

 电子信息与电气学科规划教材

半导体概论

陈治明 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书从工程应用的角度,浓缩半导体物理、半导体材料和半导体器件的基本内容,介绍半导体及其器件的基本原理,介绍各种主要半导体材料的基本特性、制备方法及其应用,特别注意反映半导体科学与技术发展前沿的动态及最新成果。主要内容包括:半导体物理与器件概论,半导体材料概论,半导体材料的制备方法,半导体杂质工程与能带工程,宽禁带半导体,以及半导体照明等。

本书可作为普通高等院校本科电子科学与技术专业和微电子学专业“半导体材料”课程和材料科学与工程学科研究生“半导体概论”课程以及相关领域工程硕士课程的教科书,也可作为相关学科研究生“光电技术”等课程的教学参考书或补充教材,更可供在半导体器件与微电子技术领域、材料科学与工程领域、微机电领域以及应用物理等领域从事研究和开发工作的研究人员和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

半导体概论 / 陈治明编著. —北京:电子工业出版社, 2008.1

电子信息与电气学科规划教材

ISBN 978-7-121-05306-1

I. 半… II. 陈… III. 半导体—概论—高等学校—教材 IV. 0471

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 172464 号

策划编辑: 韩同平

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19 字数: 499 千字

印 次: 2008 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 29.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。
服务热线: (010) 88258888。

前 言

随着微电子技术和光电子技术的长足发展以及微机电技术的异军突起,不但半导体专业的学生对介于器件与材料之间的许多交叉问题充满兴趣,非半导体专业的广大学生、教师和工程技术人员也开始对半导体产生兴趣。一些有条件的学校开始为一般材料科学与工程等专业的研究生开设半导体概论学位课程,帮助学生扩大视野,为他们在学科交叉领域勇敢探索、大胆创新奠定基础。此外,随着高校研究生教育规模的扩大和学科、专业向交叉领域的发展,一些不具备半导体专业背景的优秀本、专科毕业生成功考入微电子技术、光电子技术和微机电技术等领域攻读硕士学位,他们需要用较少的课时弥补背景的欠缺。本书即是在作者长期为微电子技术及固体电子技术学科研究生开设半导体材料物理课程、为材料科学与工程等学科不具备半导体本科专业背景的研究生开设半导体概论课程的基础上编写的。书中浓缩了半导体物理、半导体材料和半导体器件的基本内容,增添了宽禁带半导体和半导体照明等学科前沿和学科交叉的内容,希望能成为一本同时满足几种课程需要的教材或教学参考书。譬如,本书第2~5章可作为本科电子科学与技术专业开设半导体材料课程的教材,第1~4章可作为对不具备半导体专业背景的研究生开设半导体概论或类似课程的教材,第1章和第6章则可作为光电子技术类研究生课程的教学参考书或补充教材,等等。本书补充了同类教科书和专著还未来得及收入的一些半导体领域研究前沿的新内容、新进展,相信也会引起半导体领域的广大教师和工程技术人员兴趣。

林涛博士仔细审阅了全部书稿并提出了很多弥足珍贵的修改意见,学生们为新材料的收集和整理提供了很多帮助,作者在此一并致以衷心感谢。

一书多用的编写方法是一种可能会引起争议的尝试,加之专业涉及面广亦难免谬误与缺失,作者敬候批评指正。

陈治明

2007年8月28日于西安理工大学

目 录

半导体科技发展史概要(代序)	1
参考文献	10
第1章 半导体物理概论	11
1.1 半导体中电子的能量状态	11
1.1.1 能带理论	11
1.1.2 半导体的能带结构	13
1.1.3 半导体中的载流子	14
1.1.4 载流子的有效质量	15
1.2 半导体的导电性	16
1.2.1 载流子的漂移运动和半导体的电导率	16
1.2.2 半导体中的载流子统计	17
1.2.3 散射与载流子的迁移率	22
1.2.4 半导体电阻率的温度特性	25
1.3 半导体中的额外载流子	26
1.3.1 额外载流子的产生与复合	26
1.3.2 额外载流子的运动	30
1.4 半导体应用基础	34
1.4.1 半导体器件的基本结构	34
1.4.2 半导体pn结原理	35
1.4.3 金属-半导体接触原理	44
1.4.4 MOS栅原理	49
1.4.5 半导体光电子学原理	52
参考文献	61
第2章 半导体材料概述	62
2.1 半导体材料的晶体结构与分类	62
2.1.1 元素的电负性与原子的结合	63
2.1.2 共价结合与正四面体结构	64
2.1.3 半导体的晶体结构	65
2.1.4 化合物半导体的极性	67
2.2 元素半导体	68
2.2.1 硒(Se)	68
2.2.2 三种具有半导体特征的结晶碳	68
2.2.3 灰锡(α -Sn)	72

2.2.4 锗 (Ge)	72
2.2.5 硅 (Si)	73
2.2.6 其他元素半导体	75
2.3 化合物半导体	76
2.3.1 III-V 族化合物	76
2.3.2 II-VI 族化合物	83
2.3.3 氧化物半导体	85
2.3.4 IV-VI 族化合物	87
2.3.5 IV-IV 族化合物	89
2.3.6 其他化合物半导体	90
2.3.7 半导体固溶体	91
2.4 有机半导体	92
2.5 非晶半导体	93
2.5.1 非晶体结构与制备原理	93
2.5.2 非晶半导体的电子态	95
2.5.3 非晶半导体的输运性质	99
2.5.4 非晶半导体的光学性质	101
2.5.5 非晶半导体种类及其应用	106
2.6 精细结构半导体	106
2.6.1 微晶和纳米晶	107
2.6.2 半导体超晶格	109
2.7 磁性及超导半导体	110
参考文献	111

