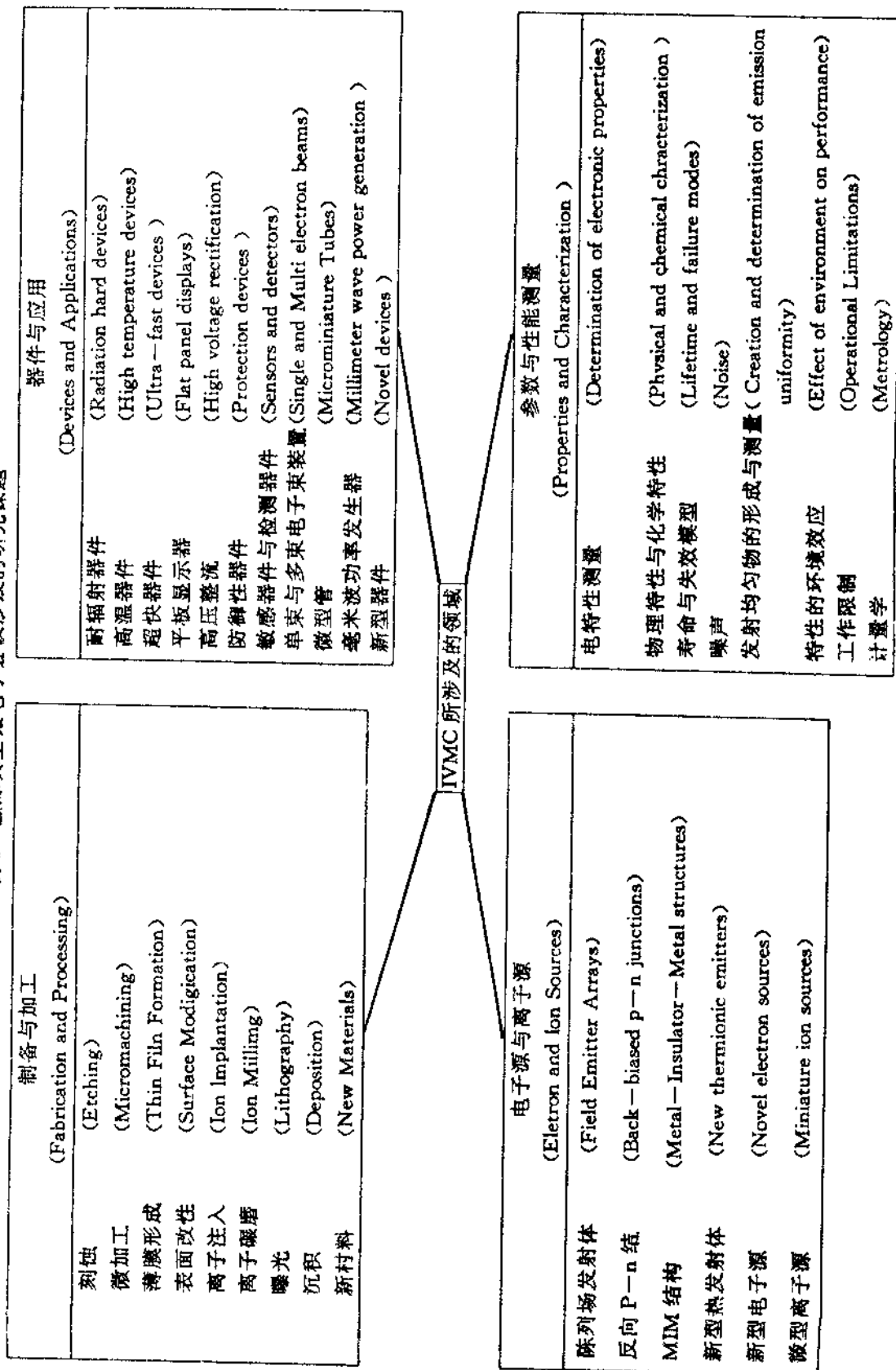
