

高等学校教材

半导体器件概论

李卫 吴涓涓 李印增 合编



北京理工大学出版社

7
13

半导体器件概论

李 卫 吴涓涓 李印增 合编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本教材为半导体器件物理的入门书，内容包括半导体物理基础、P-N结、晶体管（双极型及单极型）、集成电路简介、平面工艺简介，以及其他半导体器件简介（选学内容）。全书重点为P-N结及晶体管，用较多的篇幅讨论了它们的物理基础，比较详细地推导了它们的特性表示式。学习本教材的起点为工科普通物理及高等数学。本教材适用于工科电类各专业，大体需32—40学时讲完，按各专业要求不同，内容可做适当取舍。

半 导 体 器 件 概 论

李 卫 吴涓涓 李印增 合编

*

北京理工大学出版社出版
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京理工大学出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 10.75印张 262千字
1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷
ISBN 7-81013-251-2/O·43
印数：1—1800册 定价：2.20元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲议中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由《电子材料与固体器件》教材编审委员会《半导体物理与器件》编审小组组织征稿、评选、推荐出版的。责任编辑王敬义。

本教材由北京理工大学李卫、吴涓涓、李印增合编,哈尔滨工业大学王贵华担任主审。

本课程的参考学时为32~40学时,其主要内容为正文九章,并附有补充材料四部分。正文中以第四章P-N结为中心,较为详细地讨论了扩散模型及电流-电压关系。第一、二、三章介绍半导体共价模型及能带模型,载流子导电机制及浓度计算,为讨论P-N结提供物理基础;第五章简要介绍金属-半导体接触的整流特性及欧姆特性;第六、七章讨论双极型及单极型晶体管的基本工作原理、特性曲线和参数;第八、九章简单介绍集成电路和半导体工艺。补充材料简要介绍除晶体管以外的四种类型——功率、微波、光电、敏感——半导体器件,目的是拓宽学生眼界以适应不同的需要。使用本教材时请注意,这是为工科电子类各专业需要编写的,起点是工科普通物理和高等数学,宜于在大学本科二年级时开设本课程。对半导体专业可以作为专业入门教材,教材中半导体物理基础及P-N结等内容能够同专业课程(如半导体物理、晶体管原理)衔接。对于以路和场为主的专业,本教材可作为《电子线路》课前面的器件介绍,采用本教材的好处是知识面拓宽,物理基础加深。具体讲授内容由教师掌握,特别是带*号的章节。

本教材由李卫编写第一、二、三、四、五、七章及补充材料,吴涓涓编写第八、九章,李印增编写第六章,并最后整理全稿。参加审阅工作的还有唐茂成同志,以及《半导体物理与器件》编审小组全体成员,他们都对本书提出许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,另外,编写此教材所预期达到的目的还有待实践考验,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

DABRP/04

目 录

第一章 绪 论

§1-1 什么是半导体	(1)
§1-2 常见的半导体材料及其主要用途	(2)
§1-3 认识和应用半导体的历史	(3)
§1-4 半导体材料的提纯与单晶生长	(7)
建议阅读材料	(9)

第二章 半导体的模型

§2-1 半导体的共价结合	(10)
§2-2 电子与空穴 本征激发	(12)
§2-3 杂质的作用	(13)
§2-4 能带的形成	(14)
§2-5 能带模型中的电子与空穴	(16)
§2-6 杂质能级	(18)
§2-7 复合中心	(20)
§2-8 多子、少子浓度间的重要关系	(20)
§2-9 金属、半导体、绝缘体的区别	(22)
练习题与思考题	(22)
建议阅读材料	(23)

第三章 半导体中的载流子

§3-1 漂移电流	(24)
§3-2 迁移率	(25)
§3-3 电阻率和电导率	(25)
§3-4 影响迁移率的因素	(27)
§3-5 迁移率与电场强度的关系	(30)
§3-6 载流子的扩散与扩散电流	(30)
§3-7 爱因斯坦关系	(31)
§3-8 漂移与扩散同时存在的情形	(32)
§3-9 计算载流子浓度的基本方法	(33)
§3-10 函数 $S(E)$ 和 $f(E)$	(34)
§3-11 电子浓度与空穴浓度的计算	(37)
§3-12 费米能级的位置	(39)
§3-13 关于费米能级的若干说明	(43)
练习题与思考题	(44)
建议阅读材料	(45)

第四章 P-N 结

§4-1 P-N 结的电流-电压关系及其定性解释	(46)
--------------------------	------

§ 4-2	P-N 结的能带图及内建电势差的计算	(48)
§ 4-3	P-N 结的电流-电压关系的定量分析	(49)
§ 4-4	少子的复合与扩散	(52)
§ 4-5	P-N 结的扩散电流	(56)
§ 4-6	对理想情况的几点修正	(59)
§ 4-7	P-N 结的电容效应	(61)
§ 4-8	P-N 结的击穿	(67)
	练习题与思考题	(70)
	建议阅读材料	(72)
附录一	关于小注入条件与基本假设①的关系	(72)
附录二	对非平衡状态下仍使用玻耳兹曼分布函数的说明	(73)

