

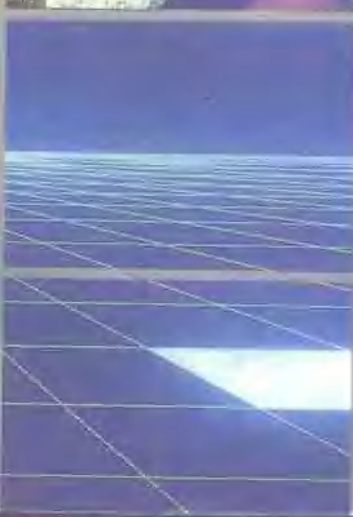
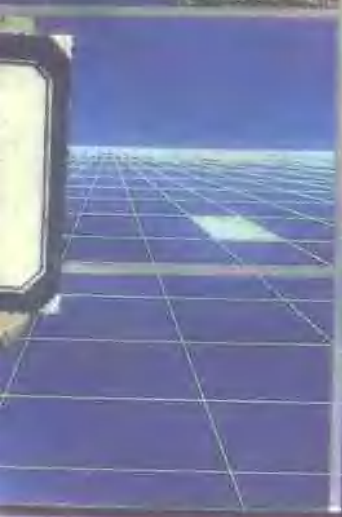


现代高技术丛书

微电子技术

中国科学技术协会主编

上海科学技术出版社



中国科学技术协会主编



现代高技术丛书



王守觉等 编著

微电子技术

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书较全面地介绍了微电子这一高新技术。内容包括微电子学的基本原理、集成电路的微细图形加工技术、微电子工艺技术、微电子技术在各领域的应用及其发展前景。

本书内容充实，文字深入浅出，图文并茂，可供具有中等文化程度的学生、教师及广大干部阅读。

2601/32

现代高技术丛书

微 电 子 技 术

中国科学技术协会主编

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所经销 上海市印刷三厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 6.875 插页 4 字数 179,000

1994年12月第1版 1994年12月第1次印刷

印数 1—3,000

ISBN 7-5323-3352-3/TN·62

定价：10.60元

(沪)新登字108号

现代高技术丛书编审委员会

主任：朱光亚

副主任：高潮 闵桂荣

编委(以姓氏笔画为序)：

王守觉	王希季	王国文	邓寿鹏	刘化樵
刘成彦	刘胜俊	江东亮	孙延军	孙毓彦
朱光亚	闵桂荣	李士	杨沛霆	何国祥
张晶	陈伯镛	陈树楷	陈章良	武明珠
赵文彦	胡成春	胡英	钟义信	高潮
郭景坤	顾孝诚	戴绪愚		

序 言

1992年10月召开的党的十四大，以邓小平同志建设有中国特色社会主义的理论为指导，确立了建立社会主义市场经济体制的目标。会议指出社会主义的根本任务是发展生产力，现阶段必须以经济建设为中心，加快改革开放和现代化建设步伐，才能推动社会全面进步。科学技术是第一生产力，经济建设必须依靠科技进步和劳动者素质的提高。现代科技突飞猛进，社会主义市场经济不断发展，我们不懂得、不熟悉的东西很多。因此全党同志不仅要抓紧学习政治、经济和先进经营管理，还要学习现代科学文化。

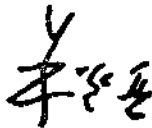
由中国科学技术协会组织编辑、上海科学技术出版社负责出版的《现代高技术丛书》，就是在1992年初小平同志视察南方发表重要讲话，举国上下学习讲话精神、加快改革开放和建设步伐的情况下开始筹划的。经过一年多的努力，现在开始与读者见面了。这套丛书是以高技术的若干领域为主要内容，请国内在这些领域中卓有成就的专家学者撰写汇编而成的，面向广大干部和非专业领域的科技工作者，是一套深入浅出的高级科普读物，重点是为各级领导干部学习高技术知识服务。

什么是高技术呢？需要指出的是，早在60年代这一名词就已在国外出现，但直到现在，对它的含义和范围，大家的认识仍有差异。一般认为，高技术是指以最新的科学发现创造为基础、具有重要应用价值的技术群。正是由于近半个世纪来科学技术日新月异的发展，高技术的内涵和范围也在不断发展和深化。50年代我国制定的《1956—1967年科学技术发展远景规划纲要》，被列在12项重点任务前列的原子能技术、喷气与火箭技术、半导体技术、电子计算机技术和自动控制技术这5项技术群，就属于这种范畴，当时在我国称之为尖端技术。80年代我国开始引入高技术这一名词，到1986年初制定《高技术研究发展计划纲要》，被评选列入的7个技