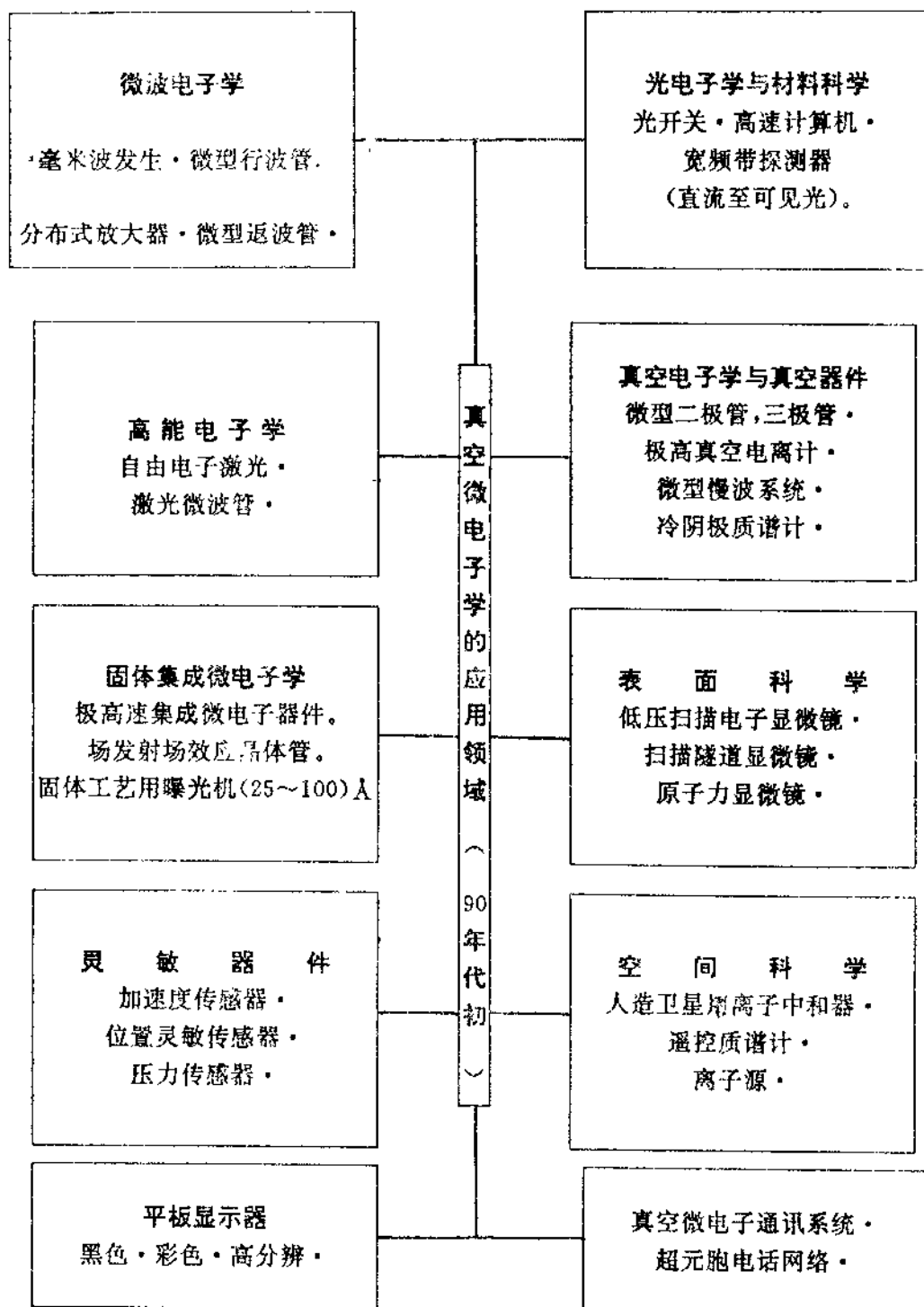


