

编者按:从19世纪法拉第首次发现半导体现象至今,已过近二百年。在这段时间里,生产技术由工业革命步入信息革命,芯片的出现让人们的生活发生了翻天覆地的变化,然而大家对它的发展历史、制造工艺却知之甚少。因此,从本期开始,我们将分三期来探寻芯片的奥秘:第一期刊谈有关半导体技术的发展历史;第二期谈芯片的制造工艺;第三期讨论当今世界芯片产业的发展格局。

芯片的奥秘(上)

杨磊 天津市第五中学

今天,生活中各类电子设备无处不在,大到冰箱、彩电,小到智能锁、IC卡,我们时时刻刻都在享受信息科技带来的便捷。众所周知,电子设备的核心部件是芯片,芯片是电子器件的心脏。芯片是什么?芯片是怎么被发明的?它的工作原理是什么?它是怎样被制造出来的?今天芯片技术发展到什么程度?今后会走向哪里?下面,让我们来开启芯片的探秘之旅吧!

● 什么是芯片

无论在新闻里还是在网站上,一提到华为,谈论的内容就经常围绕“芯片”“集成电路”和“微处理器”这几个词,这三个词究竟有何区别?我们在正式介绍芯片前先做个简单区分。

芯片(Chip)在电子学范畴内是指将电路小型化的一种方式,具体讲就是采用半导体制作工艺,在一个较小的半导体晶圆或介质基片上制作电路所需的晶体管、电

阻、电容和电感等器件,并按照多层布线或隧道布线的方法将元器件组合成完整的电子电路,继而封装在管壳里,形成一个独立实体,我们称这个实体为“芯片”,其中电子电路被称为集成电路(Integrated Circuit,缩写为IC)。可以说,芯片既是集成电路的载体,也是集成电路经过设计、制造、封装和测试后的结果,通常它是一个可以即插即用的独立的整体。

微处理器(Microprocessor),简单地讲,芯片内的集成电路除具备存储能力外,还能进行运算,能运行驱动电子设备的电子信号,此时的芯片就具备了处理能力,我们称之为微处理器。通常,构成微处理器的芯片上刻满了图形,每个图形里载有成千的电子开关,人们通过编程,把指令以数字的形式发送给微处理器,微处理器对指令进行反馈,并向硬件设备发出命令。微处理器是一种数字芯片,是众多芯片中的一种。

按功能的不同,芯片可分为处理器芯片、记忆和存储芯片、特定功能芯片三类。处理器芯片也就是常说的CPU,它是一个芯片设备的核心,承担最重要的数据计算和处理功能,常见于电脑、手机、平板、电视、冰箱等电子产品中;记忆和存储芯片主要负责数据的保存和管理,固态硬盘、手机的存储等都装有这一类芯片;特定功能的芯片是为了某些功能而开发的芯片,如通信芯片、支持上网的Wi-Fi芯片、用于连接蓝牙的芯片、电源管理芯片等。

● 芯片技术的发展历程

从1833年半导体材料的发现到1958年世界上第一块半导体芯片的诞生,经历了百年多的时间,我们不禁好奇,科学家是循着怎样的研究思路发明出芯片的?他们研发出了哪些制造工艺?

1. 半导体材料和半导体器件的前世今生

若以电阻率衡量物体的

导电能力,自然界物质可分为三类:第一类是电阻率范围在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 的导体(Conductor);第二类是电阻率范围在 $1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$ 的绝缘体(Insulator);第三类是电阻率范围介于 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 的半导体(Semi-conductor)。

按照构成半导体物质的元素来分类,半导体可分为元素半导体(由一种元素构成)、化合物半导体(由多种元素构成)。其中,元素半导体有硅(Si)和锗(Ge)等第IV主族元素半导体;化合物半导体中常用的有砷化镓、磷化铟、氮化镓、碳化硅等半导体。人们依据半导体材料的不同特性,制造出功能各异的电子器件,如电阻、电容、电感和具有整流作用的二极管以及具有开关和放大作用的三极管等,可以说今天的半导体材料的身影在电子领域无处不在。

