

高等学校教学用书

微电子 焊接技术

金德宣 编

电子工业出版社

内 容 简 介

本书系统、深入地阐述了微电子器件焊接技术的原理、工艺及质量检测和分析。全书共十章，其中包括微电子器件概况、焊区金属材料及相图、焊区金属化制备技术、钎焊技术、烙焊技术、压焊技术、粘焊技术、梁式引线技术、面键合技术、自动载带组焊技术等。

本书可供从事微电子器件的研究和生产人员阅读，也可供微电子器件专业的大专院校师生参考。

微电子焊接技术

金德宣 编

责任编辑：陈晓莉

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京燕山印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：23.5 字数 619千字

1990年8月第一版 1990年8月第一次印刷

印数：1—1000册 定价：4.80元

ISBN 7-5053-0866-1/TN·307

序

微电子器件焊接技术是焊接科学领域中一门新兴的学科。近30年来，随着微电子器件的发展，“微焊”已逐渐形成比较完整的独立体系，它的焊接对象是一些极细的金属丝和极薄的金属膜，其主要的焊接方法有钎焊、接触焊、热压焊、冷压焊、超声波焊、淀积焊、还原焊、微等离子焊、微氩弧焊、电子束焊、激光焊、高频熔焊、梁式引线技术及面键合技术等。最近，又研究成功适合大量生产的自动载带组焊技术，使“微焊”有了新的发

展。由于焊接对微电子器件的可靠性影响极大，因此，在器件研究和生产中“微焊”占据了相当重要的地位，并越来越为器件工作者所重视。各种新的焊接技术还在继续研究，检查焊接质量的方法和标准正在拟订。焊接失效机理和可靠性分析的研究工作也在积极进行。

至今我国还没有一部关于微电子器件焊接方面的专著，为了促进这门新兴焊接技术的发展，作者在全国同行的支持下，编著了这本《微电子焊接技术》，以飨读者，希望能起到抛砖引玉的作用。

本书广泛地搜集了国内外的技术资料，紧密结合生产实践，力求其科学性、系统性、先进性和实用性。全书共有十章。

本书在编写过程中，承蒙各方面提供宝贵资料，在此谨向他们表示由衷的谢忱！

由于时间仓促，加之作者水平有限。书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

金德宣

目 录

第一章 绪论	1	3.5.4 印浆的配制	85
1.1 微电子器件的发展概况	1	3.5.5 焙烧工艺	85
1.1.1 晶体管和集成电路	2	3.5.6 应用	87
1.1.2 半导体光电子器件	5	3.6 陶瓷金属化技术	87
1.1.3 特种微电子器件	9	3.6.1 铝锰粉末烧结法	87
1.2 微电子器件焊接概况	15	3.6.2 钛粉末烧结法	88
第二章 焊区金属材料及相图	20	3.7 电镀技术	89
2.1 合金型器件的内电极金属材料	20	3.7.1 镀铜技术	91
2.2 平面型器件的内电极金属材料	23	3.7.2 镀锌技术	93
2.3 管芯焊接的金属材料	24	3.7.3 镀铬技术	95
2.4 器件引线金属材料	25	3.7.4 镀银技术	99
2.5 常用金属材料的特性数据表	26	3.7.5 镀金技术	102
2.6 相图及其应用	29	3.7.6 光亮SnPb电镀技术	107
2.6.1 一元系相图	29	3.7.7 电镀层质量检测	108
2.6.2 二元系相图	30	3.8 淀积膜厚度的测量方法	109
2.6.3 三元系相图	49	3.8.1 石英晶体振荡法	109
第三章 焊区金属化制备技术	53	3.8.2 微量天平法	110
1.3 物理气相淀积技术	53	3.8.3 探针法	110
3.1.1 气体分子运动的基本理论	53	3.8.4 光干涉法	110
3.1.2 真空蒸发淀积技术	56	3.8.5 电阻法及涡流法	111
3.1.3 溅射技术	63	第四章 钎焊技术	112
3.2 化学汽相淀积技术	68	4.1 钎焊的基本原理	112
3.2.1 氢还原汽相淀积技术	69	4.1.1 钎焊接头的形成过程	112
3.2.2 热分解汽相淀积技术	69	4.1.2 钎焊接头的金属学性质	115
3.2.3 化学汽相淀积实例	70	4.2 钎料	116
3.3 金属硅化物淀积技术	71	4.2.1 钎料的基本要求及熔化特性	116
3.3.1 淀积方法	71	4.2.2 软钎料	117
3.3.2 金属硅化物膜的性质	72	4.2.3 硬钎料	120
3.3.3 金属硅化物的应用	73	4.3 钎剂	121
3.4 器件芯片金属化中的问题	74	4.3.1 钎剂的作用和要求	121
3.4.1 台阶覆盖问题	74	4.3.2 软钎剂	122
3.4.2 淀积膜的合金成份控制问题	76	4.3.3 硬钎剂	125
3.4.3 $p-n$ 结尖端问题	76	4.3.4 钎焊后钎剂的去除	127
3.4.4 杂质沾污问题	78	4.4 电子级焊膏	127
3.4.5 铝层腐蚀问题	79	4.4.1 电子级焊膏的成分和性能	128
3.4.6 金属电迁移问题	79	4.4.2 金属存留量的计算	130
3.5 丝网漏印技术	81	4.4.3 应用	130
3.5.1 基片的材料	81	4.4.4 焊膏使用的注意事项	131
3.5.2 掩模原版的制备	82	4.5 钎焊的方法	132
3.5.3 漏印板的制备和安装	84	4.5.1 钎焊前零件表面的准备	132

