

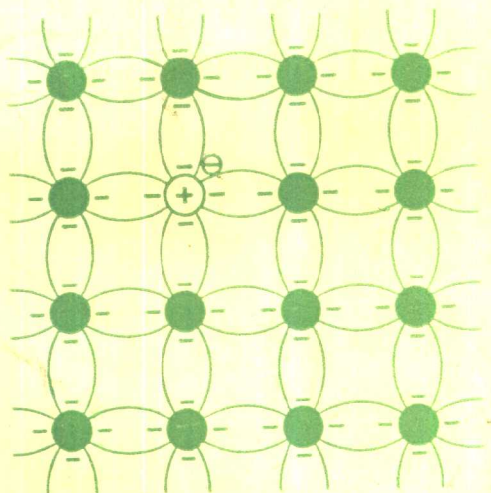
中学生课外读物

现代科学技术丛书



# 微电子学进行曲

王云珍 著



人民教育出版社

中学生课外读物  
现代科学技术丛书

# 微电子学进行曲

王云珍 著

微电子学是在电子学基础上发展起来的一门新的学科。它主要利用固体内部的微观特性和特殊的加工技术,使一块微小体积的固体能具有一种或多种功能的完整电路或部件的特性。微电子器件已在电子计算机、宇航事业和日新月异的民用电子产品方面,发挥着重要作用。本书系统地介绍了微电子学的发展过程,从半导体的特性、晶体管的问世到大规模集成电路的研制和微电子器件的应用,做了深入浅出的解说,语言生动有趣,引人入胜。

本书可供对微电子学有兴趣的高中学生和具有中等文化程度的一般青年阅读,也可供中学教师参考。

中学生课外读物  
现代科学技术丛书  
**微电子学进行曲**  
王云珍 著

人民教育出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
人民教育出版社印刷厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 3.5 字数 70,000  
1985年5月第1版 1986年4月第1次印刷  
印数 1—4,700  
书号 7012·0953 定价 0.47 元

《现代科学技术丛书》

**物理学科编委会**

主编 王殖东

编委 (按姓氏笔划为序)

王殖东 祁有龙 吕如榆 刘佑昌

张元仲 聂玉昕 唐孝威 郭奕玲

中学生课外读物  
《现代科学技术丛书》

## 第二辑 目录

从距离谈起

丁夏畦 李工宝 著

密码

万哲先 刘木兰 著

探索新元素

沙际云 著

微电子学进行曲

王云珍 著

正负电子对撞实验

唐孝威 著

近代物理实验史的启示

郭奕玲 著

说古道今话萃取

高春满 著

辐射·核·人

吕维纯 著

植物生态与自然保护

鲍显诚 陈佐中 林舜华 编著

免疫学基础

戴顺志 编著

海洋探测的今天与明天

许启望 著

书号 7012-0953

定价 0.47 元

N4  
4

# 目 录

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 引言 微电子学的脚步声              | 1   |
| 一、微观世界的奥秘                | 6   |
| (一) 原子家庭                 | 7   |
| (二) 电子时代的宠儿——半导体         | 11  |
| (三) 探索新材料                | 26  |
| 二、电子学发展史上的里程碑——晶体管的问世    | 34  |
| (一) 奇妙的 pn 结             | 34  |
| (二) 晶体管的命名               | 42  |
| (三) 晶体管电流传输的三部曲          | 44  |
| (四) 晶体管的制造工艺             | 49  |
| (五) 晶体管的家谱               | 56  |
| (六) “麻雀虽小、五脏俱全”——晶体管特性介绍 | 62  |
| 三、微电子学的骄傲——集成电路与超大规模集成电路 | 76  |
| (一) “青出于蓝而胜于蓝”——集成电路的诞生  | 76  |
| (二) 在晶片上精雕细刻——集成电路基础工艺介绍 | 80  |
| (三) 在集成电路的行列中——典型电路介绍    | 86  |
| (四) 用电脑设计电路——CAD 技术      | 96  |
| 四、微电子器件活跃在先进技术领域中        | 103 |
| (一) 电子计算机的更新换代           | 103 |
| (二) 宇航事业的神经中枢            | 105 |
| (三) 日新月异的民用电子产品          | 105 |

## 引言 微电子学的脚步声

微电子学是在电子学基础上发展起来的一门新的学科。它主要利用固体内部的微观特性和特殊的加工技术，使一块微小体积的固体能具有一种或多种功能的完整电路或部件的特性。那么，这门学科的发展过程是怎样的呢？