(1) 半导体

① 半导体材料的历史。

世界上第一个发现半导体的人是英国科学家迈克尔·法拉第。1833年,法拉第发现硫化银的电阻会随着温度上升而降低,这是人类首次发现半导体现象。1839年,法国科学家亚历山大·贝克雷尔发现了光伏现象,他将光照射在一个由半导体和电解质接触形成的结上,这个结在光照下会产生电压。1873年,英国科学家史密斯发现硒晶体材料在光照下电阻会减弱,即光电

导效应。1874年,德国的布劳恩观察到某些硫化物半导体的导电性能和所加电场的方向有关,说明半导体导电具有方向性,即整流效应。同年,氧化铜的整流效应也被发现。1880年,美国物理学家霍尔发现半导体的霍尔效应,即一种电磁感应效应。

人们通过实验观察出了半导体的四个特性——电阻率的负温度特性、光照导电效应、光伏效应及整流效应,但到1911年才将这一类物质命名为“半导体”。随着20世纪初量子力学理论的建立,半导体的理论研究才取得突破。1931年,英国人威尔逊将量子力学应用到晶体中,提出了能带理论,从理论上说明金属、半导体和绝缘体在导电性能方面的差异。1932年,他又提出了杂质能级和缺陷能级的概念,建立掺杂半导体的导电机理。1939年苏联、英国和德国的科学家提出了势垒理论,解释金属—半导体接触的整流效应。至此,半导体的基础理论形成。

② 半导体材料结构及特性。

理论研究表明,重要的半导体材料,如硅、锗等都来自第IV主族元素,它们每个原子的最外层有四个价电子。相邻的原子之间,一个原子最外层的一个价电子与另一个原子最外层的一个价电子组成一个共有电子对,被称为共价键。共价键在两个原子之间形成较大的电子云密度,能将两个原子结合在一起,

这样每个原子与周围四个邻近的原子就组成一个正四面体结构,如图1所示。由于硅原子内部的共价键结构相对稳定,最外层电子被束缚在电子轨道上,当原子受到能量激发时,最外层电子就容易脱离物质结构束缚而形成自由电子,其原位置就会空余出来,我们称之为“空穴”,空穴和自由电子的数量是相等的。当一个电子形成自由电子脱离它的空穴后,空穴就会吸引临近的其他电子来填补,在这个过程中,电子流动起来,形成电流。为了让电流更加稳定和可控,半导体材料会被人为掺入杂质,因而半导体有本征半导体和掺杂半导体之分。本征半导体是不含杂质且无晶格缺陷的半导体;掺杂半导体是在某种元素中掺杂而形成的半导体。根据掺杂物的不同,掺杂半导体分为N型半导体和P型半导体。

N型半导体,也称电子型半导体,通过掺杂让半导体自由电子浓度增加。例如,加入一个五价元素,如磷(P)、砷(As)和锑(Sb),杂质原子最外电子层五个价电子中有四个与周围硅原子形成共价键,多

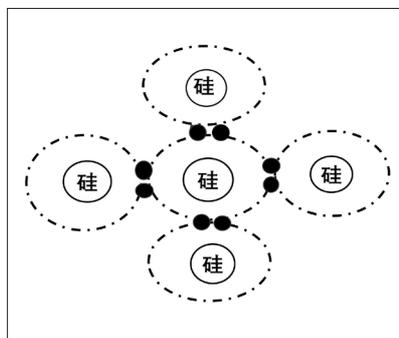


图1 硅原子结构平面图

余的一个电子就很容易被激发形成电子载流体,使杂质原子变成正离子。

P型半导体,也称空穴型半导体,通过掺杂让半导体空穴浓度增加,如加入一个三价元素硼(B)原子,硼原子与周围四个硅原子形成的共价键中缺少一个电子,因而存在一个空穴,自由电子很容易到硼原子能级上填补这个空穴,使杂质原子成为负离子,这样就形成空穴载流子。