4.5.2 电烙铁钎焊法	133	5.5.1 等离子体的特性	182
4.5.3 机械热脉冲劈刀钎焊法	134	5.5.2 等离子弧的产生	182
4.5.4 电阻钎焊法	134	5.5.3 等离子发生器——等离子枪	183
4.5.5 光学及激光钎焊法	135	5.5.4 微等离子焊接	184
4.5.6 气体保护炉式钎焊法	135	5.5.5 脉冲微等离子焊接	183
4.5.7 真空钎焊法	139	5.6 高频熔焊技术	186
4.5.8 感应钎焊法	142	5.6.1 高频电流的趋肤效应和邻近效应	186
4.5.9 超声波钎焊法	144	5.6.2 高频熔焊基本的方法	187
4.5.10 扩散钎焊法	144	第六章 压焊技术	190
4.5.11 各种钎焊方法的比较和选择	144	6.1 压焊的理论基础	190
4.6 影响钎焊强度的因素	145	6.1.1 压焊接头的形成机理	190
4.6.1 钎焊温度和加热时间的影响	145	6.1.2 压焊过程的特征和机理	191
4.6.2 母材强度及间隙的影响	146	6.2 接触焊技术	193
4.6.3 钎缝缺陷及表面粗糙度的影响	147	6.2.1 接触焊的基本原理及特征	193
4.7 钎焊的质量分析及检验方法	147	6.2.2 点焊和滚焊的焊点电阻分析	194
4.7.1 钎焊接头的缺陷和钎透率	147	6.2.3 点焊、滚焊时的热平衡	197
4.7.2 钎焊缺陷的检查方法	149	6.2.4 点焊、滚焊的形成过程及影响焊接的因素	193
4.7.3 钎焊接头的腐蚀和防护	150	6.2.5 不同厚度、不同材料的点焊和滚焊	200
4.8 钎焊的可焊性评价	152	6.2.6 焊点的缺陷及产生原因	202
4.8.1 可焊性的试验方法及试验标准	152	6.2.7 焊点质量的检查方法	205
4.8.2 可焊性评价的基准规定	155	6.2.8 点焊、滚焊的设备	207
4.8.3 可焊性试验设备	155	6.2.9 平行缝焊	212
4.8.4 可焊性试验结果和分析	156	6.2.10 平行微隙焊接	217
第五章 熔焊技术	160	6.3 冷压焊技术	221
5.1 熔焊的冶金过程	160	6.3.1 冷压焊的基本原理及影响冷压焊的因素	221
5.1.1 金属的结晶组织	160	6.3.2 冷压焊应用例举	222
5.1.2 焊区的金相组织	161	6.4 热压焊技术	223
5.1.3 熔焊的局部冶金过程	162	6.4.1 热压焊的基本原理	223
5.2 电子束焊接技术	162	6.4.2 热压焊的基本方法	224
5.2.1 电子束的产生机理	163	6.4.3 其它热压焊方法	227
5.2.2 电子束焊接的基本方法	163	6.4.4 影响焊接的因素	229
5.2.3 电子束焊接的特点和应用	166	6.4.5 “紫斑”现象的分析	230
5.3 激光焊接技术	166	6.4.6 半自动金丝球焊设备	232
5.3.1 激光的特性和激光焊的特点	166	6.5 超声波焊接技术	234
5.3.2 激光焊接机的工作原理	167	6.5.1 超声波焊的物理过程	235
5.3.3 激光焊接的工艺参数	169	6.5.2 超声波焊接设备	236
5.3.4 激光脉冲波形测量的方法	172	6.5.3 超声波焊接的几种方法	245
5.3.5 激光焊接热稳定的建立及参数选择	172	6.5.4 影响超声波焊的因素	247
5.3.6 激光封焊器件外壳的强度和密封性能	174	6.5.5 引线键合的质量控制	249
5.3.7 激光封焊可伐外壳的缺陷	175	6.6 真空扩散焊技术	250
5.4 钨极脉冲微氩弧焊技术	176	6.6.1 扩散焊接头的物理过程	251
5.4.1 氩弧焊及钨极脉冲微氩弧焊	176	6.6.2 真空扩散焊的设备	251
5.4.2 钨极脉冲微氩弧焊的设备	177	6.6.3 真空扩散焊的主要工艺参数	253
5.4.3 钨电极及焊接参数的选择	180	6.6.4 不同膨胀系材料的真空扩散焊	254
5.5 微等离子焊接技术	181		