第五章 金属与半导体的接触

§ 5-1	金-半接触的接触电势差——肖特基势垒的形成	(75)
§ 5-2	金-半接触的电流特性	(78)
* § 5-3	金-半接触的少子注入	(80)
§ 5-4	欧姆接触	(81)
	练习题与思考题	(82)
	建议阅读材料	(82)

第六章 结型晶体管

§ 6-1	晶体管的描述	(83)
§ 6-2	与晶体管内部载流子的传输过程有关的几个参数	(85)
§ 6-3	理想晶体管各端电流与外加极间电压的关系	(88)
* § 6-4	Ebers-Moll 模型	(94)
§ 6-5	晶体管的特性曲线	(96)
* § 6-6	晶体管的运用特性	(100)
	练习题与思考题	(109)
	建议阅读材料	(109)

第七章 场效应晶体管

§ 7-1	结型场效应晶体管的基本结构与工作原理	(110)
§ 7-2	源-漏间电流-电压关系的定性说明	(111)
§ 7-3	结型场效应晶体管的特性曲线族与参数	(114)
§ 7-4	MIS 结构中的电场效应——电场对半导体表面的影响	(115)
§ 7-5	电场效应的应用——MOS 场效应晶体管工作原理的说明	(119)
§ 7-6	MOS 场效应晶体管的特性及参数	(124)
§ 7-7	增强型与耗尽型 MOS 场效应晶体管	(123)
	练习题与思考题	(124)
	建议阅读材料	(125)

第八章 半导体集成电路

§ 8-1	双极型逻辑集成电路	(126)
* § 8-2	集成电路的设计	(128)
§ 8-3	MOS 集成电路	(130)

建议阅读材料.....	(132)
附录 肖特基势垒二极管.....	(132)

*第九章 平面工艺简介

§9-1 平面工艺简介.....	(133)
§9-2 TTL 电路的典型工艺流程.....	(136)
§9-3 MOS 集成电路的工艺流程.....	(137)
建议阅读材料.....	(138)

*补充材料 其他半导体器件简介

第一部分 功率器件

§1 可控硅整流器.....	(140)
§2 可控硅整流器的工作原理.....	(141)
§3 可控硅整流器应用说明.....	(142)
§4 单结晶体管.....	(143)

第二部分 微波器件

§1 雪崩二极管.....	(146)
§2 体效应二极管.....	(148)

第三部分 光电器件

§1 光电导体.....	(153)
§2 光照下的 P-N 结.....	(154)
§3 半导体发光现象.....	(157)

第四部分 敏感器件

§1 磁敏器件.....	(158)
§2 热敏器件.....	(159)
§3 力敏器件.....	(160)
§4 气敏器件.....	(160)

第一章 绪 论

作为入门,在绪论中介绍:半导体有哪些重要特性;常见的半导体材料及其主要用途;认识和应用半导体的历史和半导体材料的提纯与单晶生长。

§ 1-1 什么是半导体

从半导体这个名称中的“半”字就可以想到,这种物质的“导电能力介于导体与绝缘体之间”。的确,在室温下,金属导体的电阻率的数量级约为 $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$;好的绝缘材料的电阻率可以大于 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$;半导体的电阻率则在 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 到 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。然而,只凭电阻率的大小不足以说明何以半导体现在有那样广泛的应用,何以对电子技术的发展起那样大的作用。所以,应当再进一步考查半导体有哪些独特的性质,这样才能对“什么是半导体”,有一个比较全面的回答。

归纳起来,半导体大致有这样一些独特的性质,它们的应用无不与这些性质有关。

1. 一般说来,半导体的电阻值具有负的温度系数。半导体的电阻值随温度上升而下降,这是与金属相反的。金属的电阻值具有正的温度系数——随温度升高阻值加大。

2. 金属中输运电流的载流子是电子,而半导体中承担输运电流的载流子却有两种——电子和空穴。电子带负电,电量为 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$,我们用符号 $-q$ 表示;空穴则带正电,电量与电子所带电量大小一样,用 $+q$ 代表(有时为省事,十号常略去不写)。

电子和空穴是半导体体内参与导电的两种带电粒子,它们的数量有相同的情况,也有不相同的情况。如果半导体单位体积中的电子与空穴的数量(称为电子与空穴的“浓度”)是相同的,则称之为“本征半导体”;如果电子的浓度大于空穴的浓度,导电以电子为主,则称之为“N型半导体”;如果空穴的浓度大于电子的浓度,导电以空穴为主,则称之为“P型半导体”。造成这种不同情况的原因,是由于在半导体内掺入了不同种类的杂质。以常见的半导体硅为例,如掺入Ⅲ族元素硼、铝、镓等,则形成P型半导体;如掺入V族元素磷、砷等,则形成N型半导体。

3. 半导体材料的电阻率对杂质极其敏感。某些杂质,不仅如上面所述,会改变半导体的导电类型,而且只要含极少量的杂质,就能显著地改变其电阻率。例如:半导体材料锗的纯度已经达到每 10^9 个锗原子中的杂质原子数少于1个,这时其室温下的电阻率可以达到约 $45 \Omega \cdot \text{cm}$ (或 $0.45 \Omega \cdot \text{m}$)^①,即达到所谓本征状态。如果在这样纯的锗中掺入V族元素锑,掺到每 2×10^8 个锗原子中有一个锑原子的程度,则室温下的电阻率将下降到约 $0.09 \Omega \cdot \text{cm}$,如换算为质量,这样的掺杂程度相当于每千克锗中含约有0.77 mg的锑。这就是说,1kg纯锗中掺入不到1mg的锑,却使电阻率下降为本征状态下数值的1/500!