PN结,P型半导体与N型半导体连接在一起,其接触区域称为PN结。P区中的自由空穴和N区中的自由电子会向对方区域扩散,这种电荷分离过程将产生静电力,使少数载流子停止扩散,造成正负电荷在PN结两侧积累,形成电偶极层,电偶极层中的电场方向正好阻止扩散的进行。当载流子密度不等引起的扩散作用与电偶层中电场的作用达到平衡时,P区和N区之间形成一个过渡区域(或称为耗尽区),耗尽区两端的电位差大约为0.6伏。当对PN结施加一定强度电场时,P区中的空穴会突破耗尽区向N区扩散,与N区中的电子复合,同时N区中的

电子突破耗尽区向P区扩散,与P区的空穴复合,这样电偶极层中自由载流子数减少,形成了高阻层,所以电偶极层也称为阻挡层,阻挡层的电阻值往往是组成PN结的半导体的原有阻值的几十倍乃至几百倍,如图2所示。PN结的这种特性被称为单向导电性,即整流性。

(2) 晶体管

①晶体管的发展历史。

芯片的出现并不是偶然的,它的前身就是我们今天在高级音响中仍能见到的真空管。真空管是一种在气密性封闭容器(一般为玻璃管)中产生电流,利用电场对真空中电子流的作用以获得信号放大或振荡效果的电子器件。真空管的发明使收音机的电路和接收性能发生了革命性的进步,但它也有很多缺点,如体积大、功耗大、寿命短、效率低等,这些缺点制约了电子技术的进步,因此电子工业急需真空管的替代品——半导体器件,这个重任很快就被贝尔实验室的威廉·肖克利研究小组实现了。1947年,肖克利发明了晶体管,从而获得诺贝尔奖,并在20世纪末被《洛杉矶时报》评为20世纪经济领域最

有影响力人物之一。

从20世纪30年代开始,贝尔实验室广招世界顶尖人才,致力于世界科技发展前沿的研究工作。贝尔实验室研究发现掺杂半导体的整流性比真空管好,它可以让电子或空穴一种电流通过,不像导体,无论是电子电流还是空穴电流都能通过。由于掺杂半导体是晶体掺杂,晶体本身具备良好的导热性和稳定性,所以晶体管取代真空管成为必然趋势。此时的晶体管只有整流二极管没有放大器,它仍无法和真空管竞争,于是,贝尔实验室的肖克利研究小组基于肖克利的场效应理论,在1947年12月用锗和硅晶体研制出世界上第一支晶体三极管,即点接触晶体三极管(Point Contact Transistor)。

肖克利知道点接触晶体三极管效率不高,他想利用扩散技术做出更好的晶体管,经过一个月的独自秘密钻研后,他提出了更为先进可行的结型晶体管(Junction Transistor)构想。1950年,肖克利的研究小组制成了第一支结型晶体管,结型晶体管的问世使后来的晶体管和芯片的规模生产成为可能。1950年11月,肖克利发表了论述半导体器件原理的经典著作《半导体中的电子和空穴》,从理论上详细阐述了结型晶体管原理,因而他被誉为“晶体管之父”。

②晶体管的功能作用。

晶体管(Transistor)是一种

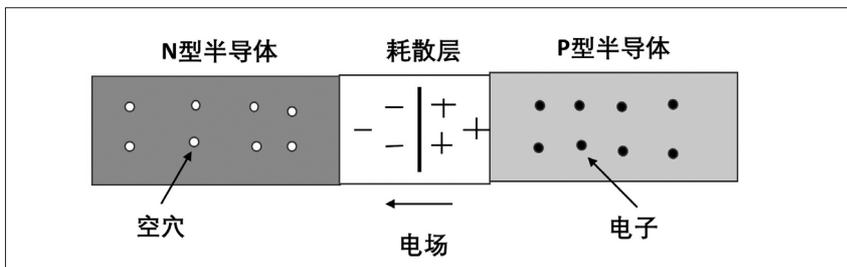


图2 PN结原理图

固体半导体器件(包括二极管、三极管、场效应管、晶闸管等,有时也特指双极型器件),它具有检波、整流、放大、开关、稳压、信号调制等多种功能。晶体三极管的工作原理很简单,只要在三极中的发射极上加上直流电压,再在基极上注入要被放大的电流信号,集电极就会产生被线性放大的信号,从本质上讲就是利用电子在晶体内的流动性来实现控制、放大并交换信号。