6.6.5 真空扩散焊的优点	255	8.3.5 “梁”镀金工艺	305
6.6.6 真空扩散焊的应用实例	255	8.3.6 “梁”腐蚀工艺	305
6.6.7 真空扩散焊接头的质量检验	257	8.3.7 全铝系统工艺	306
第七章 粘接技术	259	8.4 器件芯片表面钝化工艺	307
7.1 低温银浆粘接技术	259	8.4.1 二氧化硅钝化膜工艺	307
7.1.1 银浆成份及配制	259	8.4.2 氮化硅钝化膜工艺	308
7.1.2 银浆烧结原理及粘接工艺	259	8.4.3 Al ₂ O ₃ 介质钝化膜工艺	312
7.1.3 银浆粘接的质量控制	261	8.5 梁式引线器件制造	312
7.2 共晶焊技术	261	8.6 梁式引线焊接方法	314
7.2.1 金-硅共晶焊原理	261	8.6.1 振动焊接法	314
7.2.2 金-硅共晶焊的基本方法	262	8.6.2 软压焊接法	314
7.2.3 金-硅共晶焊的质量控制	263	8.6.3 机械和电热脉冲焊接法	315
7.2.4 Au-Ag-Si系共晶焊	265	8.6.4 其它焊接方法	316
7.2.5 Au-Sn-Si系共晶焊	263	8.7 衬底制备	317
7.2.6 Au-Sn-CaAs系共晶焊	267	8.7.1 衬底材料	318
7.3 导电胶粘接技术	268	8.7.2 衬底金属化	319
7.3.1 导电胶的组份及特性	268	8.7.3 多层互连及保形涂层技术	320
7.3.2 导电胶粘接工艺	271	8.8 梁式引线的设计	321
7.4 环氧树脂粘接技术	272	8.8.1 热阻	321
7.4.1 环氧树脂的合成固及化机理	272	8.8.2 尺寸的标准化	322
7.4.2 环氧树脂的特性	274	8.9 梁式引线的结构	324
7.4.3 环氧树脂粘接工艺	276	8.9.1 p-n结隔离结构	324
7.5 低熔点玻璃粘接技术	277	8.9.2 空气隔离结构	325
7.5.1 低熔点玻璃及重要参数	277	8.9.3 双层布线及迭层板结构	325
7.5.2 低熔点玻璃材料性能	280	8.10 梁式引线的可靠性	326
7.5.3 低熔点玻璃粘接工艺	287	第九章 面键合技术	329
7.5.4 低熔点玻璃粘接可靠性	290	9.1 面键合技术的基本方法	329
7.6 芯片粘接(或焊接)强度的测量方法	291	9.1.1 铜球焊法	329
7.6.1 芯片粘接(或焊接)强度分析	291	9.1.2 可控塌缩法	330
7.6.2 芯片粘接(或焊接)强度的测试方法	293	9.1.3 多层金属凸点法	330
7.7 芯片粘接(或焊接)设备	294	9.1.4 单金属凸点法	332
7.7.1 手动装片设备	294	9.2 凸点的结构及制造	332
7.7.2 半自动(自动)装片设备	294	9.2.1 凸点的结构	333
第八章 梁式引线技术	297	9.2.2 凸点的制造工艺	334
8.1 淀积焊技术	298	9.2.3 凸点的其它结构	335
8.2 梁式引线的冶金系统	299	9.3 软凸点最佳几何结构的分析	336
8.2.1 接触金属	299	9.4 面键合法的衬底	338
8.2.2 键接金属	300	9.5 凸点芯片的焊接	339
8.2.3 阻挡扩散金属	300	9.6 其它组焊方法	339
8.2.4 “梁”金属	301	第十章 自动载带组焊技术	341
8.3 梁式引线金属化工艺	302	10.1 器件大圆片加工与凸点的制造	343
8.3.1 硅接触工艺	303	10.2 载带设计与制造	345
8.3.2 钛-铝-金系统工艺	303	10.2.1 载带的材料及结构	345
8.3.3 铝-钛-铝-金系统工艺	304	10.2.2 载带的制造工艺	347
8.3.4 钛-铝-金系统工艺	304	10.2.3 载带引线图形设计	348
		10.3 载带规格及应用	350

10.3.1 载带的规格	350	10.4.4 检测与筛选	358
10.3.2 载带的应用	352	10.4.5 引线切断与引线成型	358
10.4 自动载带组焊工艺	354	10.4.6 芯片安放与粘接	360
10.4.1 硅大圆片分割	354	10.4.7 外引线焊接及外封装	360
10.4.2 内引线焊接	355	10.5. 带凸点的载带	362
10.4.3 内封装	358	参考文献	369

第一章 绪 论

微电子器件焊接技术，是随着微电子器件的发展而逐渐形成的一门新兴的焊接技术。它与微电子器件的发展有着密切的联系，每一类新的器件的研制成功，都必然在焊接技术上有新的突破。为了满足微电子器件研究和生产的需要，半个世纪以来从事微电子器件的焊接专家们进行了不懈的努力，发明一系列的微焊技术。如今这门技术已经自成体系，成为一门独立和完整的焊接技术。

1.1 微电子器件发展概况

自1947年，点接触双极型晶体的出现，在人类历史上开创了新的技术革命——微电子器件时代，随后又出现了面结型双极晶体管。

五十年代初，晶体管开始了市场销售，当时主要是以锗器件为主的小功率和中功率合金型晶体管。

1951年发明了场效应晶体管（FET），并在半导体材料制备技术上研究成功了区域提纯，使器件单晶材料的质量提高了一大步。

1954年第一只锗大功率晶体管问世，硅大功率合金型晶体管相继在1956年出现，当时它们都局限于功率小于10瓦和工作频率在几十千赫范围内。

1956年氧化物掩膜版技术的研制成功及1957年光刻技术的研究成功，为研制硅平面晶体管创造了必要的技术条件。

1958年发明了单片集成电路。由于当时工艺手段的缺乏，例如：采用化学方法选择性腐蚀台面；蒸发时采用金属掩膜版来形成引线，使线条宽度局限在 $100\mu\text{m}$ 左右，因此集成电路的集成度很低。

1959年成功地生产了硅平面晶体管及发明了RTL技术。接着世界上第一块实用的集成电路问世。

1960年又发明了外延晶体管和DTL技术。

微电子器件工业发展速度的真正高涨是在1961年出现了完整的硅平面工艺之后，人们采用氧化、扩散、光刻、外延、蒸发等平面工艺，在一块硅片上集成多种元件，从而诞生了各种平面器件和平面型集成电路。随着分步重复和照相制板等技术的发展，可以成功地在一块硅大片上同时制做数量众多的器件，这就为硅平面器件（包括晶体管、集成电路、光电子器件、激光器件和其它特种等等）的工业化大生产开拓了广阔的前景。

目前，微电子器件的种类大致有以下几种，即：晶体管、集成电路（包括薄膜电路和厚膜电路）、半导体微波器件、半导体光电子器件、半导体敏感器件（包括力敏器件、热敏器件、磁敏器件、气敏器件、射线传感器件、湿敏器件及电压敏器件）低温超导电子器、以及可控硅整流器件、磁泡、声表面波器件等。

1.1.1 晶体管和集成电路

一、晶体管

锗合金工艺在五十年代初就已形成，因此，锗合金型晶体管成为晶体管发展的先驱。五十年代末，各种锗器件已广泛应用于各种音频电路和电源设备中。六十年代中期又出现了功率达数百瓦的锗低频大功率合金型晶体管。随着1956年硅合金型晶体管的出现，由于硅材料容易获得和硅晶体管的一系列优点（如：能工作在较高温度的环境，耐压高，反向漏电流小等）使得硅晶体管的发展速度远远超过锗晶体管。后来，为了满足短波的需要，研制了合金-扩散（AD）晶体管，但合金-扩散晶体管的结构和工艺的局限性，使其功率容量限制在50W以下。六十年代初，硅平面工艺的兴起，加上平面工艺本身特点（如：精密的氧化-光刻工艺），可制成极为复杂的电极图案，从而获得远比合金管大得多的发射极周长与结面积的比值。通过对扩散工艺条件的精密控制和调整，能精确地控制扩散结的深度，获得很小的基区，从而为高频-超高频晶体管的发展开辟了道路。随着外延工艺的引入，在很大程度上解决了长期存在于高频大功率管中的耐压和小饱和压降的矛盾。七十年代末，出现了千瓦级的超高功率容量晶体管，并成功地制造出了250~300A的大电流晶体管和千伏至万伏级的超高压晶体管。