第3章 半导体材料制备概述

3.1 半导体材料制备的理论基础	114
3.1.1 相图	114
3.1.2 区熔提纯原理	118
3.1.3 晶体生长原理	124
3.2 晶体生长技术	129
3.2.1 布里奇曼法 (Bridgman)	129
3.2.2 直拉法 (Czochralski, 简称 CZ)	130
3.2.3 区熔法 (Floating Zone, 简称 FZ)	131
3.2.4 升华法	132
3.3 半导体薄膜的生长与淀积	132
3.3.1 外延生长	133
3.3.2 半导体薄膜的其他制备方法	138
参考文献	147

第4章 杂质工程和能带工程

4.1 常规掺杂	148
----------------	-----

4.1.1	扩散掺杂	148
4.1.2	离子注入	151
4.1.3	掺杂的有效性	153
4.1.4	自补偿效应	154
4.1.5	少子寿命控制	155
4.2	嬗变掺杂	157
4.2.1	嬗变掺杂原理	158
4.2.2	硅的嬗变掺杂	159
4.2.3	NTD 硅的电学特性	166
4.3	磁场改善生长晶体的纯度与均匀性	168
4.3.1	MCZ 原理	168
4.3.2	MCZ 工艺	170
4.4	半导体固溶体	173
4.4.1	固溶体的基本特征	173
4.4.2	禁带展宽与跃迁类型转变	174
4.4.3	固溶体从半金属到半导体的转变	176
4.4.4	硅锗固溶体及其应用	178
4.5	量子阱效应与半导体超晶格	187
4.5.1	量子阱和超晶格的组成与结构	188
4.5.2	量子阱中的电子状态	192
4.5.3	量子阱效应与超晶格效应	194
4.5.4	量子阱和超晶格的器件应用	196
	参考文献	202
第 5 章 宽禁带半导体		204
5.1	宽禁带半导体材料的特征优势	204
5.1.1	半导体器件的材料优选因子	204
5.1.2	宽禁带半导体的特征优势	216
5.2	碳化硅	217
5.2.1	碳化硅的基本性质	218
5.2.2	碳化硅晶体制备	231
5.3	其他宽禁带半导体	240
5.3.1	III-N 化合物及其固溶体	241
5.3.2	半导体金刚石	246
	参考文献	252
第 6 章 半导体照明		255
6.1	有关照明的几个物理概念	255
6.1.1	视觉	255
6.1.2	光度学参数	256

6.1.3	色度学概念	258
6.1.4	显色性概念	260
6.2	高亮度 LED 原理	261
6.2.1	LED 原理	262
6.2.2	LED 的发光效率	263
6.2.3	高效 LED 的结构	265
6.3	高亮度 LED 的材料	272
6.3.1	基本条件	272
6.3.2	AlGaAs 材料系	274
6.3.3	AlGaInP 材料系	275
6.3.4	AlGaInN 材料系	277
6.4	高亮度 LED 的特性	279
6.4.1	伏安特性	279
6.4.2	光谱特性	280
6.4.3	输出特性	281
6.5	白光 LED	282
6.5.1	白光 LED 原理	282
6.5.2	白光 LED 的性能及其优化	287
	参考文献	292

半导体科技发展史概要（代序）

20 世纪后 20 年，高新技术（High Tech）这个新名词悄然流行于世，高新技术开发区雨后春笋般在改革开放的中国大地竞相建立。在所有被称得上 High Tech 的技术中，半导体技术应该是最当之无愧的。半导体工业直至 20 世纪 50 年代才萌芽，仰仗当时科技进步的最新成果而获得惊人成就，反过来又成为所有 High Tech 赖以诞生和发展的基础。半导体技术之可谓 High Tech，还表现在它一方面对人类精神文明和物质文明的进步起着无法估量的积极作用，一方面又难以让常人对其有恰当的认识，尤其不能像导弹和航天器之类的高新技术产品那样给人以感性的了解。在 20 世纪 50 年代，很少有非专业人士知道半导体这个名词，更谈不上对它有正确的理解，以至于到 20 世纪 60 年代半导体收音机进入寻常百姓之家时，半导体成了半导体收音机的代名词。其后数十年，人们仍习惯于把这种只装备有为数不多半导体器件的简单装置称为半导体，而对具有成百上千乃至难以数计的半导体器件的电视机、计算机和移动电话，反而没有多少人能把它们同半导体自然联系起来。现在，即便是边远乡村，也很少有与半导体器件无缘的家庭，拥有数百万以上半导体器件而毫无觉察的家庭已不在少数。据统计，世界人均晶体管占有量本世纪初已超过 1 亿只。世界已经发展到应该用半导体器件的拥有量来评价一个家庭、一个办公室乃至一个机构的文明程度的阶段。有人把半导体技术在 20 世纪社会与科技进步中的作用与蒸汽机在 19 世纪所起的作用相比，把受半导体技术推动的信息时代的到来称为第二次工业革命的开始。其实，半导体技术的发展现仍处于上升时期，准确评价其历史作用的时间也许还没有到来。

那么，什么是半导体呢？

绝大多数教科书习惯于按材料导电能力的高低来区分导体、半导体和绝缘体，把电阻率介于金属和绝缘体之间的材料定义为半导体。这固然是一个非常通俗而容易被广泛接受的定义，但毋庸讳言，它比较模糊而且欠准确。首先，半导体本来就是一种电阻率易变且变化范围很宽的材料。某些结构完整且不包含杂质或杂质浓度极低的高纯结晶态半导体，以及大多数未掺杂的非晶态半导体，室温下也会具有跟绝缘体不相上下的高电阻率；而当它们含有足够高浓度的某些特殊杂质时，其电阻率又会下降到金属的电阻率范畴，甚至比某些导电性欠佳的金属电阻率还低，这种现象被称为电阻率的结构和组分敏感性。这种现象对一些宽禁带半导体尤其明显，最典型的例子就是禁带很宽（5.5eV）的金刚石。在过去的很多专著和教科书中，金刚石被称为绝缘体，而现在被归入半导体之列。不仅是金刚石，所有宽禁带半导体在不含杂质的高纯状态都高阻如绝缘体，而在有效杂质浓度足够高时又低阻如良导体。在这两个极端之间，其电阻率随着有效杂质浓度的升高而连续下降。我们在这里强调杂质的有效性，是因为绝大多数半导体材料的导电性还与杂质的性质有关。

