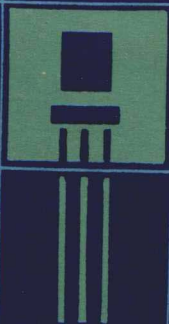
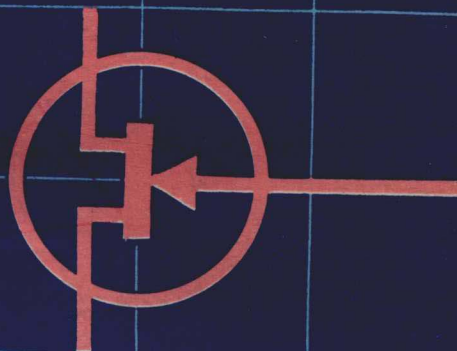


半导体



科学出版社
戴培



*D*ANDAOTI

TN 301

TN 301
6

半 导 体

戴 培 英

科学普及出版社

内 容 提 要

本书采用比喻、提问等手法通俗生动地介绍了半导体最基本的物理性质和应用。能带观点贯穿全书始终，极少地方运用了价键观点，以定性叙述为主，数学运算极少，取材得当，深入浅出。

如果您仅有中学文化水平，用本书帮助您打开半导体“神秘”大门是合适的，选本书作高中学生第二课堂读物也是很恰当的。

半 导 体

戴 培 英

责任编辑：陈金凤

封面设计：韩 琳

科学普及出版社出版（北京海淀区白石桥路32号）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京四季青印刷厂印刷

开本：787×1092毫米1/32印张：4.125 字数：90 千字

1987年2月第1版 1987年2月第1次印刷

印数：1—3,000册 定价：0.76元

统一书号：15051·1179 本社书号：1216

目 录

引言.....	1
一 什么是半导体	3
1.1 固体家族中的三兄弟.....	3
1.2 半导体有哪些奇怪的“脾气”	5
二 半导体为什么能导电	7
2.1 从原子谈起.....	7
2.2 半导体的内部结构.....	14
2.3 象带子般的能级.....	18
2.4 比金属多一种导电粒子.....	23
2.5 杂质的奇妙作用.....	26
三 载流子的三种运动模式	30
3.1 在电场中“游泳”	38
3.2 载流子会“死亡”吗.....	46
3.3 从一滴墨水染污一杯清水谈起.....	53
四 P-N结为什么有整流作用	60
4.1 一个奇怪的现象.....	60
4.2 有趣的阻挡层.....	62
4.3 P-N结是怎样整流的.....	67
4.4 另一种阻挡层.....	74
五 晶体管为什么有放大作用	81
5.1 重大的发明.....	81
5.2 两个P-N结相接触就能形成晶体管吗	82
5.3 晶体管是怎样放大电信号的	90

六 “神秘”的半导体表面.....	93
6.1 干净的表面	93
6.2 不干净的表面	96
6.3 半导体穿上了漂亮的外衣.....	101
七 半导体的光电效应	107
7.1 “响尾蛇”长了个特殊的眼睛.....	107
7.2 人造卫星上的电池.....	114
八 半导体的热电效应.....	119
8.1 一种新型的温度计	119
8.2 没有运动部件的发电机	121
8.3 半导体能“冻死”人吗	124

引言

我国古代的神话故事记载了许多“顺风耳”、“千里眼”之类的传说；《水浒传》里描写了一位英雄“神算子”蒋敬，他“精通书算，积万累千，丝毫不差”。今天的“顺风耳”——收音机，“千里眼”——电视机，以及比“神算子”还神通广大的电子计算机，都是无线电电子技术的巨大功劳。从这里可以看到科学技术的发展，给人类的生产和日常生活开辟了崭新的天地，为人类带来了多大的幸福啊！

无线电电子技术在生产、国防、科学研究，以及现代尖端技术领域，如原子能、火箭、导弹和宇宙航行等方面应用十分广泛。它这样神通广大，究竟是什么在起重要作用呢？人有十分重要的“心脏”，无线电电子设备也有最关紧要的“心脏”部件。这就是大家已熟知的电子管，以及比之更好更优越的晶体管和集成电路等。晶体管和集成电路由于具有重量轻、体积小、耗电省、寿命长和牢固可靠等一系列优点，而远胜于电子管，几乎在无线电电子技术的一切领域中都取代了电子管的地位。