表 3 真空微电子学的应用领域



今天的真空微电子学已在世界范围内形成了声势,并在表3所示的十大领域内开展了应用研究。科学家们普遍对真空微电子学的发展持乐观态度。迄今为止已召开了四届国际真空微电子会议。由于真空微电子学在多项军事电子技术上的重要性,1991年海湾战争后,美国白宫首脑聚会,以美国总统布什为首,亲自决策向二项与军事密切有关的课题拨款5000万美元,其中的课题之一是利用薄膜场发射阴极的高清晰度平板显示器,另一项也是与真空微电子有关的X射线曝光。

(刘光诒)

2、与VME相关的微电子学领域

真空微电子器件及薄膜场发射阴极需要加工到 $1\mu\text{M}$ 左右线条,精度要求有时 would 达到数百埃(A),涉及微米与亚微米量级的微加工技术、大规模集成电路工艺、薄膜技术、新材料、表面及界面控制等领域内的尖端课题,综合性较强,难度较大。以美国Spindt型TFEFC为例,它的制备工艺流程中有多道技术难点,例如其中生长尖锥的超高真空双源蒸镀技术,是一种精度要求较高的实现立体结构的技术,据认为尖锥形状变动1%,发射电流变动10%,而尖锥的高度也要求正好在门极平面上,低子门极平面会降低门极的控制作用,超过门极则会使电子束发散。除TFEFC外,用作放大或振荡的VME器件,对电场分布的要求更高,加工精度误差将直接影响到器件的参数与指标。因此,整个VME领域除了需要利用常规VLSI领域的细线条技术外,还需要发展一些专用工艺。下面将扼要介绍一些VME专用技术,及VME选用的重点工艺,受VME影响而发展起来的固体器件也包括在内。

2-1、细线条曝光技术

通常的微细光刻将图形考虑为二维的来处理,采用光学曝光。但是随着对微细加工技术的要求不断提高,比如亚微米栅,光学曝光已经不能适应,而不得不采取非光学刻蚀技术。改用波长很短的电子束和X射线曝光,能很好解决微细加工所要求的高分辨率。例如,电子束的波长:

$$\lambda_e = (150.4/E)^{1/2}$$

其中E为电子的能量(电子伏)。当 $E=15$ 千电子伏时, $\lambda_e \approx 0.1$ 埃。电子束曝光中采用的加速电压一般为10~20千伏,故其波长约0.1埃,比紫外光波长短5个数量级,其衍射可忽略不计。

1、电子束“曝光”

电子束刻写是利用具有一定能量的电子,与“光刻”胶相互作用所产生的化学变化,使它变成不溶或易溶于溶剂的掩模。电子束“曝光”机可分为扫描式和投影式两类。前者不需要掩模版,“改版”方便,可大大缩短产品试制周期。但也有其缺点,即扫描面积小,“曝光”速度慢,不适于大批量生产。

2、X射线“曝光”

X射线“曝光”是电子束“曝光”技术的一个补充,因为它能够比较有效地利用电子束制版高分辨率的性能。因此,这种方法被认为是目前解决亚微米复印技术的最重要途径。由于X射线衍射、折射、反射及散射都极小,它的影响相对亚微米精度而言微不足道,同时又可使抗蚀剂涂层上下部分同等曝光,以及在普遍光刻中会造成严重缺陷的灰尘却对X射线“曝

光”没有显著影响,因而能够刻出极为精细的图形,理论上可达到 0.05 微米,实际上也已使图形线条的宽细到 0.1 微米以下。

3、离子束“曝光”

离子束刻写仍然处于实验阶段,除了用的是离子而非电子外与电子束刻写一样。重离子在抗蚀剂中或基片上没有散射,产生的二次电子能量很低,数量也很少。因而,分辨率应受到束直径的限制,而非电子束刻蚀散射效应特性的限制,理论上可达 $0.03\mu\text{M}$ 。虽然曝光机理与电子束刻蚀相同,但离子能对抗蚀剂提供比电子大得多的能量,这使得抗蚀剂的灵敏度大为提高,并大为缩短写时(Writing time)。

2—2、TFEFC 专用多电子束曝光系统(MEBES)