一种材料之所以能够导电，是因为其中含有一定密度的能自由运动的电荷，即载流子。金属的载流子是自由电子，其密度很高；半导体中除了带负电的自由电子之外，还可能带有带正电的、被称为空穴的载流子。掺杂能够提高半导体材料的导电性，首先是因为掺杂能够提高半导体中载流子的密度。但是，对一种半导体材料而言，有些杂质能使其获得自由电子，另一些杂质则能使其获得自由空穴；而当这两种杂质同时存在于一体时，它们对提高载流子

密度的作用就会相互抵消。这时，该半导体材料从这两种极性相反杂质的获益程度取决于它们的浓度差，即有效杂质浓度。这种情况被称为杂质补偿。高度补偿，即有效杂质浓度趋近于零的材料，其载流子密度跟其不含杂质时的高纯状态一样低，因而也具有很高的电阻率。实际情况中，杂质高度补偿比不含杂质的高纯状态容易实现得多。人们常常用这种方法使禁带较宽的半导体材料具有跟绝缘体相当的电阻率，并称之为半绝缘体，例如在微波领域应用很广的半绝缘 GaAs 和半绝缘 SiC，其电阻率可达 $10^9 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ，甚至更高。另一方面，当有效杂质浓度很高时，其电阻率也会像金属一样低。譬如以电子作为主要载流子的 n 型 GaAs，当有效杂质浓度达到 10^{20}cm^{-3} 左右时，其电阻率也会低到 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

除此而外，半导体的导电能力还与某些外部条件有关。与金属和绝缘体相比，半导体的电阻率对光照、磁场和电场等外部条件的敏感性要强得多，因而从本质上说，半导体是导电性明显依赖于材料的状态和环境、因而可以灵活改变的一类特殊物质。正是因为有这样灵活多变的特点，半导体才可以用来制造像晶体管、二极管那样的电子器件，而导电性难以明显改变的金属和绝缘体却做不到。

以上所述针对的是一个不变的温度，而半导体是一种电阻率随温度而变且变化趋势与金属截然不同的材料。众所周知，金属的电阻率随着温度的升高而升高，而半导体的电阻率基本上随着温度的升高而下降。也就是说，如果把一种材料的电阻率随温度变化的规律 $\rho(T)$ 表示为如下的线性关系：

$$\rho(T) = \rho_0 + \alpha T$$

则式中的温度系数 α 对金属总为正数；对半导体则基本为负数，只在有效杂质浓度较高时的某一段温度区为正数。

金属和半导体的另一个显著区别，是在接近绝对零度的极低温下，金属电阻率普遍会极度下降，有许多金属还会成为电阻率无穷小的超导体；而半导体的电阻率则一般会极度增大且达到绝缘体的水平。只有极少数按其基本特性可以归类于半导体的材料，譬如 GeTe 和 ZnTe 等，在 1K 以下的极低温下也会显示出超导性。对半导体而言，这是极少的例外。

金属也有例外，譬如铟和铋，其电阻率跟有效杂质浓度较高的半导体差不多，但并不像半导体那样对温度和光照敏感，因而不属于半导体而被称为半金属。

因此，不妨将半导体定义为这样一类材料，它们在绝对零度时无任何导电能力，但其导电性随温度升高呈总体上升趋势，且对光照等外部条件和材料的纯度与结构完整性等内部条件十分敏感。

这类材料遍及无机物和有机物、晶体和非晶体。

半导体技术可以真正称得上是一种新技术，因为从半导体基本物性的发现算起，至今也只有不到 200 年的历史；从半导体技术的最初应用算起则不到 100 年；而半导体产业的形成更是近在眼前的事情，不过 50 年多一点。

如果把电阻率的负温度系数作为半导体最典型的特征，则法拉第 (Michael Faraday, 1791—1867) 1833 年发现硫化银 (AgS) 的电阻率具有负温度系数可算是半导体物性的最早发现。再后来是英国物理学家史密斯 (W. R. Smith) 1873 年发现硒 (Se) 的光电导效应，德国物理学家布劳恩 (Karl Ferdinand Braun, 1850—1918) 1874 年发现金属探针与硫化铅 (PbS) 和硫化亚铁 (FeS₂) 等晶体的接触具有不对称的伏安特性 (即整流特性)，英国物理学家亚当斯 (W. G. Adams) 1876 年发现光照能使金属探针与 Se 的点接触产生电动势，福里茨 (C. E. Fritts) 1883 年进而发现这种接触也具有整流特性。此外，很少被人提起的英国电子工程师朗

德 (H. J. Round) 1907 年在马可尼 (Marconi) 公司工作期间发现在碳化硅 (SiC) 晶体的两点间加上电压时有黄光发出, 从而揭示了半导体的电致发光特性。以上这些早期发现已基本涉及半导体物理效应的主要方面, 并很快引发了一些工程师开发应用这类特殊物质的兴趣。1904 年, 美国电气工程师鲍斯 (J. C. Bose) 获得使用硅 (Si) 和 PbS 制造点接触整流器的专利权; 1906 年, 美国电气工程师皮卡德 (G. W. Pickard) 获得点接触晶体检波器的专利权, 这种器件是晶体检波接收机 (即矿石收音机) 的关键部件; 1920 年, Se 整流器投入应用; 1926 年, 氧化亚铜 (Cu_2O) 点接触整流二极管问世并在“二战”中应用于雷达检波。