2. 芯片概念的形成

历史经验表明,人类的梦想是科技进步的第一推动力。当固态电子器件——晶体管被发明后,芯片的出现就变得水到渠成。常用电路一般由晶体三极管、晶体二极管、电阻、电容和电感五种器件组成。这些电子器件都有其特殊功能:电阻,它的功能就像是一个水龙头,能限制电子的流动,这就让电路设计人员能在电路中的任何一点精准地控制电子的流动,如电视的音量控制;电容就像一块海绵,它可以吸收、储存和释放电能,如照相机中的电容在充电后,可以让闪光灯在瞬间释放出巨大的光能;二极管像是一个水坝,可以阻止电流在某些条件下的流动;三极管就像是一个开关,能够控制数字电路中电路的开与关,同时它也是一个放大器,能把特定的信号放大到预想的程度;电路设计,就是将这些电子器件以某种方式连接起来,实现某种或多种功能。

在真空管时代,电路设计仍有很多技术上的限制,主要是功率、发热和尺寸上的限制。当晶体三极管出现后,这些问题就迎刃而解了。此时,电子器件在电路中的数量不再是问题,真正的问题是怎样把这些电子器件有效地连接起来。在芯片出现之前,连接这些分立器件需要人工焊接作业,焊接的好坏往往是决定器件质量好坏的重要因素。此外,还存在制作繁杂、连线长度过长导致电子信号传播速度受限等问题,这些影响电路可靠性的因素就成了人们亟待解决的问题。

20世纪50年代,随着第一台计算机的出现,人们认识到数字电路的重要性。因为数字电路能将极为复杂的运算和操作简化为0和1的逻辑运算,但数字电路对运行速度却有极高要求,所以提高信号传播速度、减少连线长度的办法就只有将电路小型化,全世界的电子工程师都在思考如何把大量电子器件集成在一小块电路上。

1952年5月7日,英国皇家雷达研究所的杰夫·达默,在美国华盛顿的一次会议上,第一次提出了芯片的概念,即把一个电路所需的晶体管和其他器件制作在一块半导体上。这次讲话预示着芯片时代即将到来。

(1) 芯片工艺的发展

贝尔实验室发明晶体管后,就开始大力推广晶体管的使用,晶体管的应用促进了早期半导体技术

的发展,可以说贝尔实验室奠定了半导体工艺发展的基础。

① 半导体晶圆的制造技术。

在20世纪50年代早期,贝尔实验室就开始研制超纯锗和硅,晶体纯度要求杂质浓度小于 $1/10^{10}$ 。起初,工程师利用液态锗制造出锗晶体,但却发现这一技术无法用于硅晶体的制造,因为硅的熔点为 1415°C ,远高于锗的熔点 937°C 。在 1415°C 的高温下,几乎所有的物质都会与熔化的硅进行化学反应。于是,工程师研发出提炼硅晶体的技术,他们先把硅制成圆柱状,然后让它通过一个能产生极高温的线圈,这一小段硅被高温熔化后,再用气体成功去除杂质。随着硅晶体提纯技术的实现,从60年代起,硅逐渐取代锗成为半导体制造的主要材料。选择硅作为半导体器件材料,主要从硅器件工艺不断取得突破和经济成本两个方面考虑。现实中硅元素以二氧化硅及硅酸盐形式存在,它的含量占地球的25%,仅次于氧,储量丰富,适合大规模生产应用。

② 杂质扩散工艺。

在研制晶体提纯技术的同时,贝尔实验室也在进行晶体管制造工艺的改良研究。科学家发现在 500°C 的高温下,铜很容易扩散到锗晶体的表面之下,于是研发出一种通过控制时间和温度来精确控制杂质进入锗晶体的深度与数量的方法,从而形成PN结的杂质扩散