① 按照我国规定,自1987年起采用国际单位制,电阻率的单位应当是欧姆·米($\Omega \cdot \text{m}$)。但象欧姆·厘米($\Omega \cdot \text{cm}$)这种单位,习惯上沿用已久,现在通行的许多常数表和手册上也尚未完全修订成国际制单位。所以教材中将两种单位并列,其他单位有类似情况也照这样做。

4. 半导体有比金属大得多的温差电效应。

5. 半导体具有光敏特性。半导体经适当波长的光照射时，其电阻率显著下降，这种现象常称为“光电导”。

6. 半导体与金属的接触，同种半导体的 N 型材料与 P 型材料形成的接触 (P-N 结)，以及异种半导体材料所形成的接触 (异质结)，所具有的非对称的导电特性 (整流特性) 和非线性的电流-电压关系 (非欧姆性的导电特性)，电场对半导体表面薄层内的电特性的明显影响等，这些现象正是构成绝大部分半导体器件所依靠的基础。实际上，对 P-N 结的讨论就是本课程的重点之一。

§ 1-2 常见的半导体材料及其主要用途

半导体材料的种类很多，用途也很广泛，为了简单明了，列表 1-1 来说明。

表 1-1

分 类	材 料	主 要 用 途
元 素 半 导 体	锗 Ge	二极管、三极管
	硅 Si	二极管、三极管、集成电路、太阳能电池
Ⅲ-V 族 化 合 物 半 导 体	砷化镓 GaAs	微波、光电器件、集成电路
	锑化铟 InSb	红外接收器件、霍尔器件
	磷化镓 GaP	发光二极管
Ⅱ-VI 族 化 合 物 半 导 体	硫化镉 CdS	光敏电阻、太阳能电池
	硫化锌 ZnS	荧光材料
		
Ⅳ-Ⅳ 族 化 合 物 半 导 体	碳化硅 SiC	高温器件
Ⅳ-VI 族 化 合 物 半 导 体	硫化铅 PbS	光敏电阻
		
Se-Te 化 合 物 半 导 体	碲化铋 Bi_2Te_3	温差电材料
	硒化铋 Bi_2Se_3	温差电材料
		

实际使用的半导体材料，当然不止表中所列的几种。表中只写出一些二元化合物，现在有些三元以至四元的化合物半导体，也受到极大的重视，如用于发光器件的镓砷磷 ($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$)，用于红外探测的碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)，用于激光器的镓铟砷磷 ($\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-x}\text{P}_x$)。

从材料的结构形式来看, 固体材料可分单晶、多晶、非晶三种形式(参见《普物》^① 209~210 页)。现用于制造二、三极管及集成电路的材料主要是单晶。

* § 1-3 认识和应用半导体的历史

现在大概不会再有人怀疑, 通过微型化、计算机化和机器人化, 社会的各个方面都会受到强烈的冲击, 最终将改变我们生活的面貌。然而, 这一切没有微电子学的充分发展是不可想象的。微电子学是这样一门科学, 它专门研究极小尺寸的电子器件, 特别是集成电路的设计、制造与使用。而没有对半导体的深入了解, 发展微电子学则是不可想象的。回顾一下历史就会看到, 从最早认识到半导体的某些特性开始, 到今天认识到半导体所处的重要地位, 已经过去一百多年了。

1837 年, 法拉第(M·Faraday)发表了他观察到硫化银的电阻随温度上升而下降的现象。这大概是第一次公开发表的, 有关半导体具有负的电阻温度系数这一性质的记录, 然而, 那时人们只知有电的导体和绝缘体, 还没有半导体这个概念。所以说, 法拉第观察到的现象, 是用后人的眼光看他的工作而得出的结论。

此后, 1873、1874 和 1877 诸年间, 有几项有关半导体的重要发现。一是英国人史密斯(Willoughby Smith)发现晶体硒在光照下电阻减少的光电导效应(或称“内光电效应”)。不久, 亚当斯(W·G·Adams)和戴(R·E·Day)证实了硒的光生伏打效应, 其时与发现硒元素的 1818 年, 已相隔五十多年了。