术群是生物技术、航天技术、信息技术、激光技术、自动化技术、新能源技术和新材料技术。这一事例不仅说明我们应动态地理解高技术这一概念，而且要认识到，高技术代表着科学技术发展的前沿，代表科学技术在社会进步和经济发展中的巨大力量，对增强一个国家的综合国力起着重要作用。

既然高技术是以最新的科学发现与创造为基础的，需要指出的另一点是，发展高技术、尤其是要实现其产业化，还应十分注意其必须具备的条件，包括掌握有关科学技术知识的人才、研究开发工作所必需的先进仪器装备与大量资金的投入、具有良好素质的工人队伍、大批生产必须具有的经济规模、工艺装备的不断更新需求以及相关高技术的配套发展等等。因此，既要积极进取，又要有敏锐的市场意识，把握机遇，善于经营。

前不久，江泽民总书记在会见全国科技工作会议代表时指出，要进一步确立和贯彻邓小平同志关于科学技术是第一生产力的伟大战略思想，加速科技进步，为90年代乃至下个世纪经济、社会发展提供强大动力。并再一次强调，要在干部特别是领导干部中普及现代科学技术知识。《现代高技术丛书》的及时出版，让更多的人能从中了解高技术的内涵、现状和发展趋势，将是十分有益的。展望世纪之交科学技术的发展，当然还应包括自然科学、技术科学的基础性研究以及全球生态环境变化与影响等方面的深入浅出评述和预测。更全面地介绍与普及现代科学技术知识，为增强全社会的科技意识，各级领导加强对科技工作的领导，把科学技术切实放在优先发展的战略地位，还需要科技界同志们继续努力。



1993年6月3日

前 言

近 30 年来电子技术取得了飞速的发展。它渗入到人们的工作、生活以及一切生产活动之中。它已成了现代化生产与现代化生活的主要支柱。先进的家用电器给你带来现代化的生活享受。实时的卫星转播技术使你能在家中看到了当时正在几万里以外进行的运动比赛。程控交换机和微波与光纤通讯使你在几秒钟内就可与生活在地球另一面的亲友们通话。当你坐在工厂办公室里的时候,可以随时看到车间的生产情况,以及当前和过去的一切有关生产的统计资料。在无人操作的车间里,机器人正在按照计算机预先设定的程序有条不紊地进行着生产。这一切现代化的生活与生产都来源于一项关键性的技术,那就是微电子技术。它把成千上万甚至上亿个元器件的复杂线路,都制作在小小的一块半导体硅片上;使在很小的体积内,实现简直难于想像的复杂功能,使人们的生活和生产,产生了根本的变化。

微电子技术把一个相当规模电子线路或部件,甚至是一个整机或系统,全部设计制作集成在一小块硅片上。因而它涉及到半导体器件原理、微电子有关的各种工艺、电子线路与系统的设计以及计算机辅助设计、测试等等,是一门内容非常宽广的学科。为了在本书有限的篇幅里能深入浅出地兼顾其广度与深度,使不同的读者对象都能对它感到兴趣,本书写作的宗旨要求是:“外行看了有兴趣,内行看了有收获。”

本书第二章全部与第三章前半部分是专业性较强的工艺介绍,对于非专业人员可以跳过或只作大体的浏览。

本书自第三章后半部分 3、4 节开始到本书的终了共有三章半,但篇幅不长,而内容涉及的面却非常宽,很适合对微电子感兴

趣的各方面领导干部、科技人员、教师以及有一定文化的工人、学生阅读。

参加本书编写工作的还有电子科技大学陈星弼教授、中国科学院微电子中心陈宝钦教授、中国科学院软件实验室马佐臣高工、薄建国高工、中国科学院半导体所梁骏吾教授、闻瑞梅教授、李远镜教授、刘忠立教授、宋振华高工、虞嘉峰高工、石寅高工和冯宏娟高工。此外并得到了陈名优高工和张奇、魏允同志的帮助，进行了计算机的打印和全部校对工作。在此向他们致谢。