随着硅平面工艺的发展，使半导体形成稳定的表面，为金属-氧化物-半导体场效应晶体管（MOSFET）的出现创造了必要的条件。1963年研制成功了MOSFET，这是晶体管发展史上的一个伟大创举。它为大规模集成电路（LSI）和超大规模集成电路（VLSI）的发展奠定了基础。

七十年代中期，由于微波整机的固体化和集成化的迫切要求，促进了半导体微波器件的发展。目前微波器件大致分为三大类，即：低噪声微波接收器件（包括点接触二极管、肖特基势垒二极管、参量放大变容二极管、隧道二极管、反向二极管、低噪声微波晶体管）、微波功率器件（包括微波功率晶体管、体效应器件、雪崩二极管、功率变容管和阶跃恢复二极管）、微波控制器件（包括 $p-i-n$ 管、功率变容管及电调变容管）。

砷化镓场效应晶体管（GaAsFET）的出现，为高频大功率晶体管的发展迈开了新的一步。1972年后，GaAsFET功率器件进展很快，尤其频率高的器件发展很快，目前已达表1-1中所示的水平。

表 1-1 GaAsFET功率器件的目前情况

频率(GHz)	功率(W)	增益(dB)	效率(%)	厂 家
4	18.5	3.5		Bell
6	25	5.5	24	NEC
8	20	5.0	20	NEC
10	10	4.4	14	三菱
12	4.1	4	16	三菱
15	2.5	4.8	12	三菱
18	2.2	4.8	24	WJ
22	0.14	4.8		RCA

二、集成电路

随着电子设备的小型化和微型化,促进了集成电路的发展。1962年ECL集成电路进入商品化。1963年TTL集成电路商品化。这时的集成电路还是由二极管、三极管和电阻互连组成的简单的逻辑门电路。1964年PMOS集成电路问世后,双极型集成电路和MOS型集成电路并行发展。由于MOS集成电路的结构简单、制造方便及性能优越,因而在集成度和成品率方面大大优于双极型集成电路。混合集成电路和薄膜集成电路的相继出现,给集成电路增添了新的内容。接着1966年发明了MOS动态变电阻器及肖特基TTL电路。1967年TTL中规模集成电路(MSI)、ECL(4ns)和CMOS电路的商品化。1968年NMOS电路和PMOS大规模集成电路(LSI)商品化,1969年D负载MOS集成电路和ECL(1ns)商品化及磁泡存储器的发明。1970年D负载MOS大规模集成电路(LSI)商品化,随后各种中规模线性电路的相继出现,使集成电路成为微电子器件中的一个重要的发展方向。

1970年以后,集成电路主要围绕电子计算机的需要向大规模(LSI)和超大规模(VLSI)方面发展(见表1-2所示)。1971年Intel公司首先做出了4位LSI4004微处理器(2,250个MOSFET),1972年Intel公司又做出了8位LSI8008微处理器,这些第一代微处理器都采用PMOS工艺。第二代微处理出现于1974年以后,其代表产品有Intel公司的8080, Motorola公司的6800, Zilog公司的Z80等,它们主要采用NMOS工艺。1978年初出现了第三代微处理器,首先是Intel公司的8086,接着于1979年3月Zilog公司的Z8000进行样机测试,1979年底Motorola公司的68000也进行样机测试,其中以68000性能最好,这种第三代微处理器都是采用HMOS工艺。表1-3列出了第一代、第二代、第三代微处理机的主要性能参数。

表 1-2 1973年~1984年集成电路的发展简况

时 间(年)	规 模	存储器(RAM)	微处理器	逻辑电路
1973	SSI	1K	4/8位	2K
1976	MSI	4K	8位	3K
1977	LSI	16K	8位	6K
1980	VLSI	64K	16位	19K
1983	VLSI	256K	32位	60K
1984	VLSI	1024K	64位	

1981年HP公司又发表了用450,000个晶体管组成的32位VLSI微处理机芯片,时钟频率18MHz,是采用1.5 μ m线宽、1 μ m间距的N沟道MOS工艺。

在发展单片微处理机的同时,还发展了LSI单片微型计算机,其特点是把计算机的各个组成部分(如CPU、RAM、ROM、I/O接口、时钟电路等)做在一个芯片上。这样,一台计算机就变成一个器件。表1-4列出了这类单片微型计算机典型产品的主要性能。

在LSI技术发展中,值得注意的动向是,Texas公司提出了全硅MOS器件的设想。这种器件不仅具有蓝宝石衬底MOS器件的高速度和高密度的特点,而且可能会导致真正的立体集成电路的出现。其制作工艺途径是首先在SiO₂上淀积一层多晶硅,经激光退火后,制作

表 1-3 第一、二、三代微处理机的主要参数

代别	型号	字长 (位)	寄存器数	寻址能力 (字节)	基本指令数	组合指令	指令周期 (μ s)	时钟频率 (MHz)	集成度 (门)	工艺	设计规则 (μ m)	芯片尺寸 (mm^2)	电源 (V)	功耗 (mW)
一	4004	4	3K	4K	46		10.5		770	PMOS			15-9	600
	8008	8	7K	16K	48		12.5		1100	PMOS			+15	750
二	8080	8	8(通用)	32K	78		1.5/3.75	1~2	1600	NMOS	6	23.3	12±5	780
	6800	8	3×16位 4×8位	64K	72		1.0/2.5	1~2	2700	NMOS	6	5.3×5.3	+5	500
	Z80A	8	7×16位 4×8位	64K	158		1.0/5.75	2.4~4.0	2800	NMOS	6	4.5×4.8	+5	450
三	8086	16	14×16位	1M	97	256	400	5~8	8000 (29000元件)	HMOS	4	5.7×5.7	+5	700
	Z8000	16	16×16位 (通用)	8M	110	414	750	4~8	5800 (17500元件)	HMOS	4	6.5×5.1	+5	1500
	68000	16	16×32位 (通用)	16M	61	>1000	500	4~8	20000 (68000元件)	HMOS	3	6.3×7	+5	1500