晶体管和集成电路是由什么东西做成的呢？在今天能回答这个问题的人何止千万：是半导体做的。

对半导体的研究和利用，是第二次世界大战后在世界各个工业先进的国家中蓬勃发展起来的。解放前的旧中国，由于反动统治当局摧残科学和人材，在这方面的研究是一张白纸。

新中国成立后,才有少数人开始从事半导体的研究准备工作。我们的党中央于1956年提出了向科学进军的号召。国家科学远景规划将半导体技术的建立列为主要任务之一,半导体的科学研究与干部培养工作列入1956年的紧急措施范围之内。从此半导体技术在我国就处于不断发展、日益提高的过程中,与世界先进水平的差距趋于缩小。然而,林彪、“四人帮”却给我国科学事业带来了灾难性的破坏,缩小了的差距重新拉大。党中央一举粉碎了“四人帮”,给我国带来了“科学的春天”!我国半导体科学事业又蓬勃发展起来了!

这本小册子,着重介绍半导体最基本的物理性质,对它的应用也作了简略介绍。全书以能带观点贯穿始终,部分运用了价键的观点;采用比喻提问等写法,并配入大量插图,较为通俗易懂。但愿本书能有助于读者去打开半导体这一学科的“神秘”大门。

承蒙原西安交通大学半导体教研室杜学颜同志审阅全书,并提出许多宝贵的意见,编者对此表示感谢!

编 者

一 什么是半导体

1.1 固体家族中的三兄弟

自然界中，存在着许许多多不同性质的物质。各种物质都是由一种或几种基本元素组成的。所谓基本元素，就是门捷列夫元素周期表上所列的一百余种元素。在通常情况下，物质按其状态来分有三类：一是气态物质，二是液态物质，三是固态物质。

固态物质一般称为固体。通常温度下，如果按它的导电本领来分，有的物质很容易传导电流，就称为导体。金属一般都是导体，如金、银、铜、镁、铝和铁等。有一类固体物质几乎不让电流通过，通常称为绝缘体，如石英、玻璃、橡胶、陶瓷、塑料和金刚石等。这两类物质都可以用作电工材料，所以很早就被人们认识和利用。比如，传输电流的导线是用铜、铝做成的，传输线上的绝缘子是用陶瓷做成的。若说导体和绝缘体是固体家族中的老大和老二。介于两者之间还有一类物质，因为它的导电本领不如老大，绝缘性能又不如老二，历史上长期没有得到工业上的利用，也就没有得到科学家们的重视。只有硒几乎是唯一的例外，它的光电导性质在上世纪七十年代便被人们发现了。用在矿石收音机里的方铅矿（ PbS ），作为无线电检波器亦是使用得比较早的；但是它的性能不稳定，使用方法一直处于比较粗糙的地步。直到1926

年制造了工业上用的氧化亚铜 (Cu_2O) 整流器,1932年制成了具有阻挡层的氧化亚铜固体光电池,才使人们对半导体的兴趣陡然增加。从此长期不被重视的半导体研究状况发生了改变。第二次世界大战期间,在雷达装置中开始使用硅与锗的检波器。由于它们的电容极小,应用在超高频电路中比真空二极管要优越得多,因而逐渐得到广泛的应用。这样,人们对半导体的研究也就大大地扩展和深入了。然而,半导体研究的黄金时代是从本世纪四十年代(1948年)晶体三极管的发明开始的,这是在战后对硅、锗材料进行大量研究的直接结果。例如,重要的半导体材料硅、锗、砷化镓、大多数金属氧化物和硫化物等的性质和利用都相继得到深入研究。由于半导体“出世”较晚,所以被排行为老三。如图1.1所示。