编著者

目 录

第一章 微电子发展的技术基础与历史背景	1
一、半导体导电理论简介.....	1
二、半导体晶体管.....	9
三、微电子的工艺基础——硅平面工艺与硅平面型晶体管.....	16
四、MOS(金属—氧化物—半导体)晶体管.....	24
五、大规模集成电路及其集成度的提高.....	31
第二章 集成度提高的核心技术——微细图形加工技术	33
一、光刻技术.....	36
二、光掩模制作技术.....	46
三、遮蔽式复印曝光技术.....	60
四、光学投影成像曝光技术及 DSW 技术.....	64
五、高能束投影曝光技术.....	69
六、微细刻蚀技术.....	78
七、提高光刻分辨率及精度的新方向.....	83
第三章 微电子发展中几项重要工艺与技术问题	101
一、微电子中的掺杂技术.....	101
二、晶体生长技术在微电子中的应用.....	114
三、表面薄膜生成技术.....	125
四、VLSI 的 CAD 和 CAT.....	136
五、微电子与超纯水和化学试剂.....	141
六、微电子工艺环境的净化要求与生产自动化问题.....	150
第四章 微电子技术的工业化成就与前景	154
一、通用数字与模拟集成电路.....	154

二、计算机与系统的集成化·····	160
三、数字信号处理与高速运算的集成化实现·····	166
四、专用集成电路 ASIC·····	168
五、建筑在微电子技术基础上的电力电子器件及其节能省 材的作用·····	176
第五章 微电子技术在线路与应用方面的新领域·····	184
一、从二值逻辑谈到多值逻辑·····	185
二、模糊逻辑和连续值逻辑电路及其应用·····	188
三、微电子技术应用新领域——人工神经网络·····	200
第六章 发展我国微电子工业的探讨·····	206
一、微电子技术的特点及其与其他学科的关系·····	206
二、我国发展微电子中的某些问题·····	207

第一章 微电子发展的技术 基础与历史背景

微电子技术发展已经使近 30 年来在工业生产、国防科技、交通通信、经营管理、办公室的工作方式以及人民生活的每一个角落都发生了极大的变化。给朋友寄一张会响的音乐贺年卡，给孩子买一个会笑的不倒翁、会哭的洋娃娃、会发各种声响的手枪，早已是轻而易举的事。但你可知道，在不到半个世纪以前，这些事都是难以办到的。在卖菜的自由市场，从农村来的菜农，也往往会拿出一个很小的袖珍计算器，来算一下几斤几两菜应该是多少钱。你能否想象，要实现同样的计算功能，在 40 年代末半导体晶体管发明以前，用的电子管计算机，却是有几个大衣柜大小，占用整个房间而且要用上许多通风风扇冷却的大设备。当时人们计算烦琐的加减乘除往往使用机械式计算机。这种电动的机械式计算机虽然计算速度和功能都比现在最简单的袖珍计算器要差得多，而且重得一个人难以抬动，工作时噪声震耳，但它却是当时办公室和实验室中最先进的计算工具，价格比一架最好的摩托车还贵。科学技术这么大的变化不可能是一朝一夕得来的，现代微电子技术的伟大成就它的基础来源于 40 年代对半导体导电理论的深入认识，40 年代末半导体晶体管的发明、50 年代末硅平面型工艺的发展与成熟以及 60 年代耗能极小的 MOS 场效应器件走向稳定可靠等一系列微电子技术的重要基础。因此，在介绍现代微电子技术以前先简单回顾一下这些重要的发展基础与技术背景是十分必要的。

一、半导体导电理论简介

微电子技术是在硅半导体器件及相关的精细加工技术基础上

发展起来的，因而我们按微电子技术发展的历史步骤先介绍半导体及有关器件。

生活中“半导体”这一词似乎并不陌生，经常可以听到有人把袖珍收音机称为“半导体”。的确收音机的微小型化是半导体器件应用中一项令人瞩目的成就。但把袖珍收音机称为“半导体”则显然并不确切。“半导体”顾名思义是指一类介于像金属这样的导体，和玻璃、塑料之类的绝缘体之间的材料。这类材料中最重要的是周期表中四族元素硅以及锗，它们是微电子技术的支撑材料。还有一些氧化物、硫化物和三、五族化合物，像镓砷(GaAs)、铟磷(InP)、镓铝砷(GaAlAs)等。