### 从第一代电子计算机的问世说起

那是在 1946 年，世界上诞生了第一台用电子管组装成的电子计算机，它取名为“埃尼阿克”(ENIAC)。这台电子计算机虽然具有能在 1 秒内计算 5000 次的运算速度，但它的重量约有 30 吨，体积为 90 立方米。一台计算机要占有三个大房间。显然，计算机这么笨重的躯壳，给使用带来了很多不便。怎样对计算机进行“减肥”，使它逐渐达到小巧精致，能随手拿来方便使用呢？也就是说，电子计算机等电子设备的小型化是当时从事电子技术研究的人们所共同关心的问题。是不是可以从电子管本身的小型化着手？人们发现，电子管的进一步小型化的潜力是有限的。因为电子管本身结构比较复杂，假如进一步缩小体积，就会使加工制造遇到很大困难。而且要求电子设备要具有多种功能，它的线路就更为复杂，在一台设备中就需要有数量很多的电子管等元件。如在“埃尼阿克”

号计算机中,就包含了18 000多个电子管,这就使电子管耗电量大的缺点更加突出。鉴于电子管的这种状况,必须另外去寻找电子器件小型化的途径。

## 晶体管的诞生

在绚丽多彩的世界中,存在着形态各异的物质。对这些千姿百态的物质可以按不同的属性把它们分类。如金、银、铜、铝等金属材料能够导电,称为**导体**;相反,橡皮或塑料等材料不容易导电,称为**绝缘体**。在能否导电这一点上,导体与绝缘体的性能是完全不同的。在本世纪的四十年代末、五十年代初,在对固体材料深入研究的基础上,人们找到了一种导电性能介于导体和绝缘体之间的新材料,这就是称为**半导体**的锗(Ge)和硅(Si)。并且在当时的技术条件下,已能把这种天然开采的锗、硅矿石制备成单晶体。半导体单晶材料的出现,吹响了科学技术向电子时代进军的序曲,标志着新一代的电子时代的来临。

半导体这种新颖的材料所以具有迷人的魅力,就在于它的导电性能可以由外界条件控制,并能加以改变。譬如使半导体受热或光照(图1),或者在半导体中加入其他微量杂质,

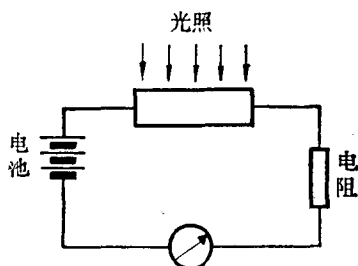


图1 光照使半导体导电能力增加

就会使半导体的导电能力成百万倍地发生变化。这种性能是导体或绝缘体材料所没有的。正是这种特性，使半导体成为适于作为新一代的电子器件的材料，为电子器件的发展作出了贡献。

由于看到了半导体的这种潜在的功能，在四十年代中期，美国著名的贝尔实验室成立了以半导体作为探索方向的固体物理研究小组。图 2 的照片中的三位科学家就是研究小组的核心人物。中间的一位，是著名的固体物理学家肖克莱 (W. Shockley)，他从理论上研究并阐明了半导体的各种物理性质，因而提出了可以由加在半导体表面的电场来调制半导体内部的电流，以实现用晶体做放大器的设想；左边的一位是巴丁 (J. Bardeen，他是至今唯一的二次诺贝尔物理学奖金的获得者)，他是运用基本理论解决实际问题的宗师；右边的一位



图 2 贝尔实验室的物理学家

是布拉坦(W. H. Brattain),他是善于巧妙地进行各种实验的能手。他们互相配合默契,经过一段时间的研究,终于在1947年12月23日试制成了世界上第一只固体放大器,即晶体管(由于这项贡献,他们三人于1956年被授予诺贝尔物理学奖金)。利用半导体晶体所具有的特性,在一块锗片(或硅片)上做成的放大器就称为**晶体管**。因为它有三个电极,所以通常也称为**三极管**。

从第一只点接触型的晶体管发展到六十年代初的平面型的,更显示了晶体管的一些优点:

(1) 体积小。一只平面型晶体管可以小到一粒芝麻那样大;

(2) 重量轻。由于体积这么小,可以想到它的重量是很轻的,因此用晶体管来组装的电子设备就很轻巧,使用便利;