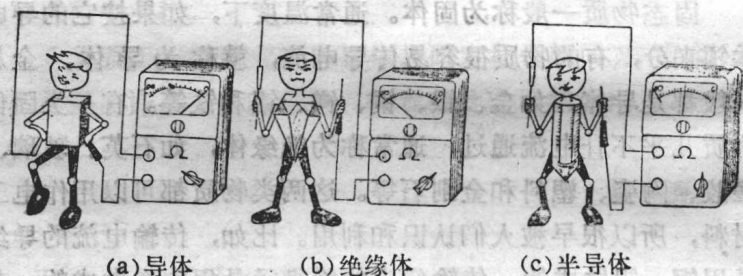


图 1.1 固体家族中的三兄弟

电工学区分这三兄弟,一般用标志物质导电能力大小的“电阻率”来表示。所谓电阻率是指长1米、截面积1平方米的该物质的电阻值。单位是欧姆米。电阻率的倒数称电导率,单位是1/欧姆米。它们都是反映物质导电本领大小的物理量。电阻率愈低,或者说,电导率愈高,物质的导电本领愈强。金属导体的电阻率很小,约 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ 欧姆米,或电导率约

$10^8 \sim 10^{11}$ /欧姆米；绝缘体的电阻率很大，约 $10^8 \sim 10^{18}$ 欧姆米，或电导率很小，约 $10^{-8} \sim 10^{-18}$ 1/欧姆米；而半导体的电阻率正好介于老大、老二之间，约 $10^{-5} \sim 10^0$ 欧姆米，或电导率约 $10^5 \sim 10^6$ 1/欧姆米。（注：本书将经常用0的多少次方来表示某个物理量的大小。多一次方，就是多一个数量级，即多10倍。）

为什么长期被忽视的半导体，今天忽然引起人们的巨大兴趣呢？原因是老三“出世”较顺，“脾气”特怪。一旦认识了它的奇怪“脾气”后，顺着它就能为人类作出巨大贡献！

1.2 半导体有哪些奇怪的“脾气”

实践发现，同一块半导体，它的导电能力在不同情况下，有非常大的差别。

例如，当光线照射到某些半导体上时，它们表现出很强的导电能力。无光照时，它们又恢复原来的电阻值。这种现象叫做光电导。于是利用这种怪脾气，做出各种各样用于自动控制等的光电器件（如光电二极管、光敏电阻等）。

再如，它的导电能力随外界温度的改变非常敏感，象纯锗，温度从 20°C 升高到 30°C ，电阻率就要下降一半左右。而金属铜，那怕温度升高 100°C ，它的电阻率还增加不到一半。利用半导体这种脾气，做成了自动控制用的热敏元件（如热敏电阻等）。

更为奇怪的是，如果在一块纯净的半导体中掺入微量杂质，可以引起电阻率很大的改变。这种情况在金属中是不存在的。例如，在纯硅中加入百万分之一的硼或磷，硅的电阻率就从2140欧姆米减少到0.004欧姆米左右。根据这种性质，可以用不同的掺杂方法，制造出花样繁多、具有不同性能和

用途的半导体器件（如晶体管、集成电路等）。

当然，半导体还有其它一些怪脾气，上面仅介绍了特别突出的几点。那么为什么半导体能导电？杂质又为什么能起这么大的作用呢？

固体的大都是非晶，不
能指出其原子，因此其性质与某些液体相似，或则
更相似。晶体由原子或分子组成，排列有序。晶体中原子的
自由运动与液体相似，但晶体中原子的运动受到晶格的限制，
只能在晶格点附近运动。晶体中原子的运动与液体中原子的运
动不同，晶体中原子的运动是定向的，而液体中原子的运动是
无定向的。晶体中原子的运动与液体中原子的运动不同，晶体
中原子的运动是定向的，而液体中原子的运动是无定向的。晶
体中原子的运动与液体中原子的运动不同，晶体中原子的运动
是定向的，而液体中原子的运动是无定向的。晶体中原子的运
动与液体中原子的运动不同，晶体中原子的运动是定向的，而
液体中原子的运动是无定向的。晶体中原子的运动与液体中原
子的运动不同，晶体中原子的运动是定向的，而液体中原子的
运动是无定向的。晶体中原子的运动与液体中原子的运动不同，
晶体中原子的运动是定向的，而液体中原子的运动是无定向的。
晶体中原子的运动与液体中原子的运动不同，晶体中原子的运
动是定向的，而液体中原子的运动是无定向的。晶体中原子的
运动与液体中原子的运动不同，晶体中原子的运动是定向的，
而液体中原子的运动是无定向的。晶体中原子的运动与液体中
原子的运动不同，晶体中原子的运动是定向的，而液体中原子
的运动是无定向的。晶体中原子的运动与液体中原子的运动不
同，晶体中原子的运动是定向的，而液体中原子的运动是无定
向的。晶体中原子的运动与液体中原子的运动不同，晶体中原
子的运动是定向的，而液体中原子的运动是无定向的。晶体中
原子的运动与液体中原子的运动不同，晶体中原子的运动是定
向的，而液体中原子的运动是无定向的。晶体中原子的运动与
液体中原子的运动不同，晶体中原子的运动是定向的，而液体
中原子的运动是无定向的。晶体中原子的运动与液体中原子的
运动不同，晶体中原子的运动是定向的，而液体中原子的运动
是无定向的。晶体中原子的运动与液体中原子的运动不同，晶
体中原子的运动是定向的，而液体中原子的运动是无定向的。