受半导体材料提纯与晶体生长技术水平不高的限制, 在以上史实所经历的近百年间, 对半导体原始材料及其器件的研究存在着研究结果的一致性和重复性较差的问题, 以致引起人们 (包括一些著名的资深科学家) 对半导体的实用性产生怀疑。恰在此时, 性能优越而稳定的真空电子管问世, 这在一定程度上使半导体器件的这些早期发明及其应用受到冷落。但是, 对半导体理论的研究在这段时间却因为量子力学的问世和发展而逐渐活跃起来。1931 年, 美籍英国人威尔逊 (A. Wilson) 发表了关于半导体能带理论的经典论文, 开创了半导体理论研究的先河。

在美国 Bell 实验室的固体物理研究组, 后来以晶体管的主要发明人闻名于世的肖克莱 (W. Shockley)、布拉顿 (W. H. Brattain) 和巴丁 (J. Bardeen) (见图 0-1), 从第二次世界大战开始之前就一直在执着地进行着半导体材料的研究。肖克莱和布拉顿着重从事氧化亚铜整流器的肖特基势垒理论研究。从 1939 年到 1945 年, 肖克莱曾陆续提出一些场效应晶体管的设计方案, 但相应的实验一直没有取得成功。1947 年 11 月 17 日, 布拉顿的一个实验终于证明场效应的确有可能起作用。紧接着, 巴丁和布拉顿又在同年 12 月 16 日试制成功双点接触式晶体管。1947 年的这一个月在半导体科技发展史上被称为“神奇之月”, 它标志着一个新时代的开始。大约又过了 1 个月, 肖克莱提出了 pn 结理论和结型晶管理论, 并与替尔 (G. K. Teal) 等人一起, 于 1950 年用晶体 Ge 成功制成结型晶体管。替尔后来还在美国达拉斯的得克萨斯仪器公司率先制成硅晶体管, 而在此之前的晶体管都是锗管。



图 0-1 晶体管发明人肖克莱 (坐者)、布拉顿 (右立者) 和巴丁及其伟大发明的原始装置

晶体管的英文名称是 transistor, 由 transfer 与 resistor 组合而成, 原意为转移电阻, 体现了这种器件的基本特性和功能。中文译名则参照当时对等器件真空管的命名方式, 因其所用功能材料是半导体晶体而命名为晶体管。虽然在词意上与英文原名缺乏对应关系, 但更能体

现科技的进步，给人一种更新换代的感觉，因而很快被华语社会的科技人士所接受。但是，大约 30 年后使用非晶态半导体制造这种器件的研究工作取得极大成功，这多少使沿用成习的晶体管一词有些尴尬。

晶体管具有类似于当时无线电技术最关键器件真空三极管的电流放大、振荡和开关等功能，而体积和功耗却小得多。这种器件的优越性和重要性立即引起了科技界的高度重视，尽管当时谁也没有预见到它后来会对人类进步产生如此巨大的革命性影响，以致被誉为“20 世纪的主要发明”。晶体管于 1952 年开始商业应用。因为体积小，第一批采用晶体管的商业装置是便于随身携带的助听器。4 年后，当肖克莱及其主要合作者于 1956 年因发明晶体管而获得诺贝尔奖时，全世界仅有 20 家公司在生产晶体管。但其后不久，晶体管即开始向电子管的几乎所有应用领域进军，并在 10 年左右的时间内在大部分领域替代了电子管。这期间，以晶体管的基本结构单元 pn 结为基础的各种分立器件也如雨后春笋般应运而生。这些体积小、功耗低、功能齐全的半导体器件主要包括：pn 结型和肖特基势垒型二极管（SBD），结型和场效应型晶体管，其中场效应晶体管又包含结型场效应晶体管（JFET）、金属-氧化物-半导体接触型场效应晶体管（MOSFET）和金属-半导体接触型场效应晶体管（MESFET）、以及晶体闸流管（Thyristor）家族的各种器件和绝缘栅双极晶体管（IGBT）等。

在全世界最早生产晶体管的 20 家机构中，肖克莱半导体实验室是其中之一。

肖克莱时常对“那些最具创造性的人受雇于他人时都得不到足够的酬劳”这一客观事实耿耿于怀，因而在 1955 年脱离 Bell 实验室，从美国东海岸回到西海岸——他的故乡 Palo Alto，创办了属于自己的高科技产业研究室——肖克莱半导体实验室。跟肖克莱一起创办这个实验室的还有从美国东部的一些著名实验室慕名而来的 8 个才华横溢的年轻人。他们十分仰慕肖克莱在科学界的盛名，但不久就发现很难与之合作共事，随即相继离去。肖克莱当时热衷于开发他的 pnpn 二极管，而不采纳这些年轻人对发展平面工艺、研制集成电路的建议。

所谓平面工艺，就是利用光刻和掩蔽掺杂技术在半导体晶片的表面层制作二极管或晶体管等器件，使其所有电极皆由其表面引出，因而容易在同一块晶片上制作许多不同的器件，然后再用光刻技术将金属膜制成互连线，将这些器件联结成一个电路，即集成电路。

这 8 个年轻人退出肖克莱半导体实验室之后，在工业家谢尔曼·费尔柴尔德（S. Fairchild，IBM 公司的最大私人股东，其父是 IBM 的创始人）的支持下，于 1957 年创办了费尔柴尔德半导体公司（中译者亦常将之意译为仙童半导体公司）。硅器件是该公司的唯一研究对象和产品，而其他公司还兼营锗器件。肖克莱的半导体实验室则由于他这 8 个崇拜者的另立门户而一蹶不振，最后以解散告终，未能实现他要为自己的非凡创造能力讨回足够酬劳的梦想。肖克莱 1963 年重返学术岗位，成为斯坦福大学的荣誉教授。