(3) 寿命长。对电子管来说,即使是质量比较好的管子,因受其阴极表面发射电子能力的影响,正常使用寿命只达1—2万小时,而晶体管的使用寿命从理论上讲是无限的;

(4) 可靠性高。晶体管是在一块硅单晶体上做成的,结构比较密集,管芯用涂料覆盖密封后,受外界环境影响较小,因此晶体管性能可靠、稳定;

(5) 生产成本低。平面型晶体管制造时,在一块单晶硅片上,用同样的工序,可以同时生产出几百只管芯,所以生产成本低廉。

晶体管的发明,标志电子器件已发展到了新一代——第二代电子器件。由于晶体管具有上述的优点,因此在很多方面取代了电子管,而活跃于电子技术的领域中。

## 电路的微型化、再微型化——超大规模集成电路的诞生

从平面晶体管的制造中,人们得到一个启迪:是否可以把电阻、电容等元件也做在晶体管的同一晶片上?也就是,在一块单晶片上把晶体管、二极管、电阻和电容等元件按原来电子线路的要求把它们全部集成在一起,成为一个完整的电路。这一设想是在1958年由美国科学家吉尔比(J. Kilby)完成的。他把晶体管、二极管、电阻等元件集成为一个单一的整体,做在一块薄薄的硅片上,并使它具有电子线路的功能。这就是世界上第一块**集成电路**的问世。人们把在一块晶片上集成10—100个晶体管等元件的集成电路称为**小规模集成电路**。到1964年制成了有477个晶体管的中规模集成电路。也就是把在一块晶片上集成100—1000个晶体管等元件的集成电路称为**中规模集成电路**。中、小规模集成电路代表更新的第三代电子器件,它的诞生表明人类已进入更先进的新的微电子学时代。集成电路打破了元件和线路分开的传统观念,使原来的一台电子设备、一架收音机、一台电视机或一台电子计算机就可以由一块或数块集成电路拼装起来,这样原来设备上许多的外连线,基本上在集成电路内部完成了,使电子设备的可靠性大大提高;电子器件的微型化使电子设备的体积和重量也大大减小了。仍以电子计算机为例,第二代电子计算机即晶体管型的电子计算机的重量减小到只有几百公斤,一个小房间就可容纳得下了。到了第三代电子计算机,即中、小规模集成电路型电子计算机,重量就不过十几公斤,大小已经和一张书桌差不多了。到了七十年代,随着科学技术的蓬勃发展,如航天事业的崛起,新式军用仪器装备的使用,以及家

用电子设备的发展，都对电子器件的微型化提出了更高的要求。也就是要求集成电路微型化、再微型化。这就使在单块芯片上包含有 1000 个以上的晶体管等元件的大规模集成电路即第四代电子器件问世。用这种大规模集成电路组装的第四代电子计算机，重量竟然不到一公斤，把它装进手提包还绰绰有余。到七十年代后期，人们又完成了在一块  $30\text{ mm}^2$  的晶片上集成十二万八千个晶体管等元件的超大规模集成电路。这就是第五代电子器件。

从 1958 年第一只集成电路诞生，宣告人类进入微电子学时代的开始，在这短短的二三十年间，电子器件经历了更新换代、欣欣向荣的伟大变革。从这里我们不是可以听到微电子学发展的脚步声吗？让我们在雄壮的进行曲中，踏着时代的步伐，去进一步揭示微电子王国的奥秘吧！

## 一、微观世界的奥秘

什么叫**微观世界**？微观世界是相对于**宏观世界**而讲的。人类生活的世界就是一个宏观世界。但当我们深入到物质的内部去研究组成物质的分子、原子以及它们的运动规律，那么就进入了微观世界。就好象著名的童话小说《格利佛游记》中的主人公格利佛来到了小人国一样。当然现在这个“小人”国要比格利佛到过的小人国还要小得多，而且小人国里的“主人”是分子、原子。

让我们到微观世界这个“小人”国里去旅游，去观赏一下

“异国”的风光，以深刻认识微观世界(图 3)的奥秘!