二 半导体为什么能导电

2.1 从原子谈起

要想了解半导体为什么能导电，就得深入到它的内部去观察。象孙悟空钻到铁扇公主的肚子里一样，可以看个一清二楚。大家知道，自然界中各种物质都是由元素周期表中的各种元素的原子组成的。有些物质是由单一元素的原子组成的，如金刚石（碳原子组成）、硅和锗等。有些物质是由多种元素的原子组成的，如砷化镓、磷化镓、氧化亚铜、硫化铅……等。所以，要了解各种物质的内部结构，还得从原子的性质谈起。

对原子结构的了解，经历了很长的发展过程。最早是公元前四世纪的古希腊哲学家德谟克利特猜测原子是物质的不可分割的最小单元。长期的科学实践证明，原子并不是不可分割的最小单元，而是具有内部结构和一定大小的物质。那么原子内部究竟是个什么样子呢？看来还得学习孙行者的本领，把自己想象得比原子还要小，以便于钻进原子内部看个究竟。原子的线度约为亿分之一（ 10^{-8} 厘米）。进到原子内部后，就会发现，啊！原子内部原来是个宽广的世界，跟太阳系很相象，如图2.1(a)所示。它的中央有个“小太阳”——原子核，其线度只有原子的万分之一至十万分之一，质量密度却很大，而且带有正电荷。此外，有一些极其微小的电子，象行星围绕太阳运动一样，它们沿着自己的“轨道”绕着原子核

运转，每个电子自身也还会旋转（自旋），就如同地球的自转一样。那么它带有电荷吗？这么小的东西，质量也一定很小吧！是的，每个电子仅带有 1.6×10^{-19} 库仑的负电量，而且是目前为止所发现的带电量最少的粒子之一^①。它的线度约为万亿分之一（ 10^{-12} ）厘米。它的质量大约是氢原子核质量的1836分之一，数值是 9.1×10^{-28} 克。

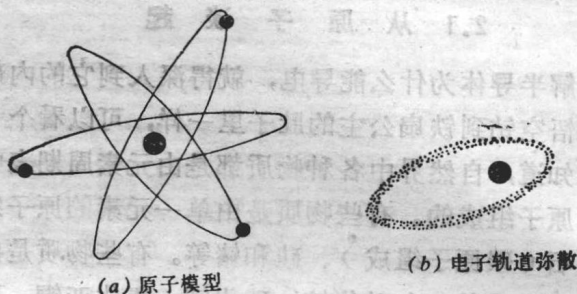


图 2.1 原子世界

仔细地瞧瞧每一个电子运动的“轨道”时，发现这些轨道不象用钢笔画一个圆圈或一个椭圆那样线条清楚，而是稍有弥散的，形成所谓“电子云”，如图2.1(b)所示，好像是夜晴空中的银河，这正是近代量子力学的功劳。为了叙述方便起见，我们以后还是把轨道画成线条状。