以上这些历史事件发生在人们现在称之为硅谷的地方^[1]，在半导体科技发展史中具有举足轻重的地位。肖克莱半导体实验室虽然如流星般转瞬即逝，但它为硅谷的形成与发展揭开了序幕。而且，由肖克莱半导体实验室的青年骨干们创立的费尔柴尔德公司，又进一步加速了硅谷的形成。在硅谷鼎盛时期的近 70 家半导体公司中，有半数是其直接或间接后裔，在硅谷之外从事半导体研究与开发的人中也有很多曾在那里工作过。因此，肖克莱对半导体事业的贡献并不仅仅是发明了晶体管。

1959 年，这 8 个人中的诺依斯（R. Noyce，Intel 创始人、首任 CEO）、摩尔（G. Moore，Intel 第二任 CEO）和赫尔尼（J. A. Hoerni）的平面工艺开发成功，为半导体进入集成电路时代奠定了基础。

1961 年，世界上第一个批量生产的集成电路（见图 0-2）在美国问世。

如果我们把晶体管的问世作为半导体工业的起点，那么平面工艺的问世就是微电子技术的开端，并预示着信息时代的到来。以集成电路作为典型产品的微电子技术，不仅使以通信技术和计算机技术为代表的电子工业产生了质的飞跃，而且改变了人类的生活方式和工作方式，给 20 世纪的文明社会以新的内涵。

微电子技术发展很快。从 1959 年诺依斯申请硅集成电路的第一个专利、1961 年费尔柴尔德半导体公司批量生产只有 8 个元器件的第一个集成电路产品开始，只经过了不到 20 年的时间，在 20 世纪

70 年代后期即进入了超大规模集成（VLSI）电路时代。VLSI 的完整含义实际上包含了规模和功能两个方面的内容。在规模上，VLSI 一般包含百万个以上元件、线条宽度至少在 $1\sim 2\mu\text{m}$ 以下。最早被称为 VLSI 的是在 1978 年制成的 64k DRAM (Dynamic Random Access Memory)，其集成规模已超过 10 万个元件，芯片面积为 36mm^2 ，线宽为 $2\mu\text{m}$ 。1986 年左右问世的 16M DRAM 的集成规模则已超过 3000 万个元件，线条宽度缩小到亚微米。1991 年推出的 64M DRAM 集成了 1.4 亿个元件，而 1995 年推出的 1G DRAM 的集成元件数则高达 10 亿。这个发展速度基本符合穆尔 1965 年的预言，即微电子技术领域众所周知的穆尔定律：集成电路的集成度和存储器的容量平均每 18 个月增长 1 倍。

在功能上，VLSI 技术使系统设计方法得以实施，制成系统集成产品。例如，将存储器、微处理器、图形处理器以及必要的专用集成电路（ASIC）集成在一块芯片上，称为片上系统（SOC，System On Chip）。系统集成产品不但具有高度的可靠性，还可产生许多新的功能。数字信息处理系统的单片集成使信号处理的速度极大提高；容错计算系统的集成则可实现极高的可靠性，从而满足航天、核能等高新技术的需要；而阵列计算系统的集成则可创造出许多新的人工智能功能。

目前，VLSI 技术仍在不断发展，集成度的演变实际上已达到 1 年翻一番的速度，12 英寸 $0.35\mu\text{m}$ 集成电路技术已经投入规模生产，正在从 $0.25\mu\text{m}$ 、 $0.18\mu\text{m}$ 、 $0.15\mu\text{m}$ 和 $0.11\mu\text{m}$ 向深亚微米过渡^[2]。一块芯片所包含的集成晶体管数目现在可高达 $10^8\sim 10^9$ 个，而美国莫尔学院在晶体管发明之前的 1946 年 2 月研制成功的世界首台电子数值积分计算机占地 100m^2 ，重 30 吨，却只有 18 000 个电子管。现在，人们不得不改用 ULSI 或 GSI^①来称呼具有更高集成度的超大规模集成电路。

晶体管和半导体平面工艺这两大发明，在孕育了以硅为主要材料的集成电路这一高科技时代重要基石的同时，也孕育了以砷化镓等化合物为主要材料的半导体光电子技术这一高科技时代的重要支柱。在微电子技术长足发展的同时，半导体光电子技术也得到了飞速发展。

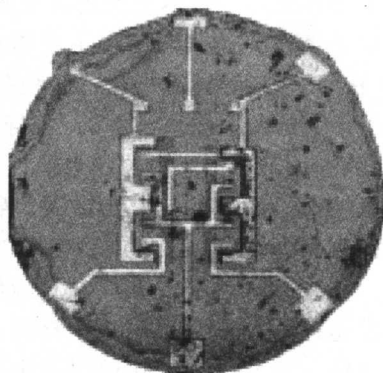


图0-2 世界上第一个批量生产的集成电路。该电路由8个元器件组成，费尔柴尔德半导体公司出品

① 我国微电子学界将 VLSI 称为超大规模集成电路，是半导体技术的发展常常令人始料不及的又一例证。Very High Large Scale 原本并没有“超”的意思。随着 ULSI 的问世，VLSI 看起来有必要改称甚大规模集成电路，正如 VHF 表示甚高频，UHF 才表示超高频一样。GSI 是 Giant Scale Integrated Circuit 的缩写，有人译为巨大规模集成电路。