1874 年布劳恩(F·Braun)首先发现了硫化铅矿石(方铅矿)和硫化铁矿石(黄铁矿)的整流作用。在一块矿石晶体上做一个金属电极, 再在另一处用细金属丝与矿石形成“点”接触电极, 这样一个结构便能表现出两电极之间导电的不对称性(这个“点”必须经过耐心的试验来寻找), 即电流向一个方向流通, 较之相反方向流通来得容易。这样一个装置后来发展成在早期的无线电接收机中, 用于高频电流的检波, 即是所谓的晶体检波器。利用这种检波器做成的“矿石收音机”, 由于它不需要电源, 拆装容易, 直到三、四十年代, 仍为许多业余无线电爱好者所欢迎^②。实际上, 布劳恩系统地研究了很多物质的整流效应, 据说硒的整流作用也是他首先发现的, 但这一发现当时并未被人接受, 原因是别人重复不了他所观察到的现象, 从今天的眼光来看, 早期的半导体研究, 得不到重复性的结果, 是毫不奇怪的。我们现在理解了半导体的各种性质, 它们对晶体结构、纯度(而且, 这种纯度决非一般化学意义上的纯度)、表面处理等等都是极其敏感的。

在 20 世纪 30 年代, 付诸实用的半导体器件为数不多, 计有氧化亚铜整流器、硒整流器, 以及用这两种材料制造的光电池等, 当然还有晶体检波器。不过当时半导体晶体检波器, 已基本被真空二极管所代替, 一是由于真空管已能大量生产, 价格越来越便宜, 而更主要的是晶体检波器性能不够稳定(这用今天的眼光来看, 也是容易理解的)。然而到了二次世界大战前夕, 出现了转机, 由于雷达的发明, 需要有能够在比广播波段频率高得多的频率下工作的检波器。真空二极管因为极间电容太大, 不符合要求, 因而晶体检波器又重新受到

① 指《普通物理学》(1982 年修订本)程守洙 江之永编 人民教育出版社 下同。罗马数码指卷数, 如Ⅲ, 指第三卷。

② 黄铁矿石在中药店俗称“自然铜”, 当时很多少年无线电爱好者都喜欢用它, 来做一个“检波器”。

人们的重视。那时使用的半导体材料集中在硅上，二极管是厚度和直径均约为1mm的硅片（系由多晶硅锭切出），表面经抛光，然后用一直径约 10^{-2} mm的钨丝尖端压于硅片表面（灵敏点仍依靠人工寻找）制成，硅片的另一面及钨丝的另一端，即为二极管的两端。当时，人们已经懂得了对硅进行提纯，掺入微量元素（如硼），以及对硅片仔细地抛光、腐蚀等，可以使器件性能得到改善。尽管这些都是经验性质的，但确实为二次世界大战后对半导体的研究发展奠定了基础^①。

我们都知道，量子理论诞生于1900年，到了1925~1926年量子力学体系已基本建立。由此可使人们比较深入地和正确地描述固体内部微观粒子的运动，如晶格的振动、自由电子的运动等等。1928年，德国人索末菲（A. Sommerfeld）提出金属的自由电子模型。1931年英国人威尔逊（H. A. Wilson）提出半导体的能带模型。这里不可能更为详细地叙述固体理论的奠基工作，如果有兴趣，读者可以阅读那本1936年开始写作，出版于1940年的有关固体理论的经典著作——赛兹（F. Seitz）的《近代固体理论》，(Modern theory of Solids)，就会发现，今天在大学本科所讲授的固体能带论的基本内容，在这本书里已经都具备了。这说明在二次世界大战前夕，用来解释半导体诸多性质的模型已经建立起来了。在这同一时期，还有一项有关半导体的理论工作随之发展起来，这就是1938年及随后几年，由英国的莫特（N. F. Mott）、德国的肖特基（W. Schottky）和苏联的达维多夫（Б. Давидов）分别提出的半导体接触整流理论，在这些理论中，已经应用了半导体的能带模型。

对半导体研究和应用的大发展是在第二次世界大战之后。晶体三极管发明前，电子管在电子线路中占绝对统治地位，但是它的一系列缺点已经暴露，例如：各种电子管都需要灯丝，灯丝会产生大量的热，其寿命有限，因而影响了电路工作的可靠性。为此，1945年美国贝尔（Bell）实验室开展了一项计划，其中最重要的一个目标，就是研制一种固体放大器以代替电子管。1947年12月布拉顿（W. H. Brattain）和巴丁（J. Bardeen）发现在一片

锗晶体表面上，压上两个非常靠近的细金属丝（探针），使之成为与点接触式晶体检波器一样的两个点接触。当把这样一个装置的两个探针与锗之间，分别加上适当的直流偏压，即可构成一个放大装置，其示意图如图1-1所示。可以观察到“集电极”C的输出信号电压，大于

“发射极”E的输入信号电压（此处慎勿将信号电压与偏置电压相混淆，偏置电压即为EB、CB间的直流电压）。这正是计划中所要寻找

的东西，他们发明了第一支点接触式晶体三极管。虽然这种结构的晶体管当时已成为商品，但由于噪声大，稳定性差等缺点，不久即被性能比它优越的所谓“结型晶体管”所代替。

肖克莱（W. Shockley）于1949年发表了一篇著名文章《半导体P-N结及P-N结晶体管理论》。他第一次提出，用一种含有两个P-N结的结构，代替两个点接触的结构。其中包括的一个极其重要的概念是：正向偏置下的“P-N结”（一块完整的半导体单晶的两部分，分别为P型和N型，二者的交界面即称为P-N结）的“少子注入”。这是一篇理论