当进一步观察各种原子的内部情况时，还发现，任何元素的原子，它的电子都是一层层分布的，形成电子壳层结构。这是什么道理？电子为什么不可以都分布在内层或外层呢？

原来电子在原子中的分布要遵从下列两个法则。第一个法则，是能量最小原理。比如，水总是从高处（势能高）流向

① 不久前有的研究单位宣布，他们发现了带有 $1/3$ 或 $2/3$ 个电子电量的粒子。

低处（势能低）。电子也是这样，先从最内层分布起。因为在内层轨道上运动的电子能量最小，受原子核正电荷的束缚作用（库仑吸引力）最强和最稳定。与电子运动轨道对应的能量是它和原子核相互作用的势能、和原子中其它电子相互作用的（库仑排斥力）势能以及自身的动能之和，而且取负值。越往外层能量越高（负值越小），直到完全脱离原子核的束缚作用时，成为完全自由的电子。静止的自由电子能量定为零。各个电子运动轨道对应的能量是不连续的，形成一个个的能级，好象楼梯一样。运动的自由电子，具有与运动速度对应的动能，这个能量是连续的（因为它不属某个原子所有），而且取正值。第二个法则，就得向泡利教授请教。他是奥地利的物理学家，于1925年提出著名的“不相容原理”，说明电子是怎样在每一个壳层中分布的。据他提出的原理，在同一壳层内不可能有两个电子具有完全相同的能量和自旋。或者说，在同一个原子中，不可能存在两个以上的电子具有完全相同的运动状态。好象一个座位不能同时坐两个人一样。这就排除了电子都聚集在一个壳层的可能性。泡利因这一发现而获得了1945年的诺贝尔物理学奖。

那么，电子填充壳层的顺序和数目是怎样的？为此我们将电子在原子中各个轨道壳层均简化成圆形，如图2.2(a)所示。对应的能级画在(b)图中。这里只画出K, L, M, N（对应的能量为 $1E, 2E, 3E, 4E$ ）四个主壳层，每一个主壳层有s, p, d, f等（对应的能量为 E_0, E_1, E_2, E_3 ）支壳层。唯有第1（K）主壳层例外，只有一个s支壳层，能填充自旋相反的两种不同运动状态的电子，记作 $1s^2$ ，对应的能级是 $1E_0$ 。(2)。E左边的系数1表示主壳层（K）数；右下角的0表示支壳层（s）数；括号内是电子数，也是不同运动状态数。依

此类推，第2 (L) 壳层，可容纳8个电子，记作第 $2s^2$ ， $2p^6$ ，对应的能级为 $2E_0(2)$ ， $2E_1(6)$ 。第3 (M) 壳层，能容纳18个电子，记作 $3s^2$ ， $3p^6$ ， $3d^{10}$ ，对应的能级为 $3E_0(2)$ ， $3E_1(6)$ ， $3E_2(10)$ 。第4 (N) 壳层能容纳32个电子，记作 $4s^2$ ， $4p^6$ ， $4d^{10}$ ， $4f^{14}$ ，对应能级为 $4E_0(2)$ ， $4E_1(6)$ ， $4E_2(10)$ ， $4E_3(14)$ ……等。(实际上， $3d^{10}$ 的能级 $3E_2(10)$ 比 $4s^2$ 的能级 $4E_0(2)$ 要高)。原子中的电子就是不违背泡利不相容原理的前提下，按照能量最小原理去填充原子中各个能级和占有各个运动状态的。好象圆形运动场中看台上的观众，都想占有前排座位，一旦坐满最前排，其余的只好被排斥到第二排、第三排……等。