半导体光电子技术主要包含发光技术、光电探测技术和光电能量转换技术。

半导体发光的实际应用主要指利用某些半导体材料的优良电致发光特性制造发光二极管(LED)和半导体激光器。这些发光器件与日常生活中使用的热辐射或白炽光源的主要差别在于光谱的覆盖面大小不同。半导体发光器件的单色性较强。LED的光谱宽度一般在10~50nm范围;半导体激光器的单色性更好,可窄到0.1nm以下。

虽然最早发现的具有电致发光特性的半导体材料是碳化硅,但最早进入实用化的却是砷化镓和磷化镓等III-V族材料。1962年砷化镓激光二极管的问世,激发了人们对III-V族材料,特别是砷化镓、磷化镓和磷化铟及其固溶体等的研究开发兴趣,拉开了半导体光电子技术迅速发展的序幕。这些材料被称为继锗、硅之后的第二代半导体。第三代半导体是指氮化铝、氮化镓、氧化锌以及金刚石和碳化硅之类的宽禁带材料。这些材料在短波光电子器件、高频大功率器件和耐高温器件方面具有远胜于硅与砷化镓的优势,目前正在形成研究开发的热点。

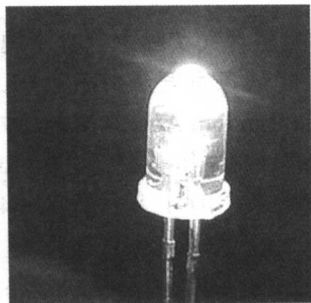


图0-3 高效长寿的半导体灯

半导体LED因其较强的单色性而主要应用于显示技术,不适宜直接用于照明。但是,利用短波长LED的紫外和蓝光辐射激发红、绿、蓝(RGB)荧光粉可以产生很理想的白光,从而做成半导体灯,如图0-3所示。作为照明光源,白炽灯的发光效率约为15lm/W,荧光灯的发光效率约为80lm/W,而半导体灯在相同照度下的耗电量可以降低到白炽灯的1/10~1/12,寿命却可长过100倍,是理想的照明光源。

1993年,日本旅美科学家中村修二(Shuji Nakamura)研制出第一只氮化镓高亮度蓝色发光二极管,使人们看到了白光LED的希望曙光,拉开了半导体照明技术发展的序幕。

日本于1998年率先开发半导体照明,在1998~2002年期间开展了“21世纪光计划”,耗资50亿日元,期望从2006年开始用半导体灯取代传统灯具。

美国2000年启动了为期10年的“半导体照明国家研究计划”,预算资金5亿美元,由13个国家重点实验室、公司和大学承担。美国能源部预测,到2010年,美国55%的白炽灯和荧光灯将被半导体灯取代,每年可节电350亿美元。

欧盟于2000年7月启动了“彩虹计划”以开发和推广白光LED,由6家大公司和两所大学承担。

韩国于2002年开始实施“氮化镓半导体开发计划”,准备在2004~2008年间由政府投入1亿美元,重点支持提高白光LED发光效率的研究。

2004年7月,我国科技部、信息产业部等6部委和14个地方政府共同实施的国家半导体照明工程的首批50个项目正式启动,并确定上海、大连、厦门和南昌为国家首批半导体照明产业化基地,2005年4月增批深圳产业化基地。2008年的北京奥运会和2010年的上海世博会将大量采用半导体照明设备。

我国电力专家预计2010年全国发电量为27000亿度,其中3000亿度用于照明。如果1/3的照明灯具用半导体灯替代,一年节省的电力就相当于三峡电站和葛洲坝电站的产力之和^[3]。

美国能源部预测,到2010年,全球将形成500亿美元的半导体照明庞大产业。

半导体材料在新能源开发与应用技术领域也具有很大潜力,尤其是在太阳能的利用方

面，半导体太阳电池正在迅速扩大对半导体材料的消费量，很快会成长为半导体材料的最大消费市场。

人类对其体外能的利用主要有 3 种途径：（1）燃烧柴草之类的生物资源；（2）燃烧煤炭、石油、天然气之类的矿物资源；（3）直接或通过转换利用水能、风能、地热能和太阳能等自然能。随着社会的进步，直接燃烧生物资源的获能方式正逐渐被摒弃，因为它严重破坏地球的生态平衡。矿物资源的不可再生性注定会使第 2 种途径的比重越来越小。据测本世纪中叶世界人口将增至 89 亿，相应的能源需求将是目前的 3 倍。从战略的角度看，至少其增量部分须主要通过第 3 种途径来解决。在各种自然能中，太阳的光能和热能具有相对永恒和普及的特征，是开发和利用的战略重点。特别是太阳光发电〔也称光伏（Photovoltaic）发电〕在太阳热能发电、风力发电、潮汐发电、地热发电等各种利用自然能发电的方式中具有许多无可比拟的优点。所以，当世界上第一块实用硅太阳电池与第一座原子能发电站同时于 1954 年在美国诞生时，太阳电池理所当然地得到了人们的偏爱，并很快在航天技术中发挥了它无与伦比的作用，如图 0-4 所示。在能源危机和环境保护的问题备受关注的今天，光伏发电首先成为各发达国家能源计划的战略目标。虽然光伏发电的成本目前还很高，但 2005 年全球太阳电池的产量还是达到了 200 兆瓦、总装机容量 100 万千瓦的水平。随着成本的降低（光伏界人士认为到 2010 年光伏发电的成本有可能降低到可与常规能源竞争的水平），光伏发电必然会得到惊人的发展。