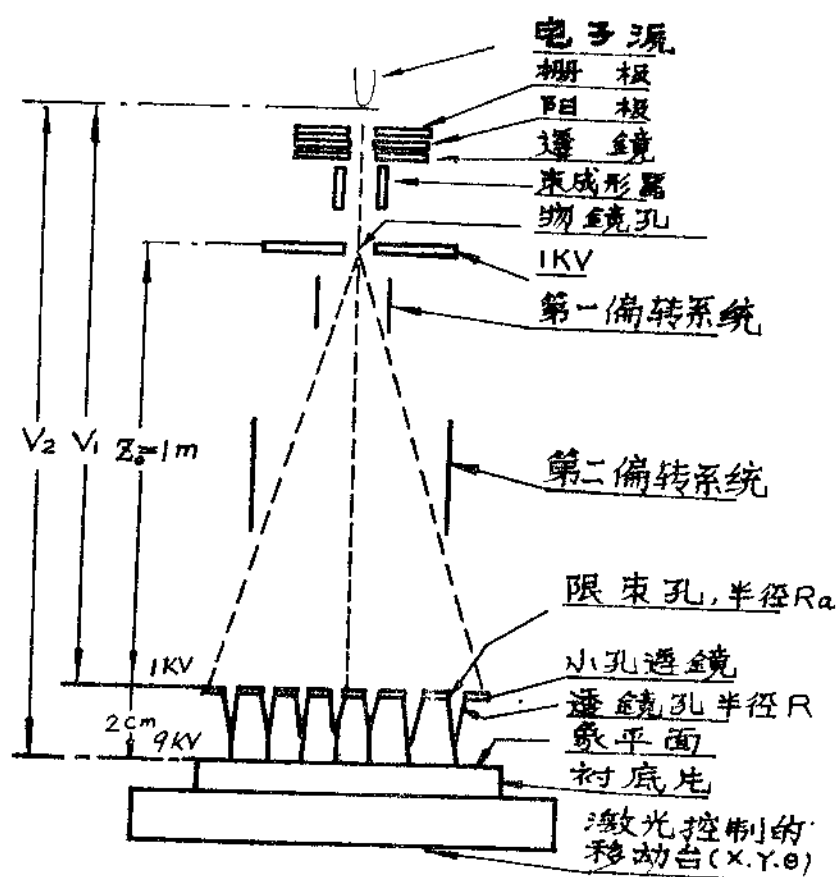


图1 多电子束曝光系统(MEBES)

MEBES 多电子束曝光系统(Multiple Electron Beam Exposure System)是斯坦福研究所(SRI)沿用了十几年的一种专用电子曝光机,早在 70 年代初期,美国斯坦福研究所(SRI)即开发出了这种专门用于 TFEFC 的小型电子曝光机,称之为小孔透镜的电子投影制版技术。这种技术实际上早在 1931 年即有报导。它是利用轴对称及面对称的小孔透镜(平面金属电

板上形成的微细孔洞阵列)对带电粒子束聚焦成象的方式工作的,工作原理如图1所示,图1是1981年又经过Brodie等人改进后的多电子束曝光系统,该系统由下列部件组成:钨发卡型电子源、爱泽尔会聚透镜ECL(Eingel Condensing Len)、束形成器、物镜、第一偏转系统与第二偏转系统、小孔透镜、靶极(即衬底)。束形成器用来控制电子束,便能形成短持续时间的快速曝光,并可有高的重复次数。由阴极发射出来的电子通过爱泽尔透镜形成严格限定的电子束,双偏转系统保持完成高精度度的位置分步重复图形曝光,也允许电子束画图形、点或直线。电子偏转系统是1981年改进后加进去的。工作时,使电子束在通过小孔透镜前形成低能电子束,在偏转区内不受加速,但通过小孔透镜后受到均匀的加速。小孔透镜与衬底之间构成一个平行度非常高的电极系统,衬底上涂复有优质电子束抗蚀剂,通过小孔透镜的电子束直接成象在衬底上。只要物距和象距的比例足够大,并保证靶极正电位约八倍于束的能量,则在轴对称情况下可在衬底上形成高缩小倍数((50~200)倍)图形的电子象。这种电子曝光系统结构简单,且有优良电子光学特性,它的分辨率可达9000Å,但是实际上分辨率最终不是受限于电子光学系统的球差,而是取决于别的因素,如阻蚀剂的性质。在SRI的Spindt实验室中,配合多束电子束曝光系统,多用正性的电子敏感聚合物聚甲基丙烯酸甲脂(PMM或PMMA)。用此系统获得的孔尺寸的均匀度可达±1.5%(在4厘米²范围内)。十多年的考验已经证明,多电子束曝光系统提供的小孔透镜图形投影方法,用在大面积曝光、获取高分辨率的电子束制版研究所工程科学实验室的电子物理小组拥有数台MBEBS,他们除用来制TFEC外,还用它来制造声表面波的叉指式转换器、贝克尔编码器、汉明加权图形转换器、光耦合器及磁贮存器等。