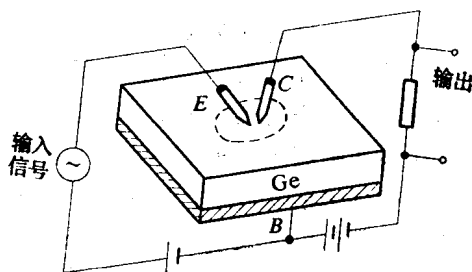


图 1-1

E 为发射极探针；C 为收集极（或集电极）探针；
B 为锗片下金属电极基极；C、E 探针间的虚线表示两探针之间的相互作用范围

^① 二次大战期间，另一项为后来的发展起了巨大影响的工作，是对半导体材料锗的研究。

性文章，从实验上证实肖克莱的设想是在 1951 年，即“结型晶体管”的问世。当时是在锗单晶的生长过程中，改变掺入的杂质形成的 P 型锗与 N 型锗相间的结构，从这样的单晶锗中切出一块，如图 1-2 所示的棒状物，分别加上电极，即构成结型晶体管。后来又发展了合金法、合金扩散法等制作晶体管的方法，最终形成的结构要求在同一块单晶材料中，形成 P、N、P 或 N、P、N 相间的三个区，其中包括两个 P-N 结，且要求两个结靠得极近。由于这一项发明，布拉顿、巴丁和肖克莱三人分享了 1956 年的诺贝尔奖金。

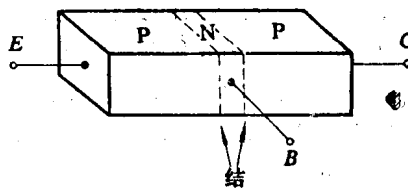


图 1-2

1958 年在晶体管制造技术领域出现了一个重大突破，即用“平面工艺”（第九章将作简单介绍）制造了硅扩散晶体管。其最重要的特点是利用二氧化硅（硅在高温氧气气氛中，即能在表面生成氧化层）作为“结”的保护层，“结”的周边完全被氧化层所复盖而不暴露在外。由于这一点才使晶体管的稳定性及可靠性得以改善，平面工艺使生产上的可重复性大为提高。正是基于这一项工艺上的突破，才使得半导体集成电路的设想于 1960 年成为现实，也即利用平面工艺把晶体管、二极管、电阻、电容以及它们之间的连线，全部制作在同一硅片之上。1961 年集成电路产品开始商品化，这就是我们现在所说的小规模集成电路（在每一片半导体基片上的元件数小于 100 个）。在进一步介绍集成电路的发展概况之前，让我们再看另一种固体放大器件——场效应晶体管。

场效应晶体管与前面介绍的结型晶体管工作原理完全不同。据认为这种场效应晶体管的最早设想，可以追溯到 1926~1928 年间一个叫做利连费尔（J. E. Lilienfeld）的专利。由于当时对半导体知识的不足，以及电子管正处于发展时期，对这种器件的研究不久就湮没无闻了。上面提到贝尔实验室为实现固体放大器，曾建立过一个研究计划，计划中便有一个如图 1-3 所示的设想。假如半导体薄片是 N 型的，由于附近的场电极（电极与半导体片之间是隔开一个小距离的）的作用，在靠近场电极的半导体表面，电子浓度加大。因为按照图中所画出的场电极的极性，电场将把 N 型半导体中的电子吸引到表面上来，增加了半导体表面薄层的电导率。假如整个半导体薄片足够薄，表面层电导的改变对整个薄片的电阻所起的影响将是很大的，即场电极上的电场能改变半导体薄片的电阻值，因而也就改变了半导体薄片回路中的电流。换言之，场电极能对半导体薄片回路起控制作用，“场效应”一词正来源于此。实际上，当时的实验结果表明，该效应比预期的结果小得多，为解释这种现象，引入半导体表面态的理论，即认为表面态屏蔽了电场对半导体的作用。后来也是由于平面工艺的发展，这种设想得以 MOS 场效应晶体管的形式实现了。MOS 即 Metal（金属）、Oxide（氧化物）、Semiconductor（半导体）三个英文词的第一个字母，它表示这种晶体管的基本结构是一种金属（如 Al）、氧化物（如 SiO_2 ）、半导体（如 Si）的三层结构。

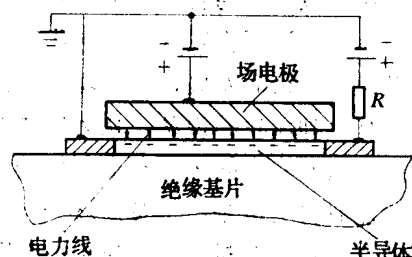


图 1-3

P-N 结理论和实践完成之后，1952 年肖克莱提出一种结型场效应晶体管。这是一种以改变半导体的导电通道的宽窄，改变其电阻的方式来工作的器件，其结构与上述利用绝缘层