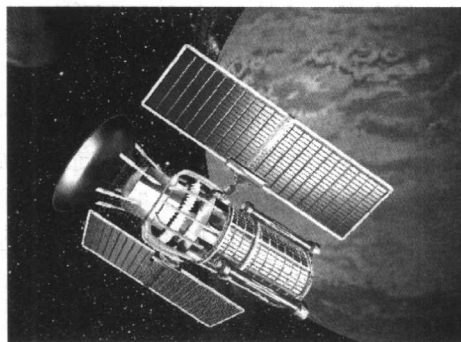


图0-4 为航天器供电的太阳电池

世界上第一个太阳电池是 Chapin、Fuller 和 Pearson 于 1954 年利用硅扩散 pn 结技术首先研制成功的，当时的转换效率只有 6%。现在，单晶硅太阳电池在非集中光照下的转换效率已超过 20%，采用会聚阳光的集中光照方式还可使转换效率大幅度提高。不仅是硅，凡禁带宽度 E_g 小于高强度光线的光子能量 $E=1.24/\lambda$ （ λ 为波长，以 μm 为单位，能量以 eV 为单位）的半导体，大多数也都可以用来制造太阳电池。譬如紧随硅电池之后问世的 CdS 电池， Cu_2S 电池，以及为降低成本而大力开发的多晶硅、非晶硅和铜铟硒薄膜太阳电池等。这些材料的一个共同特点是其 pn 结或肖特基势垒接触在阳光下具有明显的光伏效应。

半导体材料大多具有灵敏的光电、热电、磁电（霍尔效应）、磁阻和压电等效应，除光电（含高能射线）探测器外，也是制造热敏、磁敏、力敏、气敏以及湿敏等各种传感器的理想材料。

光电导效应是半导体的基本体效应之一。半导体吸收适当波长的光产生额外载流子，进入电导率较高的非平衡状态。由额外载流子引起的电导率增量被称为光生电导率。这种现象就是光电导效应。利用光电导效应可以制成通过电阻的变化对特定波长的光及其强度作出灵敏反应的元件，即光敏元件。几乎所有的半导体都是光敏材料，常用来制造可见光光敏元件的材料有 CdS 和 CdSe 等。禁带较窄的半导体材料（例如 InSb、PbS 以及碲镉汞固溶体等）则用来制造红外光传感器（红外探测器）。其中，碲镉汞固溶体是最有潜力的材料，这类材料一般具有很高的量子效率，并且可以通过组分比和结晶状态的调整获得对指定波段的最高响应。用这类材料制作的红外探测器主要用于导弹的制导、监控和跟踪。

前述光伏效应（光生电动势效应）也是一种光电效应，不过是一种界面型的结构效应，而非体效应。半导体 pn 结在受到光子能量大于其材料禁带宽度的光线照射时，pn 结附近的光生载流子对（电子-空穴对）受 pn 结自建电场的静电作用而分开。在开路状态下，分开的光生电子和空穴分别累积于 pn 结空间电荷区之外的两侧，产生电动势，若接入电路即形成电流。这就是光生电动势效应。利用这种效应制造的器件通常称为光电池。太阳电池是光电池中特别对太阳光谱有较强响应的一类。显然，光电池也是一种可以用来检测光的波长和强度的光电传感器。用功函数差别较大的金属和半导体形成的接触具有类似于 pn 结的伏安特性，称为肖特基势垒接触。大面积的肖特基势垒接触也具有明显的光生电动势效应，也可以制成光电传感器。不过，作为光电传感器应用的肖特基势垒接触的金属层必须足够薄，以保证有足够强度的被探测光能进入半导体表面的势垒区。半导体的光生伏特效应和光电导效应、光磁电效应一起促成了半导体在光探测器领域的应用。红外探测器是对红外光敏感的光探测器，是禁带较窄的半导体材料的用武之地，是半导体光电子技术的一个十分重要的分支。红外探测器分热探测器和光子探测器两大类，半导体探测器属于后一类，主要应用于国防和光通信领域。

霍尔效应是磁场传感器（磁敏元件）和电流传感器工作原理的基础。所谓霍尔效应是指磁场中的半导体在通以垂直于磁场方向的电流时，载流子的运动方向会因磁场的存在而偏转，从而在垂直于磁场和电流的方向上形成电荷积累，出现电势差，即霍尔电压。利用霍尔效应制造的器件即霍尔器件。在设定磁场的条件下，根据霍尔电压的大小可以测定未知的电流；在设定电流的条件下，根据霍尔电压的大小可以测定未知的磁场。尽管导体和半导体都有程度不同的霍尔效应，但制造霍尔器件一般采用某些载流子迁移率较高的半导体材料。例如，锗（Ge，电子迁移率 $\mu_n=3900\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ），砷化镓（GaAs， $\mu_n=8000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ）铟化铟（InSb， $\mu_n=78\,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ）和砷化铟（InAs， $\mu_n=30\,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ）等。

磁阻效应是指材料在磁场中电阻率升高的现象。半导体跟许多磁性金属和合金一样，都具有磁阻效应。利用磁阻效应制造的磁场传感器称为磁敏电阻。磁阻效应虽然从本质上是一种体效应，但实际应用中的磁敏电阻为达到尽可能高的磁场灵敏度，常常采用特殊的几何结构，因为磁阻效应还与材料的几何形状有关，即不同几何形状的材料在相同磁场中的电阻并不相同，称为几何磁阻效应。

材料受机械应力（张应力、压应力或切应力）的作用，在产生应变的同时诱发产生介电极化或电场，这种现象称为压电效应。利用压电效应可以制成压力传感器。很多半导体（譬如 ZnO、CdS 和 ZnS 等）就具有明显的压电效应，可用来制作 MOSFET 型压力传感器中的压电薄膜。

压阻效应则是指材料因承受机械应力或压力而改变其电阻率的现象，也是压力传感器的应用基础。大多数半导体都具有明显的压阻效应，这是因为在半导体材料中的杂质及其含量都不发生变化的前提下，尤其是对杂质浓度较低的材料，其电阻率（或电导率）取决于材料的能带结构，而能带结构取决于原子之间的距离，外力引起的固体形变（也即原子间距的改变）通过对能带结构的改变而引起电阻率的变化。