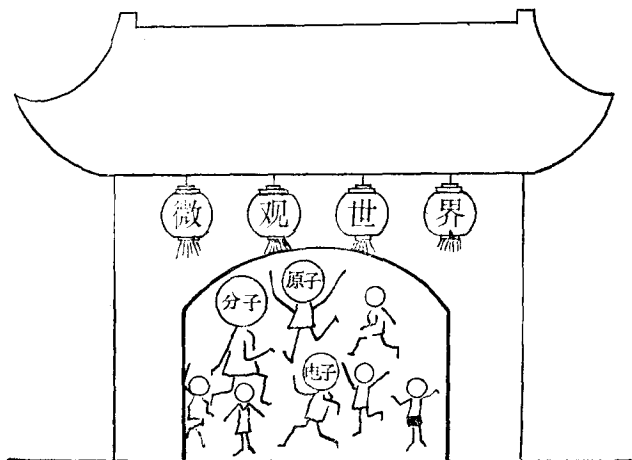


图 3 微观世界示意图

## (一) 原子家庭

1. 原子的核模型 在 19 世纪以前，人们对物质的认识是很粗浅的。认为任何物质都是一种坚固的实体，就好象实心汤圆一样，是没有空隙的。直到 1911 年英国物理学家卢瑟福，他一反人们习惯的看法，创造性地提出了原子的核模型学说。所谓原子的核模型，就是把原子看成是由处在原子中心的原子核和绕核不停地运动的电子所组成的。对每一种原子，原子核所带电量为  $+Zq$ 。 $Z$  称为原子序数，也就是原子中的电子数。如氢原子的原子序数  $Z=1$ ，那就是说氢原子核带电量为  $+q$ ，核外只有一个电子。 $q=1.6 \times 10^{-19}$  库仑。一个电子的电量为  $-q$ 。所以按核模型的观点来看：原子核所带正电

量与核外电子的总电量相等，因此原子是电中性的。电子的静止质量  $m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$  千克，约为氢原子核质量的  $1/1836$ ，原子的质量主要集中在原子核内。

在原子内，电子不停地绕核运动，它们跟原子核之间，以及电子之间都存在着复杂的电磁作用，由于这种电磁相互作用才使各电子和睦相处，使原子成为一个稳定的系统。原子内部的相互作用对电子的约束主要表现在：

(1) 电子在原子内不能任意“乱跑”，它们的能量也不能有任意的值。这就是说，电子的运动是受到限制的，它只能处在某些特定的状态，对应的有特定的能量。如果把电子的能量  $E$  按大小从下往上排列，就形成一个能量的“阶梯” $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ ……，如图 4 所示，称为能级。电子可以处在任一能级上，但决不会出现在二个能级之间，因此它必须具有某一确定的能量  $E$ 。

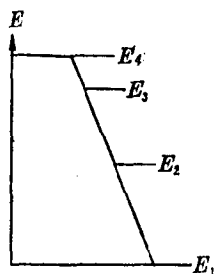


图 4 电子的能级

(2) 电子之间存在一个不相容的性质。即在每一个能量状态中，可以是空着的没有电子，也可以有一个电子，但绝不能同时有两个或两个以上的电子。这就是说，在一个能量状态中，电子之间是不相容的。

(3) 原子内各电子的能量取值，通常必须使整个原子的能量为最小，因而能达到稳定、牢固。

2. 能级和能量状态 能级和能量状态有什么区别呢？对于不同的能级，在物理学中通常用量子数  $n$  来标志。 $n$  取从

1 开始的正整数, 即  $n=1, 2, \dots$ 。

如  $n=1$ , 为第 1 能级, 又称为电子的  $K$  壳层;

$n=2$ , 为第 2 能级, 又称为电子的  $L$  壳层;

$n=3$ , 为第 3 能级, 又称为电子的  $M$  壳层;

$\dots$ 。

在同一能级上可以存在几个不相同的状态。这好比一幢大楼内, 同一层次内可以有好几个房间, 当然对于不同的层次, 房间数的多少可以是不同的。从理论上算得: 对于量子数为  $n$  的能级共有  $2n^2$  个能量状态。

如  $n=1$ ,  $K$  壳层可以有 2 个能量状态;  $n=2$ ,  $L$  壳层可以有 8 个能量状态;  $\dots$ 。

我们以半导体材料硅为例。硅原子的原子序数  $Z=14$ , 它的核外有 14 个电子, 那么这 14 个电子将按一定的规律进行排列, 见图 5 甲。

$n=1$ ,  $K$  壳层的 2 个能量状态全部被电子占有;

$n=2$ ,  $L$  壳层的 8 个能量状态全部被电子占有;