上的场电极的 MOS 结构不同。这种结型场效应晶体管由于性能并不理想, 以及当时结型晶体管的快速发展, 因而该器件的研制进展不大。也是到了平面工艺出现之后, 结型场效应晶体管才成为一种实用的器件。另外, 在 50 年代还提出并成为商品的其他形式的场效应器件, 如 1958 年法国人泰兹耐尔 (S. Tszner) 提出的 “Tecntron” (丝棒状结型场效应晶体管) ①。目前, 场效应晶体管在某些集成电路中得到大量的应用, 可以说, 场效应晶体管和结型晶体管处于不相上下的地位。

现在回到集成电路。关于集成电路的许多技术进展在这里不作全面介绍, 只选择最容易想象的指标——一个芯片上的元件数——来说明它的进步情况。从 60 年代初期每片不足一百个元件, 发展到 70 年代中期出现每片上的门电路数大于一万个 (即电路元件数至少大于 3×10^4 个, 而一个芯片的面积只有几个平方毫米), 称为超大规模集成电路 (缩写为 VLSI)。正是由于集成程度的提高, 才可能出现将一个计算机的中央处理器 (计算机中控制指令的解释和执行的机构, 通常不包括主存储器) 的全部元件, 都制作在一片只有十几平方毫米的硅片上, 即是所谓的微处理器, 基于此微型计算机才能发展起来。具体地说, 微处理器的第一代出现于 1971 年, 型号 Intel 4004 集成度为每片 2200 个晶体管, 是一台 4 位微处理器; 到 1973 年, 使用了 MOS 技术的 Intel 8080 是一台 8 位微处理器, 集成度为每片 4800 支晶体管; 1978 年的 Intel 8086 集成度达到每片 2.9×10^4 支晶体管, 是一台 16 位的微处理器; 到 1981 年, iAPX432 已是 32 位微处理器, 每片晶体管数可达 10^5 个。十年内集成度提高了近百倍, 其结果就是使所谓 “中”、“小” 型计算机向微型化发展。实际上, 现在所谓 “计算机化” 的一个重要方面, 就是微型计算机在各个领域中的大量应用。目前, 一个芯片上元件数达到百万个的目标已经实现, 预计在 90 年代元件数可以达到一亿个, 在这样密集的情况下, 元件的尺寸必须小到半个微米 (0.5×10^{-6} cm) 以下。

在可以预见的将来, 进一步提高集成度将仍是集成技术的一个主要方向, 制造集成电路以硅为主的局面将被打破, 砷化镓器件正在崛起, 它在高速集成电路方面会胜过硅器件。可以说集成电路的发展, 将对现代社会产生巨大的影响。

有一种流行的说法, 认为以微电子技术为中心的新的一次技术革命已经开始了, 它完全可以与前面两次的工业革命相媲美, 其对社会的影响已见端倪, 更深远的意义也许还要等几年才能看得更清楚, 但是, 这一场大变革的出现已经是毋庸置疑的了。引起这场革命的中心因素之一是计算机——无论是巨型的还是微型的——发展的结果。然而, 计算机的发展是与关键性的硬件——大规模集成电路 (缩写为 LSI) 或超大规模集成电路的实现紧密联系在一起的, 在某种意义上说, 没有集成电路的发展, 就不可能有 “计算机化” 的到来。

引起这场革命的另一个重要的领域是通信技术。在这个领域中, 不仅集成电路同样起着重要的作用, 而且在微波通信, 以及光纤通信中, 半导体微波器件、光电子器件同样起了不可代替的作用, 它们在可见光、红外、毫米波、厘米波等波段的应用将越来越广泛, 以其小、轻、低功耗、可靠、长寿命、可集成化等优势, 而占据一个独特的地位。例如: 发明于 60 年代的体效应器件及渡越时间器件, 已成为当今的主要固体振荡源; 砷化镓金属-半导体接触场效应晶体管 (缩写为 GaAs MESFET) 的单片微波集成电路, 大量应用于卫星通信; 利用分子束外延技术研制的高电子迁移率晶体管 (简称 HEMT), 可望其截止频率超

① 此名称据科学出版社《半导体词典》(1983 年 1 月出版) 拼作 “Technotron”; 国防工业出版社《日英汉无线电技术辞典》(1971 年) 拼作 “Technetron”, 今按 S. Tszner 本人发表的文章, 仍拼为 “Tecntron”。

过 10^3 GHz。我们知道，石英光纤在 $1.3\mu\text{m}$ 波长下的传输损耗比同轴电缆小得多，但通信容量却大得多，这就是近年来发展的所谓长波长（相对于 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 波长）、长距离光纤通信的原因。然而，无论是长波长，还是短波长，光纤通信用的激光器是半导体激光器，接收器件也是半导体光电探测器。至于“光电集成”，现在的主要研究方向是针对光通信的。所谓光集成就是激光器（或发光二极管）、光电器件（探测、调制）以及电子电路一起集中在一个基片上，这更是半导体技术发挥其优势的地方。

如果把处理信息的计算机比作人的大脑，传送信息的通信系统比作人的神经系（大概人的神经网络的功能，要比通信网络复杂得多），那么类比于人的眼耳口鼻等感官，接受外界信息的系统就应当是敏感器件或传感器了。任何一种能对物理的或化学的变化产生响应的效应，原则上都可以被利用来制作传感器，在这方面可能还是半导体得天独厚，举凡热敏、湿敏、压（力）敏、压（电）敏、光敏、磁敏、离子敏、化学敏等等各种敏感元件，半导体材料都起主要作用。举个例子，利用多功能半导体离子及生化敏感探头配合上微机，在不到几分钟的时间内，完成人的血液分析，并把数据打印出来，已经不是神话了。