工艺。科学家在锗晶体中应用扩散工艺取得了一定效果,但在硅晶体中却遇到了麻烦:一是加热后硅晶体的寿命会变短;二是加热后硅晶体表面会开裂。科学家很快找出了答案,即硅晶体的寿命问题源于金属污染,在硅晶体表面覆盖硅氧化物就能防止晶体表面开裂。1955年3月,贝尔实验室将扩散技术应用在硅晶片上,用扩散技术将两种物质注入到硅片上,形成了NPN结构,在此基础上制造出了硅基晶体三极管。

③光刻技术。

同样在1955年,贝尔实验室的工程师们创造性地把制造印刷电路板的光刻技术应用到硅晶片上。光刻过程简单地说就是先把一层光敏材料均匀地涂抹到硅片表面,然后将想要的形状曝光到光敏材料上,再进行化学冲洗,去掉不需要被挡住的地方,然后再把杂质扩散到硅片想要掺杂的区域,准确控制掺杂精度。今天,光刻技术和设备是整个芯片制造工艺最关键的部分,它决定芯片的制程(即沟道长度)参数的高低。20世纪50年代芯片制程只有十几微米,如今这个参数已经缩微到5纳米。

④二氧化硅薄膜的制备。

1955年,贝尔实验室的科学家在解决高温掺杂过程中硅表面易开裂问题时,不小心将氢气加入了扩散炉中,氢气在扩散炉中产生了水蒸气,结果在硅晶片表面形成

一层二氧化硅。没想到这层二氧化硅竟然能很好地阻止杂质在硅表面扩散。随后科学家们对不同的杂质进行了研究,发现锗能穿过二氧化硅,而溴和磷不能穿过二氧化硅。他们用氢氟酸在二氧化硅上腐蚀出一些小区域,然后在这些小区域内进行杂质扩散,通过这种办法杂质就被扩散到了硅晶片上的指定区域内。二氧化硅不但可以用作半导体PN结之间的绝缘物质,还可以保护硅晶体不被金属污染。因其绝佳的绝缘性,二氧化硅很快就成为晶体管生产和平面处理技术中最重要的介质材料。

(2) 芯片的诞生

当晶体提纯、半导体掺杂、光刻工艺和薄膜制备工艺被攻克后,人们发现可以控制晶体中的杂质和导线中的电子流动了,接下来的事情就是利用这些技术把制造电子设备所需的电子器件制作在一块板上,再用金属连线把这些电子器件连成一个电路。1958年,美国德州仪器公司的基尔比用锗晶片研制出世界上第一块芯片,但他的设计并不适用于生产。仙童半导体公司的诺伊斯则在思考如何制造出硅基芯片,因为硅的导热性和其他性能远胜于锗。

1958年,仙童半导体公司的霍尼发明了平面工艺,该工艺是在硅半导体平面上通过氧化、光刻、扩散、离子注入等一系列流程,制作出硅基晶体管器件,这一工艺可以解

决晶体管的绝缘和连线问题。1959年年初,诺伊斯先在硅片上覆盖一层二氧化硅薄膜作为绝缘层,然后在绝缘层上打洞,用铝薄膜把平面工艺制出的晶体管器件连接起来,这样在一块硅片上就做出了一个具有完整逻辑功能的电路。他的发明成果为半导体芯片工艺和量产奠定了基础。时至今日,所有的半导体芯片都在使用这一生产工艺。

芯片的出现让世界发生了巨大变化。与分立元件电路相比,芯片通过特殊工艺,将电路中的晶体管、电阻、电容、电感元件及布线制作在一小块半导体晶片上,然后封装在小盒子里,成为具有电路功能的微型结构。它具有体积小、重量轻、寿命长、可靠性高的特点。今天,芯片制造早已成为一个巨型产业,从卫星到微波炉,从火箭到手机,芯片无处不在,它彻底改变了我们的生活方式,被人们视为继轮子之后最重要发明。

本期回顾了从半导体材料被发现到第一个芯片诞生这段时期的半导体技术发展的历程,尽管这段时期技术还比较粗糙,不够成熟,但半导体技术理论却已初见成型。下一期我们将沿着芯片集成化的发展脉络继续探究现代制芯片制造流程和技术,请大家不要错过,下期见。e