表 1-4 典型单片微型计算机的主要性能参数

型号 (厂家)	字长 (位)	寻址能力 (字节)	基本指令数	指令周期 (μ s)	时钟频率 (MHz)	RAM容量 (字节)	ROM容量 (字节)	I/O 线数	工艺	总片尺寸 (mm^2)	电源 (V)
8049 (Intel)	8	64K	96	1.3/2.7	11	128	2K	27	HMOS	5.6×5.6	+5
Z-8 (Zilog)	8	64K	129	1.5/3.7	4/8	144	2K	32	HMOS		+5
6801 (Motorola)	8	64K	82	2/12	1/3.5	128	2K	31	HMOS		+5
3872 (Mostek)	8		76	1/6.5	4	128	4K	32	HMOS	4.4×6.8	+5
9940 (TI)	16		68	2.4/5	5	128	2K	32	HMOS		+5

电路，在上面复盖一层SiO₂，接着再在上面淀积一层多晶硅，经激光退火以制作另一层电路，以此类推就可以做成立体电路。这一设想的实现，将会给VLSI的发展带来新的途径。后来的Intel公司的32位微处理器IAPX432研制成功及64位微处理器的出现，为高档的、多功能的智能计算机的开发，奠定了基础。

GaAs FET的出现后，由于GaAs薄层外延和离子注入技术的发展，使GaAs单片集成电路的制造成为可能。GaAs材料的迁移率比硅的迁移率约大6倍，采用半绝缘衬底制作LSI可减少寄生参量的影响，使电路具有高速度和低功耗性能，无论是与NMOS硅电路还是与CMOS/SOS硅电路相比，GaAs集成电路的速度-功耗积都小得多。在高速低功耗集成电路方面，GaAs集成电路将是强有力的竞争者。

GaAs集成电路可分为直接耦合场效应晶体管逻辑(DCFL)、缓冲场效应晶体管逻辑(BFL)和肖特基二极管场效应晶体管逻辑(SDFL)，它们的特点由表1-5所列出。在1981年，SDFL的最小开关时间已小于100ps，最小功耗低达0.2nW/门，速度-功耗乘积近似为30fJ。同时已做出了1008个门的8×8位并行乘法器，乘法时间为5.3 μ s。1985年制成了5000~10000门的LSI。

集成电路的发展情况，由图1-1示出。

表 1-5 GaAs数字集成电路的特点

器件模式	增强型 GaAsFET				耗尽型 GaAsFET	
电路类型	DCFL				BFL	SDFL
器件类型	E-MESFET	E-JFET	E-HJFET	E-MOSFET	D-MESFET	D-MESFET
典型逻辑摆幅 $v_m(V)$	0.5	0.9	1.5	1~5	2.5	0.5~2.0
工艺复杂性	掺杂和有源层厚度需严格控制	作p-n结外延异质结		作氧化层	简单	
能否用平面工艺	能	能	否	能	能	
成品率	低	中	低	低	高	

1.1.2 半导体光电子器件

半导体光电子器件是把电能转变为光能或光能转变为电能的器件，或者通过电子过程探测光信号的器件。把电能转变为光能的器件又分为非相干光器件（即发光二极管）和相干光器件（即半导体激光器）。

一、发光二极管 (LED)

从1907年在无线电检波器的实验中观察到半导体的电发光效应后，五十年代对GaAs及GaP的电光现象进行了研究，六十年代集中研究了获得高效可见光器件。这项研究工作的主要方面是寻求新材料，要求这种材料既有直接跃迁的高效率(如GaAs)，又有足够的获得可见光的禁带宽度(如GaP)，于是研制了GaAlP、GaAlAs等混晶材料。1962年在GaAs衬底上液相外延生长，制出了GaAs_{1-x}P_x的红色发光二极管，这种液相外延工艺发展很快，已成为目前发光二极管的主流工艺。1969年，由于液相外延的进步，为GaP高效发光p-n结的制作提供了条件，外量子效率高达15%。同时研制出了掺氮的GaP，发出绿色光，从而为发光二极管多色化打下了基础。

在发光机构上，除p-n结注入外，还出现了肖特基势垒和MIS机构。在器件结构上，除分立发光器件外，还出现了集成发光器件。也有把两个不同发光颜色的发光二极管并在一起，在不同的讯号驱动下，分别发出红光或绿光。还有用脉冲驱动同一个GaP二极管上，获得两种颜色光，即：低电流密度宽脉冲时，器件发出红光；高电流密度窄脉冲时，器件发出绿光。实现了同一器件双色化。

自1968年GaAsP LED红色指示灯在美国商品化以来，在台式计算机、手表、时钟、收音机、录音机、电视机及各种仪器装备的信息显示中，LED都得到了广泛应用。目前不但有红色、绿色、红绿色的LED，而且橙黄色的LED也商品化了，因此，LED在电子设备中广泛应用，其数量较其它各种显示器件总和还多。随着LED的多色化和高亮度化，可以期望各种设备将更加广泛地采用LED。表1-6列出各种LED的主要性能。其中掺ZnO的GaP红色LED在可见LED中发光效率最高的。GaP是间接跃迁型半导体，发光跃迁几率小，要得