电力半导体器件已经进入了强电领域；半导体太阳能电池作为未来大规模能源之一，不断取得进展，试验性的兆瓦级的地面太阳能电站已经建成。

当然，还可以再举许多实例。但对半导体材料研究的发展，以及对半导体理化性质认识的深入过程等都未介绍。这确实是因为对于象半导体这样一个广阔的研究领域，即便是勾画出一幅极其简单的图象，只用这样一节内容来概括是很难做到的。然而，作为这节的结尾，我们想说一句话，信息社会的到来，半导体技术起着独特的作用。

§ 1-4 半导体材料的提纯与单晶生长

前面提到，半导体材料的导电类型和电阻率强烈地受到杂质的影响，要想把半导体的各种性能参数置于人们的控制之下，首先是把材料提纯到需要的程度，然后在可控制的条件下，人为地加以掺杂。另一方面，由于半导体结构上的不完整性，也会对半导体的性能有强烈的影响。因而，制造半导体器件绝大部分是使用半导体单晶。本节主要针对这两个方面的问题作些介绍。元素半导体锗、硅的提纯与单晶生长是半导体研究发展中的大事。事实上，前面提到的 P-N 结理论先于 P-N 结的实现，就与可控掺杂锗单晶的生长技术问题的解决紧密相关。

1. 区域提纯

我们知道，对于锗来说，杂质原子数小于锗原子数的十亿分之一，才能使其达到本征状态。这样高的纯度已非化学上所说的纯度可以比拟（所谓“光谱纯”，纯度才达到 $99.99\sim 99.999\%$ ，而对本征锗则要求达到 99.9999999% ，即通常说的九个九），因而必须发展一种特殊的提纯技术，对材料进行提纯，现在通用的方法之一是所谓“区域精炼”，或称“区域提纯”。

大家都知道一个现象，盐水结成冰后，冰中的盐含量比水中低，即当盐水凝固时，盐分大量留在液态水中，而很少留在固态水——冰中。这种现象通常用参量“分布系数”（或称“偏析系数”）来描述，用 k 表示。它的定义是：凝固在固体中的溶质浓度 C_s 与液体中的

溶质浓度 C_L 之比,

$$k = C_s / C_L$$

随不同情况 k 的数值, 可以小于 1, 也可以大于 1。象上面举的盐水, 对于溶剂水, 溶质盐的 k 值小于 1, 所以把盐水冻成冰, 实可达到提纯水的效果。

把这一原理应用于材料的提纯, 即是我们要介绍的“区域精炼”的方法。下面以锗的区域精炼为例来说明, 设想含有杂质的锗已结铸成棒状, 且设锗中杂质的 $k < 1$, 即杂质在熔融的锗中浓度, 要比凝固出来的锗中浓度为高。设法从锗锭的一端开始, 使其一部分熔化, 形成一个“熔区”, 如图 1-4(a) 所示。如果使熔区从右向左移动, 则将有一部分锗从熔区的右端凝固出来, 而熔区左端的锗进入熔化状态, 如图 1-4(b)。右端这部分新凝固出来的锗中, 杂质浓度将比熔区中的为少, 从而达到提纯效果。如果使熔区从头到尾移动一遍以至两遍三遍, 最终可将 $k < 1$ 的杂质驱赶到锗锭的尾部, 舍弃这部分, 其余部分便是高纯度锗了。假如锗中杂质是属于 $k > 1$ 一类, 则此类杂质将集中在从熔区中新凝固出来的锗中,

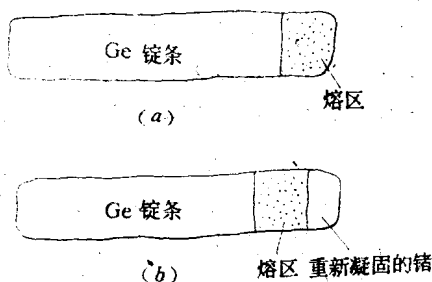


图 1-4

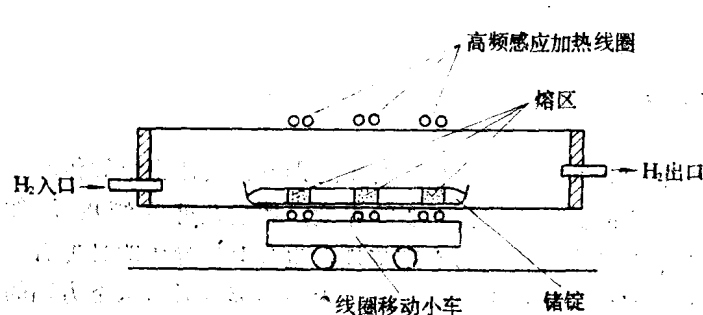


图 1-5

即图 1-4(b) 右端头部将集中 $k > 1$ 的杂质。当同时存在 $k < 1$ 和 $k > 1$ 的不同杂质时, 用移动熔区的方法提纯后, 杂质将浓集于锗锭两端, 中间部分是高纯锗。具体设备的示意图如图 1-5。形成熔区用高频感应方法, 即利用高频交变电磁场在锗中产生的涡流来加热, 使锗熔化。精炼过程中熔区不能移动太快, 只能取每小时十几厘米到二十几厘米的速度, 因此, 为提高效率常用多个熔区。多个熔区从头到尾经过锗锭一次, 可相当于单一熔区多次移过锗锭。区域精炼需在保护气氛中 (常采用 H_2 气) 进行。