经常用电阻率来判断物质的导电性能，导体的电阻率一般小于 10^{-4} 欧·厘米，绝缘体的电阻率在 10^9 欧·厘米以上，而半导体的电阻率通常在 $10^{-8} \sim 10^5$ 欧·厘米之间。

半导体的电阻率还跟材料内微量的杂质含量、温度、光照、磁场等各种因素有密切的关系。例如室温下纯硅的电阻率为 2.3×10^5 欧·厘米，如果掺入万分之一的磷，电阻率降低为 0.14 欧·厘米。半导体的这种特异性能有别于导体和绝缘体，则可从其结构来说明。

1. 固体中的电子状态

一种物质其导电能力的大小，主要取决于该物质能提供可移动的电荷数的多少。多数金属具有良好的导电性质，金属的特点是其构成原子最外层的价电子受到原子芯体的约束力很小，价电子可以自由地在金属中任何地方运动，成为“可移动的电荷”，大量的这种自由电子使得金属成为良导体。

典型的半导体材料像四族元素硅和锗，它们的原子中都有 4 个最外层价电子，形成晶体时每个原子和它相邻的四个原子共用各自的 4 个外层电子，使每个原子的最外层电子数都成为 8 个的稳定状态，半导体元素中电子的这种共有化使原子芯体对价电子的束缚比金属中要紧得多，纯净半导体中自由电子数目就很少，而在绝对零度下则根本没有可导电的自由电子。而在绝缘体中价电

子在原子间形成牢固的键,这些键需要极大的能量才能打破,于是通常没有可参加导电的自由电子。

以上关于固体导电的说明还可用能带模型来进一步说明。

量子力学的不相容原理表明原子内的电子不能在同一时刻占有同一能级,同一能级上最多有两个自旋相反的电子。当大量原子按一定规律和周期构成晶体时,原子间距离接近,价电子受相邻原子作用力影响加强,它们并不单是围绕某一个原子核运动,而可能在更广泛的范围内运动。这时的每个电子应当是在晶体的一个能级上,能级的填充还应当遵守不相容原理;至多两个电子(自旋相反)可占据每个能级,这样对晶体中大量的电子来说显然它们的能级间隔要比单个原子时小得多。例如原子中能级间隔典型值为几个电子伏而在金属中能级间隔可小于 10^{-28} 电子伏,这样小的间隔以致可忽略不计把它们分裂的能级看成连成一片的能带。图 1-1 表示大量原子构成晶体时原子能级成为晶体的能带。

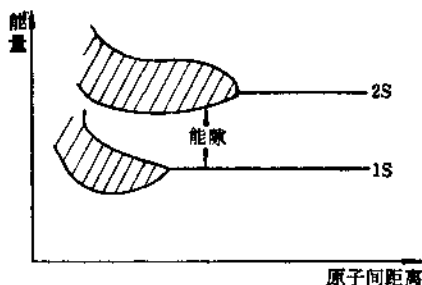


图 1-1 晶体构成时原子间距缩小,能级过渡为能带的示意图

被电子填满的能带称满带,未被电子填满的能带称导带。价电子所对应的能带称价带。半导体和绝缘体中的价带都是填满电子的满带。导带和满带之间存在着能隙,因为不允许电子具有对应能隙处的能量。