2-3、二氧化硅膜的产生

在硅工艺中,用作扩散掩蔽的SiO₂层都是采用高温氧化法来形成的,因为这能保证SiO₂层结构致密,使掩蔽性效果好。高温氧化(或称为热氧化)就是将硅片置于1000℃以上的高温,并通进氧化性气氛(如氧气、水汽),使硅片表面产生一层SiO₂。这是就地取材的一种好方法。

高温氧化的方法基本上有三种:干氧氧化、湿氧氧化和水汽氧化。不同氧化方法和氧化条件所获SiO₂层的质量不同。这是在于SiO₂属非晶体,其中的原子并无确定的位置,可以在较大的范围内变动。实践表明,干氧氧化速率慢,但所得SiO₂层质量良好,且能很好地与光致抗蚀剂粘附。水汽氧化速度快,但所得SiO₂层质量较差,而且过量的水还有腐蚀硅的作用,所以很少单独采用水汽氧化。但如果在氧气中掺一定数量的水汽,在一定程度上能够解决氧化速度与氧化质量间的矛盾,因此宜于在生长较厚氧化层时使用,但毕竟还是湿氧氧化获得的SiO₂质量不如干氧氧化的好,亦即前者结构较疏松且粘着也差。

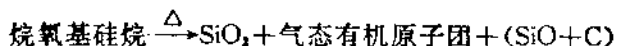
高温氧化的不足之处,例如:(i)在氧化层中存有氧空位,造成固定正电荷;(ii)由于热生长的SiO₂层与硅衬底的热膨胀系数不匹配,因而高温氧化后硅片表面存在着热应力;(iii)高温氧化过程中引起硅片表面附近杂质浓度发生再分布;(iv)高温氧化的最大问题还在于它要求比较高的温度,这不仅使得在氧化过程中硅片易受到碱金属及重金属等有害杂质的沾污,而且在有些情况下,这种高温处理过程根本不允许(如磷扩散后的高温氧化时间就不可过长,否则要改变磷扩散分布)。因此,为了解决以上这些矛盾,便发展了热分解淀积SiO₂的方法,特点是硅片并不参与形成SiO₂的反应,所以可在较低的温度下进行;而且还可以在金属、陶瓷或其它半导体材料(如Ge和GaAs)上淀积SiO₂层。淀积SiO₂层的常用方法有以

下两种:

1、烷氧基硅烷热分解沉积二氧化硅

可以采用的烷氧基硅烷种类较多。一般说来,分子中含有三个氧原子以上的烷氧基硅烷,能分解沉积出性能较好的 SiO_2 层,实际工作中最常用的是正硅酸乙酯 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ 和乙酯三乙氧基硅 $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)$ 两种。

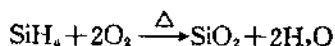
热分解沉积二氧化硅一般采用真空沉积法。虽然也可以用惰性气体携带的方法,但这样长成的 SiO_2 均匀性较差,且容易引入杂质。烷氧基硅烷在 700°C 热分解的典型反应是



用正硅酸乙酯进行真空沉积的典型工艺条件是:最佳炉温为 740°C ,原温为 $25\sim 30^\circ\text{C}$,真空度在 10^{-2} 托以上。烷氧基硅烷热解沉积的 SiO_2 层通常都比较疏松,沉积后还需要在较高温度($850\sim 900^\circ\text{C}$)下进行致密处理,把其中的一些有机原子团去掉。但是沉积的 SiO_2 层即使经致密处理也总是比高温氧化的要疏松。

2、硅烷热氧化沉积二氧化硅

这种方法是利用硅烷(SiH_4)在氧气中热分解并与氧反应来沉积 SiO_2 ,反应式为



此反应比上述烷氧基硅烷热分解反应的优点是:(i)不生成气态的有机原子团;(ii)反应温度低得多,硅片加热至 300°C 左右时,就能生成优质的并且有高度均匀性的二氧化硅层。用这种方法必须充分保证安全。

2-4、离子铣和等离子体腐蚀

随着半导体器件的高速化与高集成化,图形越来越精细。应用湿法腐蚀技术很难获得良好的精度,制作 $2\mu\text{m}$ 以下图形时,必须采用干法腐蚀技术。干法腐蚀从腐蚀原理上可概括为:(i)溅射腐蚀和离子铣;(ii)反应气体腐蚀(等离子体腐蚀、反应离子腐蚀);(iii)上述二者的混合(如反应离子束腐蚀)。