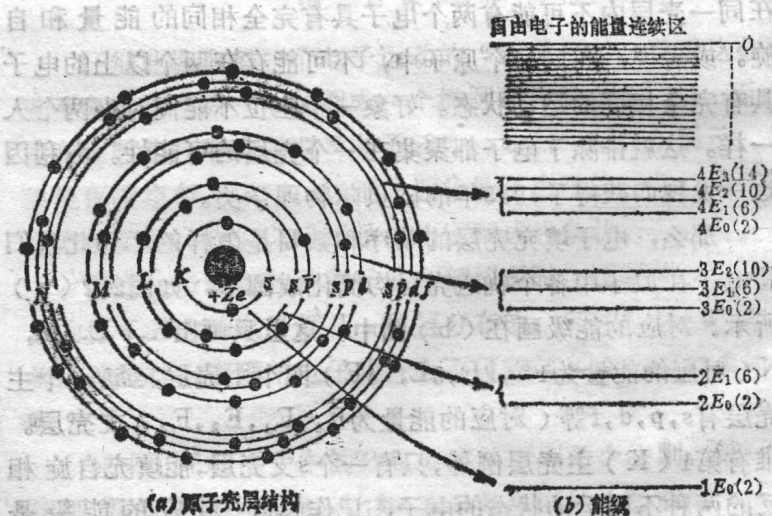


图 2.2 原子的电子壳层和能级

元素周期表

族 周期	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0
1	1 H 氢								2 He 氦
2	3 Li 锂	4 Be 铍	5 B 硼	6 C 碳	7 N 氮	8 O 氧	9 F 氟		10 Ne 氖
3	11 Na 钠	12 Mg 镁	13 Al 铝	14 Si 硅	15 P 磷	16 S 硫	17 Cl 氯		18 Ar 氩
4	19 K 钾	20 Ca 钙	21 Sc 钪	22 Ti 钛	23 V 钒	24 Cr 铬	25 Mn 锰	26 Fe 铁	36 Kr 氪
5	37 Rb 铷	38 Sr 锶	39 Y 钇	40 Zr 锆	41 Nb 铌	42 Mo 钼	43 Tc 锝	44 Ru 钌	54 Xe 氙
6	55 Cs 铯	56 Ba 钡	57-71 La-Lu 镧系	72 Hf 铪	73 Ta 钽	74 W 钨	75 Re 铼	76 Os 锇	86 Rn 氡
7	87 Fr 钫	88 Ra 镭	89-103 镥系	104 Db 𨭎	105 Nh 𨭉	106 Lv 𨭊	107 Ts 𨭋		

57-71 镧系元素	57 La 镧	58 Ce 铈	59 Pr 镨	60 Nd 钕	61 Pm 钷	62 Sm 钐	63 Eu 铕	64 Gd 钆	65 Tb 铽	66 Dy 镝	67 Ho 铥	68 Er 铒	69 Tm 铥	70 Yb 镱	71 Lu 镥
89-103 镥系元素	89 Ac 锕	90 Th 钍	91 Pa 钷	92 U 铀	93 Np 镎	94 Pu 钷	95 Am 镅	96 Cm 锔	97 Bk 锫	98 Cf 锿	99 Es 镄	100 Fm 镆	101 Md 镨	102 No 镎	103 Lw 𨭎

凡是壳层被电子填满的原子，其化学性质特别稳定，如氦、氖、氩……等惰性气体。

然而，并不是所有电子壳层都完全填满，不同元素的原子，电子填充情况也不一样。例如，钠原子，有11个电子，填充了第K、L壳层后，还剩下一个电子填到第M壳层的S支壳层上，所以它的第M壳层几乎是空的，此壳层中的S支壳层也只是半满。因此它容易丢失一个价电子，成为具有满壳层结构的金属钠离子(Na^+)。

由于电子顺序填充各个电子壳层的结果，各种原子的性质也周期地改变，这就解释了“元素周期表”的周期性。在表上，每一元素符号上方的数字称为原子序数 Z ，等于这种元素原子中的电子数。如果一个电子的负电荷量用 $-e$ 表示，则原子核的正电荷量，就等于 $+Ze$ 。周期表的每一横行叫做一个“周期”，元素所在周期数就是这种元素原子的电子壳层数。周期表的每一竖行叫做一“族”，族数等于原子最外层的电子数（称为价电子）。例如，第IV族的碳原子序数 $Z=6$ ，分布在 $1s^2, 2s^2 2p^2$ ，第二壳层不满，处于第二周期，其中的p支壳层不满，尚欠4个电子。硅元素的 $Z=14$ ，电子分布在 $1s^2, 2s^2 2p^6, 3s^2 3p^2$ ，处于第三周期。锗元素的 $Z=32$ ，电子分布在 $1s^2, 2s^2 2p^6, 3s^2 3p^6 3d^{10}, 4s^2 4p^2$ ，处于第四周期。可见，这三种元素都是四个价电子，归同一族，而且都是最外主壳层中的p支壳层只填了二个电子。此外，在它们相邻两旁还有两族重要的元素，如第三族的硼、铝、镓、铟等，最外层都是3个价电子；第五族有磷、砷、锑等，最外层都是5个价电子。这两族元素所组成的化合物称为金属间化合物，如砷化镓、磷化铟等，这是很重要的一类半导体材料，它们也是硅、锗中的重要掺杂原子。