导体、半导体和绝缘体的能带图见图 1-2,注意满带中虽然充满电子但对导电并无贡献,因为满带对应的是受原子核束缚的电

子,不能自由运动,而只有进入导带的电子是脱离了束缚的自由电子,才对导电有贡献。

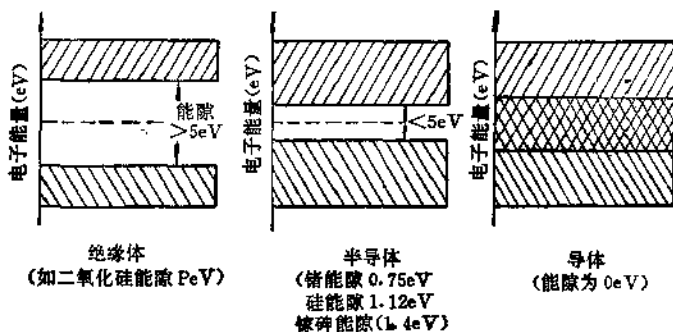


图 1-2 导体、半导体、绝缘体的能带图

导体中的价带和导带是重叠的,它们之间没有能隙。价电子对应的价带只是部分被电子填充,部分是空的,价电子跟自由电子一样可在晶体中自由运动。

半导体价带填满了电子,在价带和导带之间有一个能量不大的能隙,在室温下就会有一些电子从价带跳到导带,导带上的电子在外电场作用下就会导电。随着温度升高,半导体中激发到导带的电子增多,电导率就增加。但是半导体的价带和导带间的能隙存在使被激发到导带上的电子远少于导体中的自由电子数,所以其电导率要比金属这类导体小很多。

绝缘体价带上也存在着大量电子,但自价带到导带的能隙很大,价带上的电子很难被激发到导带上去(价电子被紧束缚),导带上没有电子,绝缘体不导电。

2. 半导体中的载流子——电子与空穴

典型的半导体元素像锗和硅是以所谓共价键的方式结合成晶体的,即各原子共用其外层电子。图 1-3 表示四价半导体元素锗或硅的共价结构。图上每一个原子画成两部分,最外层的价电子用小黑点表示,价电子以外的内层电子和原子核用一个较大的圆圈来表示,并把这一圆圈称为原子芯体。每个硅原子跟它周围 4

个原子共有各自的 4 个价电子，每个原子的最外层电子数经共有后都成为 8 个这种电子壳层的稳定形式。这种以共有电子方式结合的晶体称共价键晶体，半导体都是以这种键结合的。

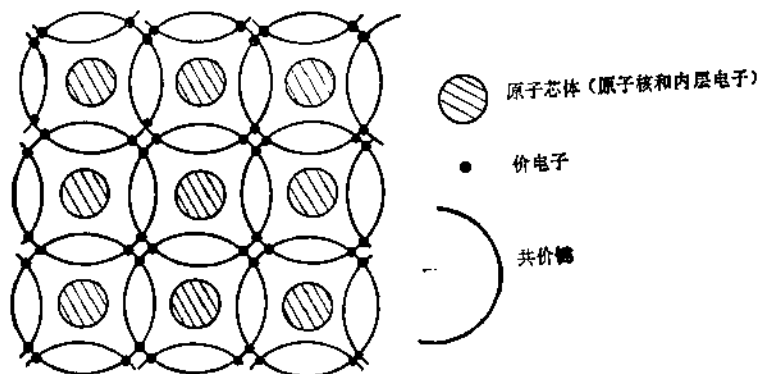


图 1-3 四价半导体元素的共价结构平面示意图

实际材料中原子排列成三维图案，每个原子同周围 4 个原子共价键合。

如果所有的价电子都像图 1-3 那样处在共有状态，那么硅晶体中没有自由电子，这相当于纯净半导体在绝对零度时的情况。在室温下热运动能使不少电子脱离共有化成为自由电子，如图 1-4。所需的最低能量实际上就是价带到导带之间的能隙宽度，对于硅为 1.12 电子伏，锗则为 0.75 电子伏，当一个电子受激发成为自由电子时，共有电子出现一个空缺，这一空缺称空穴。空穴处缺少一个负电荷，“少负”的实际效果是“正”，也即空穴可以看成是一个电量跟电子相等的正电荷。导电电子和空穴在受激时是成对地产生的，价电子受激后成自由电子，空穴也并不是固定的，相邻处的电子会跑过来填充它，电子填充空穴的运动，可以看成空穴的反向运动，就像液体里的气泡，液体的运动可用气泡的反向运动来描述一样。这样半导体内有两种“粒子”起导电作用，即带负电的自由电子，和带正电的空穴，电子和空穴的带电量相等，符号相反，半导体内起