1、离子铣

最早的干腐蚀形式是射频溅射腐蚀。溅射反应器既可从基片上去除材料,也可在基片上沉积材料,取决于基片的位置,这种腐蚀纯属机械腐蚀方法。溅射反应基本上是两个圆柱状板(直径约 $20\sim 30\text{cm}$)。射频电场加在板上激励惰性气体原子,并给以垂直于板的动量。这一特殊的构型使腐蚀速率相当小。由此又发展了离子铣的概念。离子铣装置是将离子束集中在 $2\sim 3$ 寸直径的基片这样的小面积上,而不是投射在大面积的板上。此外,离子束由加速器产生,在其撞击到基片上时,成为均匀、单性和电中性的。简单的比喻就像喷沙。离子铣具有和溅射一样的特性;能以实际上相同的腐蚀速率来腐蚀绝大多数材料,由于这一原因,基片上的掩蔽图形至少应与铣掉的层一样厚。所腐蚀出的边缘轮廓近乎垂直,即没有横向钻蚀。如果掩蔽材料在边缘处是倾斜的,那末被腐蚀出的边缘轮廓也将一样有些倾斜,由于掩膜也以同样的腐蚀速率被腐蚀。用离子铣可容易地确定 $1\mu\text{m}$ 或亚微米图形。在离子铣过程中,基片要承受大量的热,如不相应地冷却则光致抗蚀剂掩膜图形将非常难以去除。离子铣也有些应避免的缺点。被铣掉的材料可沿掩膜材料的边缘出现重沉积,当掩膜去除后,沿图形边缘为下一条薄的垂直壁。在掩膜去除前采用各向同性的等离子体快速腐蚀一下,或采用离子铣与等离子体腐蚀相结合来确定图形,可以补救重沉积问题。另一个问题是二次溅射,这是入

射离子因镜面反射而离开掩膜边缘造成的。因而在图形边缘处产生增大的束流密度。这可在铣的过程中,通过倾斜或旋转基片来矫正。

2、等离子体腐蚀

射频等离子体腐蚀是又一项干法工艺,并已证明是相当成功的。射频场用来激励诸如 CF_4 、 CHF_3 、 C_2F_6 或 CCl_4 等一类气体产生反应气体等离子体,被激励的原子和由放电形成的原子团从电极上迁出,与衬底材料反应。这些被激励的原子和原子团在与衬底材料反应中,形成易挥发的反应物。这些易挥发的化合物(诸如 SiF_4)在腐蚀过程中,不断地被排出,有许多不同的气体(通常为氟化的碳氢化合物)可被用于等离子体反应装置来腐蚀硅、二氧化硅、氮化硅、某些金属以及多晶硅。当等离子体被激励时,其中各物质将具有不同的特性寿命。特殊物质的寿命将取决于反应室中气体的分压。寿命非常短的物质,只有当衬底置于辉光放电区内时,才能与衬底反应。长寿命物质可在距辉光放电区更远一些的地方被腐蚀,经常有这种情况,这些不同的物质以同样的腐蚀速率来腐蚀一种给定的材料。例如,在下面的反应中:



CF_3^+ 依据功率和分压,能以给定的速率腐蚀二氧化硅,但难以腐蚀氮化硅,并根本不能腐蚀硅,而腐蚀硅最有实用价值,另一方面, F^+ 腐蚀硅和多晶硅(P^+ 多晶硅除外)非常迅速,腐蚀氮化硅时的速率只有腐蚀硅时的速率的四分之一,而腐蚀二氧化硅时,还不到硅腐蚀速率的十五分之一。这一点是等离子体腐蚀优于离子铣的地方。特定材料的腐蚀速率取决于反应器中采用的气体、反应器的构型、射频功率、每片上要腐蚀掉材料的数量或面积、片数和气体的分压。随着功率和温度增加,腐蚀速率也增加。