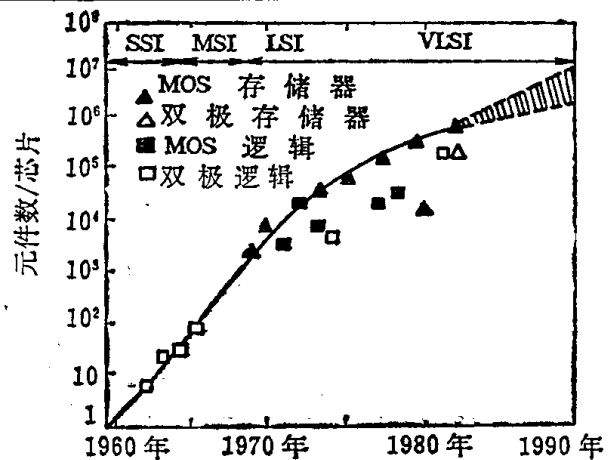


图 1-1 集成电路发展的基本情况

表 1-6 各种LED的主要性能

LED种类	制造方法		发光特性			外量子效率		功率发光效率	
	衬底	p-n 结	颜色	峰值波长 (nm)	视感度 (lm/W)	商品(%)	最高值 (%)	商品(%)	最高值 (%)
GaAs _{0.6} P _{0.4}	GaAs	VPE+扩散	红	650	70	~0.2	0.5	0.14	0.38
GaAs _{0.35} P _{0.65} : N	GaP	VPE+扩散	红(橙)	632	190	~0.2	0.5	0.38	0.95
GaAs _{0.15} P _{0.85} : N	GaP	VPE+扩散	黄	589	450	~0.05	0.2	0.22	0.90
GaP: ZnO	GaP	LPE	红	695	20	2~4	15	0.4~0.8	3.0
GaP: N	GaP	LPE	绿	563	610	0.05~0.15	0.7	0.3~0.9	4.2
GaP: N	GaP	VPE+扩散	绿	563	610	~0.05	0.7	0.3	0.6
GaP: N	GaP	VPE+扩散	黄	590	450		0.1		0.45
N > 10 ²⁰ cm ⁻³									

到高效率，必须控制发光中心ZnO的浓度，提高晶体完整性及提高少子寿命。掺N的GaP棕色和黄色LED，因掺N浓度不同，其发光波长也就不同，表 1-2 中LPE制法的LED的发光效率（外量子效率）比VPE制法高2倍，由于LPE法生长层结晶性好，少数载流子寿命长。但用VPE法可大量掺N（N的浓度可达10²⁰/cm³以上），可作黄色LED。进展最大的是掺N GaAs_{1-x}P_x 高效率红色（橙色）和黄色的LED。

二、太阳能电池

光生电动势(即光生伏特)效应,早在1876年就发现了。人们经过了半个多世纪的努力,在本世纪三十年代研制出了一些材料的光电池。直到1954年利用硅材料,采用扩散p-n结工艺制成了光电转换效率达6%的第一个有实用价值的太阳能电池。经过改进提高后,到六十年代这种硅太阳能电池已成功地用到人造卫星和宇宙飞船上,作为长期电源和地面的特殊电源,它的光电转换效率高达15%,大量生产的光电池也能达到12~13%。与此同时,又研究了其它材料的太阳能电池,例如:砷化镓(GaAs)单晶及薄膜太阳能电池、硫化镉单晶及薄膜太阳能电池、碲化镉单晶及薄膜太阳能电池等,其光电转换效率也达到实用的要求,但是如今大量应用的仍为硅材料太阳能电池。由于七十年代能源问题的矛盾突出,更加快了太阳能电池的研究,并把发展极其经济的高效率的太阳能电池作为开发新能源的计划之一。

目前,用硅带晶(主要是由孪晶结构组成)制造的太阳能电池已经商品化,单元电池光电转换效率平均可达8%;太阳能电池板的光电转换效率可达6.3%,经过改进后将能达到8%的水平,它超过了硅单晶太阳能电池板的6.5%的转换效率的水平。硅带晶被认为是最有前途的太阳能电池材料之一,它与硅单晶材料相比可大大地降低成本,为解决太阳能地面发电站的实际问题迈进了一步。与此同时,科学家们正在对非晶半导体进行认真的研究,如果将来采用非晶材料制造太阳能电池,则其成本要比晶体低得多,而且使用太阳能电池发电,必须解决两个问题:一个是要大大降低成本;另一个是要提高光电转换效率。为此,现在采用连续生长硅单晶或气相生长多晶硅以及连续区熔法制备单晶薄片、使太阳能电池生产工艺自动化,降低生产成本。

三、光电探测器

光电探测器的种类有光电导体、耗尽层光电二极管(包括p-i-n光电二极管、p-n结光电二极管、金属-半导体光电二极管、异质结光电二极管)、雪崩光电二极管、光子牵

引探测器及列阵与集成探测器等。

光电导体是一种块状或薄膜状的半导体器件。当入射光照射到光电导体的表面，光电导体便吸收入射光子，通过价带—导带跃迁(本征半导体)或禁带中的杂质能级参与的跃迁(掺杂半导体)，使载流子数增加，造成半导体电导率的增加。在红外探测中，本征半导体材料的光谱响应的波长不超过 $7.5\mu\text{m}$ ，延长响应光谱波长的一个方法，就是利用具有适当激活能的杂质光电效应。利用这一效应制成许多锗、硅及锗—硅合金掺杂的红外探测器，见表1-7所示。硅掺杂的探测器虽也有所研究，但不如锗掺杂探测器成熟，见表1-8所示。从理论上这两者的光电导特性没有什么区别，根据对光电导的伏安特性，噪声频谱，时间等参数测量结果，二者也是很相近的。为了提高探测器的灵敏度、光电导体必须在低

表 1-7 锗、硅及锗-硅合金掺杂的红外探测器

探测器	工作温度(K)	波长限(μm)	峰值探测率 ($\text{cm} \cdot \text{Hg}^{\frac{1}{2}}/\text{W}$)	响应时间(s)
Ge: Au	77	8	1×10^{10}	5×10^{-8}
Ge: Hg	38	14	4×10^{10}	$< 10^{-6}$
Ge: Cd	20	23	4×10^{10}	$< 10^{-6}$
Ge: Cu	4.2	27	5×10^{10}	$< 10^{-6}$
Ge: Zn	4.2	40	5×10^{10}	$< 10^{-6}$
Ge-Si: Au	50	10.3	8×10^9	$< 10^{-6}$
Ge-Si: Zn	50	13.8	1×10^{10}	$< 10^{-6}$