导电作用的电子和空穴统称载流子。

以上谈到的都指纯净半导体，习惯上称本征半导体。本征半导体由于热激发产生电子、空穴对对导电有贡献，当然也会有相反的过程即已受激的导带电子放出能量后跳回价带，使一个电子空穴对消失，这一现象称为复合。在一定温度下单位时间内生成的电子空穴数和复合掉的电子空穴数相等，这时半导体内的导电电子和空穴维持其一定的浓度，称为平衡载流子浓度。温度变化电子空穴浓度随之变化到新的平衡值。半导体中温度增加，受激的电子空穴数增多，电导率增高，这是和金属完全不同的。

跟热能可激发电子空穴对一样，给半导体以光能，只要能量足以克服能隙值，同样也可产生电子空穴对，使半导体的电导率增加。

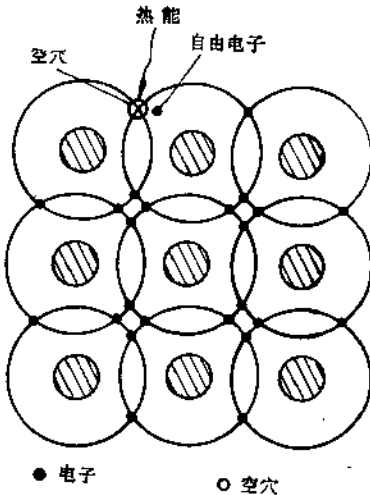


图 1-4 室温下自由电子的形成

本征半导体的电导率取决于热平衡时导电载流子的浓度，显然这一浓度除了跟温度、光照等外部条件有关外，还跟材料本身的能隙宽度有关，如室温下锗中本征载流子浓度要比硅中高上千倍。

3. 杂质在半导体中的作用与半导体的导电类型

完全纯净的本征半导体，实际上很难得到，半导体材料尽管以各种方法进行提纯，难免还存在着少量杂质，微量杂质往往对半导体性质起着重要的影响。半导体器件制造中经常要对材料进行有选择的掺杂来调整导电能力和形成各种器件。

微电子术中常用的硅材料经常用三族或五族元素掺杂来调整其导电状态。当向硅中掺入五族元素例如磷时的情况如图 1-5

所示。硅原子最外层有 4 个价电子和周围其它 4 个原子共有，形成共价键，使每个硅原子的最外壳层呈 8 个价电子的稳态。如果一个磷原子掺入硅中，取代原来晶体中硅原子位置。当它与周围硅原子形成共价键时，磷原子最外层电子有 5 个，而只需要 4 个电子参与共有化，多出的一个价电子就很容易脱离原子总体的束缚，进入导带成为一个导电电子。五族元素在硅中有施予电子的作用，因而把五族元素称硅中施主杂质或施主。施主杂质为半导体提供的导电载流子是带负电的电子，因而施主杂质也称 N 型杂质(N 是英文 Negative 意为负的起首字母)，施主杂质起主导作用的半导体则称 N 型半导体。其他五族元素像砷、锑、铋等在硅中也能起跟磷一样的施主作用。

本征激发时同时产生电子空穴对，而硅中掺入施主杂质只产生导电电子，如磷原子失去一个电子后变为一个带正电的离子，不会像共价键缺失电子后生成空穴，正离子只能在晶格位置上，不能自由移动，不是半导体内的导电载流子。

硅中掺入五价杂质的最大浓度取决于这一杂质在硅内的最大固溶度，像磷在硅内的浓度可以高达 10^{20} 个原子/厘米³，也就是说掺磷的硅有可能提供 10^{20} 个电子/厘米³。而常温下硅本征载流子浓度仅为 10^{10} /厘米³，因而掺入半导体的施主杂质所提供的自由电子会对半导体电导起主要作用，这种因掺入施主杂质后主要由电子导电的半导体材料称 N 型半导体。

施主杂质中不参加共价键的电子所受原子芯体的束缚力很小，只要很小的能量(如磷原子 0.045 电子伏)就可激发到导带上去，能带图中把杂质电离能也画上去后如图 1-6 所示。图中能隙中心以上各线代表相应杂质距导带底的能量，这些杂质是施主杂质。能隙中心以下各线代表相应杂质距价带顶的能量，这些杂质是受主杂质。相应的能级称杂质能级，它们到导带或价带的间隙要比半导体材料的能隙小得多，在室温下几乎全部电离。

如果在硅中掺入三族原子，如硼原子，当硼原子取代共价键上的硅原子后，同邻近原子共价结合时就缺少一个价电子，会从附近