圆筒形反应器和平行平板形反应器是等离子体腐蚀的两种基本装置。反应离子腐蚀与反应离子束腐蚀都是平行平板等离子体腐蚀反应器的改进型。简言之,硅岛在圆筒形反应器中腐蚀;多晶硅栅用离子铣和圆筒形等离子体腐蚀结合起来腐蚀;氧化物接触窗用反应离子束腐蚀来完成;铝金属化图形用离子铣腐蚀。

2—5、真空晶体管(VT)

80年代初,美国海军试验室的 H. Gray 继发明全硅阵列场发射体 ASFET(All Silicon Field Emitter Arrays)之后,又将 TFEC 立体结构中的门极及收集极集成在同一个衬底平面上,制成类似 50 年代同平面真空集成电路(VIC)中三极管的一种真空晶体管(VT),又叫场发射体阵列场效应晶体管(FAFET)。FAFET 揉合了晶体管和真空管的工作原理,如图 2 所示,环中间是一个尖锥状或劈形场发射体,构成发射极,旁边再制出二个同心环——漏极及门极。发射极发射电子,门极控制发射电流的大小,又叫控制极,外圈的漏极收集电子,又叫收集极。同一平面上的几个极之间为微米或亚微米数量级的绝缘体。由尖锥场发射体内发射出来的电子按弹道规律运动,形成一个典型的真空微电子三维器件,控制流过门极的电流,即可控制发射极发射到漏极的弹道电子电流大小。

VT 得以复苏的主要原因,是发现电子在真空中的传输速度可以比在固体中快一个数量级,真空中的介质常数低,击穿场强高,根据美国宾州大学 P. H. Cutler 等人的计算,1eV 尖锥发射的下弹道电子即具有 6×10^7 厘米/秒的速度,与 Gray 及 Campisi 所预言的数值一致。这一速度比半导体中电子的饱和速度高,对大多数固体材料来说,由于光子和声子的散射,实际的电子漂移速度要小一个数量级。康耐尔大学的 L. F. Eastman 全面比较了

FEAFET 与半导体 MOS 的电子传输、空间电荷效应、阻抗水平、功率能力及频率限制。SRI 的 I. Brodie 考虑负载、输入输出电容等因素计算出截止频率为 $f_T = 28\text{GHz}$, 电子渡越时间达到 10^{-12} 秒范围(在尖锥封装密度为 10^7 个/ cm^2 , 锥间距为 $(1\sim 2)$ 微米, 绝缘层厚度 1 微米条件下), 并预言在上述参量下, 电子渡越时间已不致对增益有所影响。

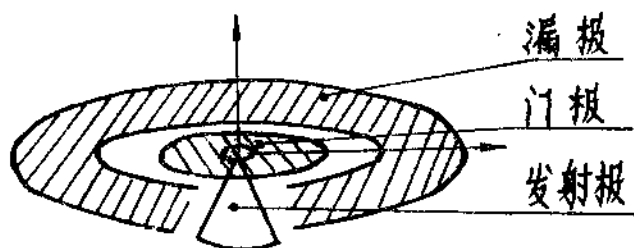


图 2 由一个发射极、一个门极及一个漏极组成的 FEAFETI 示意图

目前 VT 的结构设计有同心环(美国赛州大学)及长条形(美国康耐尔大学)二种。80 年代末报导的几种 VT 均可有效地工作在直到毫米波段的范围内, 但须工作在 ~ 200 伏左右的电压下, 明显地, 与半导体晶体管 ST 比较, VT 所要求的工作电压及功率水平较高, 而与器件工作频率成正比的高电流密度的要求及低阻抗水平的要求则相同。这方面对 VM 提出的挑战在 90 年代由于日本三菱电子公司研制的超导真空晶体管(SVT)而得以缓和, SVT 采用铌系超导材料制作同心环 VT 的电极, 一般金属材料制作的电极通过大电流时会因欧姆热而损坏, 改用超导体后, 不存在欧姆加热问题, 同时, 由极薄(如 $100\text{\AA}$)超导体制作的发射结, 在约 1 伏的电压下可产生 0.3mA 的收集极电流, 极大地提高了晶体管的集电极电流, 是一个重大的突破。其次, 由于电子是在真空中传输的, 使 SVT 的频率特性亦大为改善, 其开关速度达 0.5 皮秒, 频率可达 2THz 。这一优势使其他类型晶体管相形见绌。SVT 的出现, 使超高速器件将由约瑟夫森器件水平向前迈进一步。