表 1-8 非本征Si和Ge光电导的杂质电离能 E_i 和相应的截止波长 λ_c

探测器	$E_i(\text{eV})$	$\lambda_c(\mu\text{m})$	探测器	$E_i(\text{eV})$	$\lambda_c(\mu\text{m})$
Si: P	0.045	27.6	Si: B	0.04335	28.2
Si: As	0.0537	23.1	Si: Al	0.0685	18.2
Si: Sb	0.043	28.8	Si: Ga	0.0723	17.2
Si: Bi	0.0708	17.6	Si: In	0.1554	8.0
Ge: Cu	0.04	31.0	Ge: Zn	0.03	41
Ge: Ag	0.13	9.5	Ge: Cd	0.05	25
Ge: Au	0.16	7.7	Ge: Hg	0.09	13.8

温中使用，本征半导体材料的工作温度可以高些。 $8 \sim 140\mu\text{m}$ 波段的探测器的材料还可用二元化合物如闪锌矿结构的II-VI族化合物，氯化钠结构的IV-VI族(化合物等)及三元系化合物(如 HgCdTe 和 PbSnTe)。目前，用这两种材料制成的 $8 \sim 14\mu\text{m}$ (77K)探测器都已接近背景限。多元系(不一定是合金)为探索新的光电导体探测器材料开辟了广阔的途径。继 HgCdTe 和 PbSnTe 之后，又出现了III-V族 $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x$ 、 $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ 及II-IV-V族的 ZnSiP_2 、 CbSnP_2 和II-III-VI族的 $(\text{In}_2\text{Te}_3)_x(\text{Hg}_3\text{Te}_3)_{1-x}$ 等。

除了通常的p-n结光伏探测器外，还有利用各种不同势垒效应制成的许多特殊光伏器件(如耗尽层光电二极管、雪崩光电二极管)。

1970年以后出现的光子牵引探测器是一种新型激光接收器。研究最多的是p型锗光子牵引探测器，它是适用于各种类型 CO_2 激光器的室温、快速探测器。目前正在研究和发展

其它材料及其它波长的光子牵引探测器，例如：10.6 μm 波长的 p 型Ge、10.6 μm 波长的 p 型Te和 n 型InAs以及10.6 μm 波长的GaAs、InSb。

随着红外系统的发展，红外探测器正朝着列阵与集成探测器方向发展。

四、半导体激光器

第一只激光器是1960年报导的脉冲红宝石固体激光器。1962年在液氮冷却下，正向偏置的GaAs p - n 结激光器研制出来，我国是1963年用GaAs p - n 结首次做出半导体激光器。1970年发明了有实用价值的双异质结(DH)激光器——GaAs-Ga_xAl_{1-x}As双异质结构，阈值电流密度降低了2个数量级并能在室温下连续低阈工作(阈值电流密度500~100A/cm²)，连续输出功率达200mW，寿命达一万小时以上，室温下功率转换效率超过20%，激光管列阵器件有kW级的脉冲功率输出。因此，双异质结激光器(如GaAs-GaAlAs, InP-GaInAsP等材料)被认为是最有发展前途的几种激光器之一，它在光纤通讯、测距、信息存储与处理等方面，有着重要的应用。

另外，在可调谐激光器的研究中，半导体激光器占有相当的地位，电子束激励的半导体激光器有可能应用在大屏幕显示中。分布反馈激光器由于其单色性和方向性较好，又因其结构特点适于做成集成化的光源，因而颇受重视。

1977年报导了GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs双异质结条形激光器，采用优质多层液相外延生长技术和无应力器件工艺，已经获得室温单模连续激射，实际工作寿命在70℃下超过2万小时，外推室温工作寿命可以达到10⁶小时。

特别值得注意的是激光源、波导和其它光学元件可以同时制备在一个半导体基片上，无需复杂的外部耦合技术。同时还可以在一个半导体基片上，制备激光器列阵，实现光信息处理的功能。因此，人们期望不久能实现单片集成光功能回路，这就会为实现特大存储量，更高运算速度，工作可靠、体积小的光计算机的发展，开拓光明的道路。

五、电荷耦合器件

电荷耦合器件简称CCD，是1970年发明的一种新型微电子器件。在这之前，1969年发表了斗链器件，也称斗串器件，简称BBD。1970年发表的表面电荷晶体管、简称SCT。这三种器件与后来发表的C⁴D、CID、BCCD及BCD等器件，统称为电荷转移器件，简称CTD。CCD是其中最重要的一种器件，目前已发展到成批生产和实际应用。它是大规模集成电的后起之秀，也是1962年MOS场效应晶体管发明后的一次半导体技术的重大突破。

CCD结构，由图1-2(a)所示。它是在 n 型或 p 型硅单晶衬底上生长一层厚度约为0.12 μm 的SiO₂层，然后再在SiO₂层上蒸发一层间距很小的并排Al电极，形成一种MOS阵列，再据不同应用要求做上输入端和输出端，构成了CCD的重要组成部分。当Al金属电极上施加一定周期变化的时钟脉冲时，便可在半导体内Si-SiO₂界面附近形成贮存少子的势阱(对于少子为空穴，时钟脉冲为负电压；对于少子为电子，时钟脉冲为正电压)如图1-2(b)所示。

CCD的特点是可以不通过外部金属引线，而仅在半导体内部来完成电荷转移。如果有电荷注入时代表数字“1”，无电荷时代表“0”数，则CCD本身就是一个移位寄存器，或是数

字信号与模拟信号的延迟器。利用这个特点, CCD在存储、信息处理及摄像三个方面得到了广泛的应用。1977年发表了128K位的CCD存储器。1976年美国Bell实验室发表了 496×475 阵列摄像器,其中有 248×475 像素及 248×475 阵列为存储运输信号。在信息处理方面, CCD是实现模拟取样,数值延迟功能的硅集成电路,能完成其它器件难以取代的功能。