$n=3$ ,  $M$  壳层共有 18 个能量状态, 其中只有 4 个能量状态被电子占有, 其余都是空状态。

可见原子中的电子是从  $n=1$  的低能级逐渐向高能级分布的。

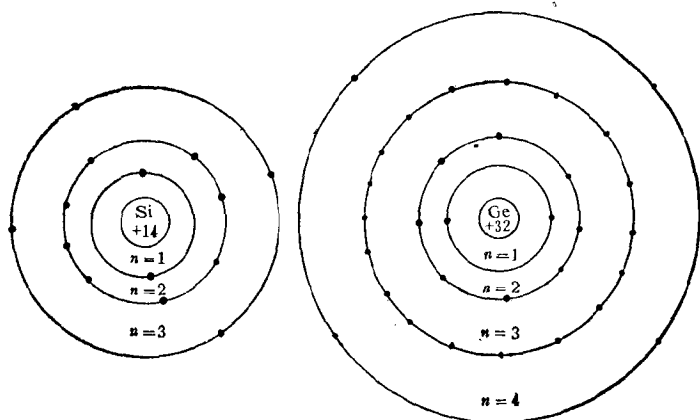
对于另一种半导体材料锗, 它的原子序数  $Z=32$ , 那么核外的 32 个电子也是从低能级向高能级分布, 见图 5 乙。

$n=1$ ,  $K$  壳层的 2 个能量状态全部被电子占有;

$n=2$ ,  $L$  壳层的 8 个能量状态全部被电子占有;

$n=3$ ,  $M$  壳层的 18 个能量状态全部被电子占有;

$n=4$ ,  $N$  壳层的 32 个能量状态, 只有 4 个被电子占有, 其



甲：硅原子

乙：锗原子

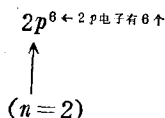
图5 原子中电子的分布

图中最中心的圆表示原子核，核外圆周上的小黑点代表电子。

余都是空状态。

可见，电子在原子核外，按能级由低到高，由里到外，层层环绕。这种情况称为**电子的壳层结构**。进一步还发现，在同一壳层中的电子，它们的能量并不完全相同，还是略有差别的，因此又把它们区别为  $s$  电子， $p$  电子， $d$  电子， $f$  电子，等等。在同一壳层中  $s$  电子的能量最低，其余的电子能量依次增高。理论上还证明，在同一壳层中，最多只能有  $s$  电子 2 个； $p$  电子 6 个； $d$  电子 10 个； $f$  电子 14 个，……。如硅的  $K$  壳层中有 2 个电子，即为  $s$  电子，记为  $1s^2$ ； $L$  壳层中有 8 个电子，其中有 2 个是  $s$  电子，以  $2s^2$  表示，其余 6 个是  $p$  电子，以  $2p^6$  表示； $M$  壳层中有 4 个电子，其中 2 个是  $s$  电子，以  $3s^2$  表示，还有 2 个是  $p$  电子，以  $3p^2$  表示。所以硅原子内电子的排

列可以用符号表示为  $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^2$ ；而锗原子中电子的排列用符号表示为  $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^{10}, 4s^2, 4p^2$ 。其中符号



表示  $n=2$  的  $L$  壳层中有  $p$  电子(此时为  $2p$  电子) 6 个。

填满电子的壳层称为闭壳层，闭壳层内的电子称为内层电子，如  $1s, 2s$  电子。而离核远的最外层电子称为价电子，如硅的  $3s, 3p$  电子，锗的  $4s, 4p$  电子。由于价电子受原子核的影响最小，因而也最活跃，它们对材料的导电性起着主要的作用。

## (二) 电子时代的宠儿——半导体

半导体为什么能成为电子时代的宠儿，吸引着人们的注意力呢？在这里我们将作进一步的讨论。

1. 电子的共有化，能带的形成 我们先来看一下由两个硅原子构成的双原子系统。假定两个原子彼此离得很远，那么它们之间的相互作用就很弱，或者说它们之间没有相互作用。它们中的任一个的运动与另一个无关，彼此独立，因而它们各自的电子象在单个孤立原子中一样地运动。如果逐渐缩小两原子间的距离，那么原子之间将产生相互作用，并且这种相互作用将随着距离的缩小而加强，使原来在各自原子内的电子运动，将同时受到另一个原子的影响，就可能使原子内的电子挣脱各自原子核的束缚，不再局限在各自的原子