(陆懋权 刘光诒)

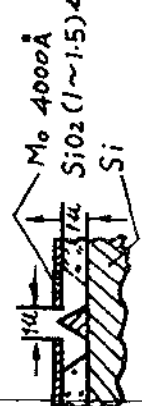
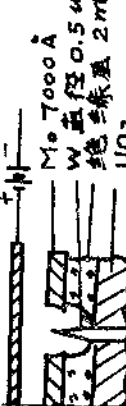
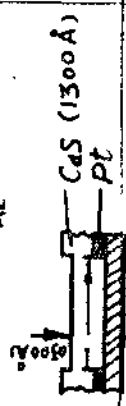
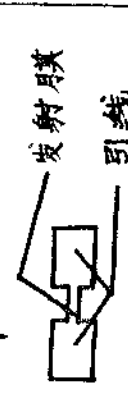
3、新型场发射电子源

3-1、近代不加热电子源概貌

认为电子源是电子器件的心脏的说法看来并非是一种偏见, 正如国际真空微电子会议通知上所说的: 未来真空微电子学领域的发展前途取决于稳定、可靠、具有大电流密度的电子源的发展。许多研究新型真空微电子器件的科学家将成功的关键因素之一归结为合适的电子源的选择, 以及对一些新型电子源的工作机制的正确理解, 这种看法不是毫无根据的。正是那些重视理解场发射电子源工作原理的科学家推动了真空微电子学科的飞速发展。

在讨论近年来电子源领域内的新进展时, 表 1 所列领域内的新技术、新材料、新工艺的发展起了决定性作用, 而表 2 所列的各种应用新型电子源的要反过来考验这些电子源, 从一个角度进一步深化了对它工作原理的认识, 精炼了制造技术, 并获得了可信赖的性能或各种指标。

表 4 各类冷阴极一览表

阴极类型	结构简图	指标 τ —寿命 j —电流密度	文 献
TFFED(阵列式薄膜场发射阴极 Spindt 型)		5000 尖阵列, 总电流 100ma (12A/cm ²) 单尖: 50~150ma τ = 2.3 年~7 年	[1]JAP, 39, 7, 1968, 47, 12, 1976 [2]美国专利, No. 4008412 1977 [3]电子学通讯, 1, 3, 1979 [4]Abd of Scen Scian. 2, 1979 [4] International Electron devices Meeting, 1980
Gray 型全硅阵列场发射阴极 ASFEA		封装密度可达 10 ⁶ 个/cm ² , 总电流可达 30 μ A τ ~ 12 周不衰减	[1]JEDM Tech. Dig. 1986 [2]29th Field Emission Symp, 1982
Chapman 型低压场发射阵列 LVFE		电流密度 10A/cm ² , 总电流 12.5ma τ > 2000 小时	[1]电子学通讯, 1, 3, 1979 [2]Vacuum, 30, 11/12, 1980 [3]JAP, 46, 1841, 1975
BeO 膜不加热阴极(横向场发射体)		j = 1A/cm ² ~ 4A/cm ² γ = 50% ~ 70% τ = 6000 小时	[1]Product Engineering, 38, 9, P. 27, 1967 [2]Электроника, 40, 5, 1967
CdS 膜电发射体		j = 10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻³ A/cm ² γ = 10 ⁻³	[1]ФТТ, 3, Т, 1С61 4, 11, 1962
SnO ₂ 发射体		总电流: 数百毫安 电流密度: 数安/cm ² γ > 20%	[1]Pws, 10, 8, 1965, 17, 4, 1972 [2]苏联专利, No. 553695, 1977 [3]美国专利, No. 4149308, 1979 [4]Proc. 7th Int. Vac. cong. 1977
弥散金属膜发射体 (Au, Ta, Mo, Cr 等等)	结构同上, 用 BeO 激活	总电流: 数百毫安(以钼为例) γ = (10~20)% (Mo)	[1]ФТТ, 8, 1, 1966 [2]Pws, 7, 1471, 1972 [3]Thin Solid Films, 9, 317, 1972 [4]Известия СССР, 37, 12, 1973 [5]Proc. 7th Int. Vac. cong. 1977

薄 膜 型

低压不加热阴极