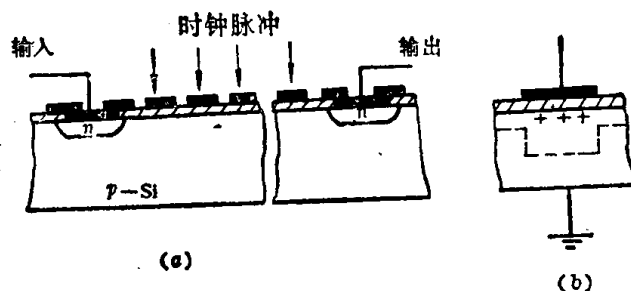


图 1 CCD结构示意图

从CCD的结构与工艺上来看,它的发展也是显著的。它不仅吸取了目前用于MOS和双极型集成电路的一些新工艺,而且也针对CCD工作的特点发展了一些新工艺。早期的CCD是采用类似 p 沟MOS或 n 沟MOS场效应管的工艺,最简单的只用4块光刻板。但是,随着性能要求的提高和实际应用中把驱动电路,外围电路集成在芯片上要求,CCD工艺已从比较简单变得相当复杂发展了许多新结构,目前CCD已是一种集成度相当高的大规模集成电路了。

六、集成光电器件

电子技术进入光频后,在集成电路的启示下,人们对集成光路进行了研究,即把各种光电子器件(如:激光器、光电二极管、光开关等)作到一个基片上,形成一个完整的功能(如集成光发射机、接收机或逻辑光路等)。集成光路有两类,即:混合式和单片式。混合式是将单个光电子元器件组合在玻璃或 LiNbO_3 衬底上,按需要在衬底上作成光波导将这些元器件连结起来,构成一定功能的部件。单片式是将有源光电子器件和无源光电子器件都作在同一衬底上构成一定功能的部件。

集成光路的研究工作的理论、工艺和应用等问题是从六十年代初开始的,它涉及的理论和制作技术较广,结构复杂,工艺精巧。现今已研制出了一些薄膜光学元器件,如激光器、调制器、耦合器、衰减器、薄膜透镜、棱镜、光波导等。也研制了一些组合结构。但完整功能的集成光路部件目前仍处于探索研究阶段。集成光路可望首先在光通讯技术中得到应用。光计算机必须采用集成光路,它的运算速度极高十分优越,但尚有更艰巨的工作等待开发。只要关键技术得到突破,集成光路在大容量信息传输和高速数据处理方面将是一项很有发展前途的项目。

1.1.3 特种微电子器件

一、低温超导电子器件

约瑟夫逊器件为超导电子技术发展开辟了广阔的前景。它是一种无损耗的有源器件,优越的高频特性使它可以成为优质微波器件或超高速开关器件。

利用约瑟夫逊器件的非线性可在毫米波、亚毫米波波段作低噪声检波器、混频器、参量放大器,还可以作成振荡器。在 30GHz 下用超导肖特基二极管做混频器,其噪声温度已低达 6K ,是当前低噪声二极管的高水平指标。在 9.5GHz 下,约瑟夫逊参量放大器的增益

已达16dB，噪声温度为22K。

约瑟夫逊开关器件的开关转换过程完全在超导相中进行，其开关速度比现在最好的半导体电路至少快10倍，而其功耗为半导体集成电路的千分之一。

约瑟夫逊器件的超高速和极低功耗性能已成为人们拟议中的第五代或第六代电子计算机的候选者。拟议中的超导计算机的功能比现在的IBM370/168大型计算机高出若干倍（如表1-9所示），其运算速度比IBM370/168快20倍；中央处理装置的周期时间和高速缓冲存贮器的取数时间短20倍；主存贮器容量大2.7倍，取数时间快20倍；最大输入/输出数据率快120倍；功耗7W；尺寸为 $1.5 \times 15 \times 15\text{cm}^3$ 。这种超导计算机的主机（包括CPU、I/O通道、高速缓冲存贮器和主存贮器）放在长1.2m、直径70cm的园柱形致冷器中，可连续工作5h左右。

表 1-9 超导计算机与IBM370/168机的性能比较

项 目	超导计算机	IBM370/168机
运算速度	7000万条指令/s	350万条指令/s
中央处理装置周期时间	4ns	80ns
高速缓冲存贮器容量	32K字节	32K字节
高速缓冲存贮器取数时间	4ns	80ns
主存贮器容量	16M字节	6M字节
主存贮器取器时间	20ns	400ns
最大I/O数据率	360Mb/s	3Mb/s

超导电子技术尚处于方兴未艾的阶段，它的高性能对人们已有极大的吸引力，但可靠性问题将是一个急待解决的重大问题。器件需在4K的低温下工作，由于多层薄膜结构的热膨胀系数各不相同，经受不了从低温到室温的多次循环。利用Pb-In-Au合金代替纯Pb可提高薄膜热稳定性，合金薄膜可循环500次不致损坏。加强超导薄膜的基础研究，进一步提高可靠性，将决定着超导电子技术的未来。

二、传感器件

1. 半导体力敏器件

半导体力敏器件是将压力信号转变为电信号的电子元器件。1958年，美国贝尔实验室研制出半导体力敏电阻，并于1960年商品化。它是利用半导体单晶所具有的压阻效应制成的，也称为分立式半导体应变片。这种分立式半导体应变片制成的力敏传感器，称为第一代半导体力敏传感器。70年代初期，美国、荷兰等国利用硅的压阻效应和集成电路技术，先后制成第二代半导体力敏传感器，即：集成电路力敏电阻全桥的微型力敏传感器。80年代初，美国库利特公司已生产第三代力敏传感器（把讯号处理电路同硅力敏电阻全桥实现单片集成）。第四代力敏传感器产品是具有自动测量和判断功能的“智能半导体力敏传感器”。

半导体力敏器件的分类及主要材料，由表1-10列出。

簧片式半导体力敏传感器是近年来国外出现的新结构。这种结构是将硅应变片做成簧片式。簧片力敏传感器的优点是灵敏度高，可改善线性和滞后等性能。