半导体材料的特性和敏感性无论是立足于体效应还是依赖于结构，都很容易受到环境的影响。因此，利用这种特性或敏感性作为中间手段，还可以制成探测环境状态的传感器，即气氛传感器和酸碱度传感器等。譬如 a-Si:H 氢气传感器就是利用了含氢非晶半导体硅 MIS 结构的输出特性易受其界面吸附的影响这一特点。当结构中的 a-SiO:H 表面吸附了氢原子时，

Pd 与 a-Si:H 之间的接触电势差就会发生改变，从而使确定电压下的 MIS 二极管输出电流发生变化。选用 Pd 作为这种 MIS 结构的金属层，是因为常温下氢原子在 Pd 中的扩散系数较高，有利于绝缘层 a-SiO:H 对环境中的氢原子的吸附。利用 CuO/ZnO 半导体异质结在相同直流偏压下对 CO 和 H₂ 有截然不同的交流响应，则可以制成 CO 探测器。

某些导电聚合物的电阻率会在一些化合物气氛中发生明显变化，例如，具有 P 型半导体特征的聚吡咯（PP）在 NH₃ 中电阻率升高，而在 NO₂ 中电阻率下降。具有这种效应的材料可以用来制作化学气氛的传感器。有一些半导体陶瓷也有类似的功能，例如，ZrO₂ 陶瓷是制造氧分析器的主要材料，而 SnO₂ 陶瓷则可用来制造 CO、CH₄、C₃H₈、乙醇和苯等多种气体传感器。此外，用 Fe₂O₃ 可制造检测丙烷的传感器，用 In₂O₃ 薄膜可以制造臭氧传感器，用 V₂O₅ 可以制造 NO₂ 传感器，等等。

湿度是水蒸气这种特殊环境物质的浓度表示法，因此，湿度传感器是气氛传感器的一个特例。很多氧化物半导体都可能有某种性质对湿度敏感，例如，掺铪 ZnO 膜的介电弛豫性质会随湿度变化，是制造湿敏元件的典型材料。

以集成电路为代表的半导体产业是近 50 年来发展最为迅速的产业。根据国际货币基金组织的统计和预测，从 1980 年到 2010 年，世界国民生产总值的平均增长率为 3%。其中，半导体工业的平均增长率为 15%，比整个电子工业 9% 的增长率也高很多。半导体产业正以这样的速度成长为世界经济的主流产业，并直接导致以其为基础的电子信息产业在新世纪初成为世界第一大产业。

通常将半导体产业划分为四大构成，即集成电路、光电子器件、敏感元器件、以及这两类器件之外的其他分立器件。表 0-1 所列为 2004 年世界半导体产业这四大构成的销售比例及其相对于上年度的增长情况^[2]。这些数据表明，虽然光电子器件和敏感元器件这两部分所占比例较小，但增长幅度较大，尤其是光电子器件远远超过了半导体产业的总增长率，这说明半导体光电子技术和传感器技术目前正处于发展上升阶段。其他半导体分立器件的增长率远低于半导体产业的总增长率，但将近 20% 的这样一个增长率相对于其他产业来说仍然是很高的。

表 0-1 2004 年世界半导体产业四大构成的销售比例及其相对于上年度的增长率

	集成电路	分立器件	光电子器件	敏感元器件	合计
销售额（亿美元） 及其比例	1781.3（83.7%）	159.6（7.5%）	137.8（6.5%）	48.9（2.3%）	2127.6
比上年增长	27.3 %	19.6 %	44.4 %	37 %	27.8 %

我国的半导体产业在改革开放之前完全靠“自力更生、艰苦奋斗”建立起来，基础比较薄弱，发展较慢，改革开放之后进入快速发展时期，并提出了 2020~2025 年前后成为世界半导体强国的战略计划。2004 年我国半导体产业销售额达到 996.5 亿元人民币，比上年增长 45%，远远超过了世界半导体产业的总增长率，但只占世界半导体市场的 5.64%，也远不能满足国内市场对半导体产品的需求，只能满足国内市场对半导体产品的超过 4000 亿元人民币巨大需求的不到 1/4。进入新世纪以来，我国半导体产业的技术水平已进入国际半导体产业发展的主流领域，在集成电路方面已拥有 0.35μm、0.25μm、0.18μm 和 0.11μm 生产技术。在材料方面，2004 年我国单晶硅产量和销售额分别比 2003 年增长了 54.3% 和 68.4%，增幅很

大,但在国际市场中所占份额极小。2003 年仅占全球硅片总销售额的 3%;2004 年进步很大,但也只占全球硅片总销售额的 4.1%。

2005 年底,国务院新闻办根据第一次全国经济普查结果发布消息称:我国国内生产总值 2004 年已达 159 878 亿元人民币(折合 19 317 亿美元),GDP 总量在世界 184 个国家和地区中位居第 6,已进入大国行列。但人均 GDP 不足全球平均值的 1/5,排在 100 名之后,而综合竞争力尚处于发展中国家水平。借鉴世界经济强国的发展经验,一些经济学家们提出了走微电子强国之路的战略思想。由此看来,新世纪的半导体科技将伴随着中华民族的复兴放射出更加耀眼的光芒。

参考文献

- [1] M. 罗杰斯, K. 拉森. 硅谷热. 范国鹰等译. 北京: 经济科学出版社, 1985.
- [2] 中国半导体行业协会, 中国电子信息产业发展研究院. 中国半导体产业发展状况报告. 2005.
- [3] 国家新材料行业生产力促进中心, 国家半导体照明工程研发及产业联盟. 中国半导体照明产业发展报告(2005). 北京: 机械工业出版社, 2006.