硅的提纯在原理上与锗相同。但硅有一特点, 即熔融状态的硅化学性质极其活泼, 几乎没有与它不发生作用的物质, 因而用来装硅的容器材料成了问题。石英比较合适, 而石英与

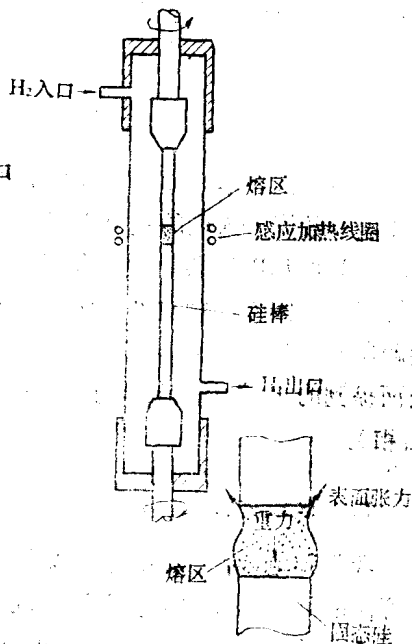


图 1-6

硅的膨胀系数不同,冷却时装硅的石英舟难免破裂,所以,应尽可能使用薄壁石英舟,使它的弹性好些,以能承受较大的形变所产生的应力。在1953年美、德科学家分别提出所谓“浮置熔区”法,或称“无坩埚区熔法”,顾名思义,熔区处于悬浮状态,不接触任何物质,示意图如图1-6所示。由于熔融状态的液态硅有足够的表面张力,能维持熔区不致于流下来,参见图1-6附图。在精炼过程中,硅棒由支架带动做相对转动,可使硅棒加热均匀对称,又可起搅拌熔区的作用。硅中最难去除的杂质是硼,其 $k=0.9$,单纯靠区域提纯不易将其去除,可采用在通入的氢气中掺入水汽(即所谓“湿氢”),使硼氧化而挥发的方法将硼去除。

2. 单晶生长

如果把液态物质的温度下降到凝固点之下,其中有些原子(或分子)就会自发趋向于固体结构的排列,形成小小的核心。随凝固过程的继续进行,这些核心就会长大,形成大块的晶粒。如果过程任其自然发生,形成的核心不止一个,最后得到的是由晶体取向各异的晶粒组成的多晶。假如人为地加以控制,使凝固过程中所有原子都沿一个预先选定的晶向排列,则得到的将是一块单晶,即在整个大块晶体中,全部原子完整地按同一种规律排列。

单晶的生长方法很多,采用上面介绍的区域精炼法亦能做到。以锗为例,在装有锗材料的舟的一端,置入一块选好的单晶,称为籽晶,仍使熔区缓缓移过物料,在与籽晶接触处的熔融锗中的原子,在凝固过程中即按籽晶原子排列的方式排列,最后使整个锗锭长成一根单晶。采用浮置熔区法也可类似生长硅单晶,甚至可以不要籽晶,经多次区域精炼,会自动形成单晶棒。不过这种方法生长的硅单晶,其直径会受到限制。

现在最通用的方法是“拉晶”法,示意图如图1-7所示。将坩埚内的物料加热到熔融状态,然后将籽晶与液态物料接触,当籽晶表面与液态物料熔合时,把籽晶提拉上升,同时旋转。于是,熔融材料一边随牵引上升,一边按照籽晶中的晶体结构凝固成单晶,直到把全部材料拉完为止。

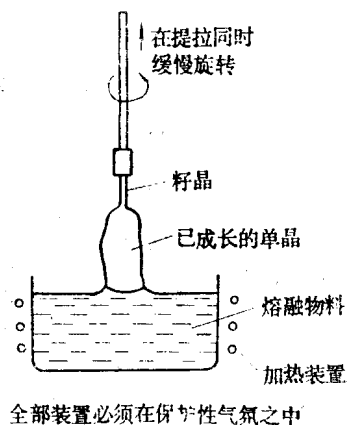


图 1-7

建议阅读材料

1. 《Transistors》 Fundamentals for the Integrated-Circuit Engineer, R.M. Warner, B.I. Grang 著 1983年,第一章 微电子学的由来、发展与人物。
2. 《Microelectronics》Digital and Analog Circuits and Systems, J. Millman 著, 1979年,序: 电子学简史 XVII~XXVIII 页。
3. 《半导体材料及其应用》,叶式中等编 机械工业出版社,第二章 元素半导体材料。