

Semiconductors

半导体基础知识

Yuming Sun

Jun, 2011

yuming924@263.net

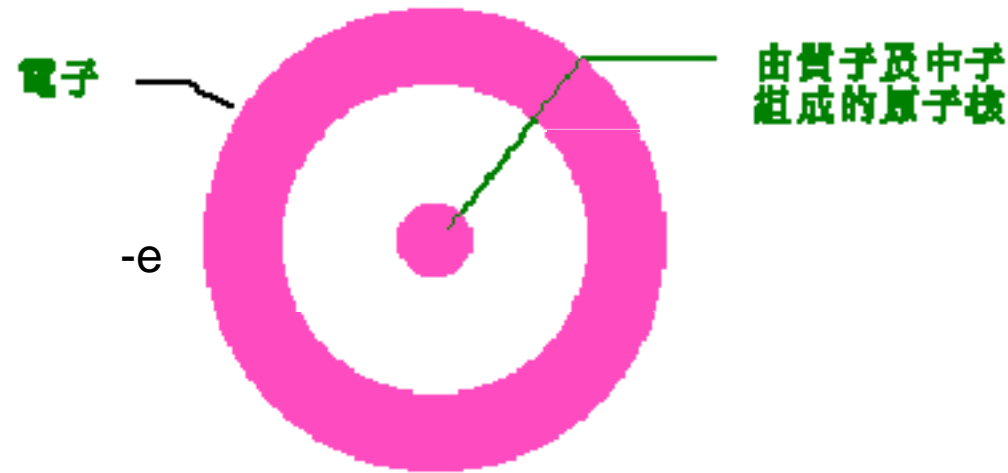
CONTENTS

- 半导体概念、原子、离子、电子、空穴、本质半导体、硅介绍、掺杂 ...
- 基本电路
- 制造工艺

什么叫半导体？

- 半导体是一种既不如导体那么容易导电，也不像绝缘体那样不导电的物质（介于导体和绝缘体之间），如 **硅（Si）**、**锗（Ge）**。
- 半导体的传导性可由掺杂物的浓度和被供给的电压来控制。
- 它的电阻值通常随温度升高而下降（与金属材料相反）。

原子结构



- 原子是由质子、中子与电子三种粒子所組成，其中由质子与中子构成原子核，而电子则在固定轨道上环绕原子核运行。
- 在原子核里，有带正电的质子及不带电的中子。所以，原子核带正电，电子带负电。
- 原子核的电荷数与轨道上的电子数目相同。因此，原子本身呈现中性。

离子

- 原子的电子及质子数目是相同的，即说，原子是不带电的。
- 当原子失去一个或多个最外层电子时，它带正电荷；当原子收纳一个或多个最外层电子时，它带负电荷。
- 一带电的原子就称为离子。

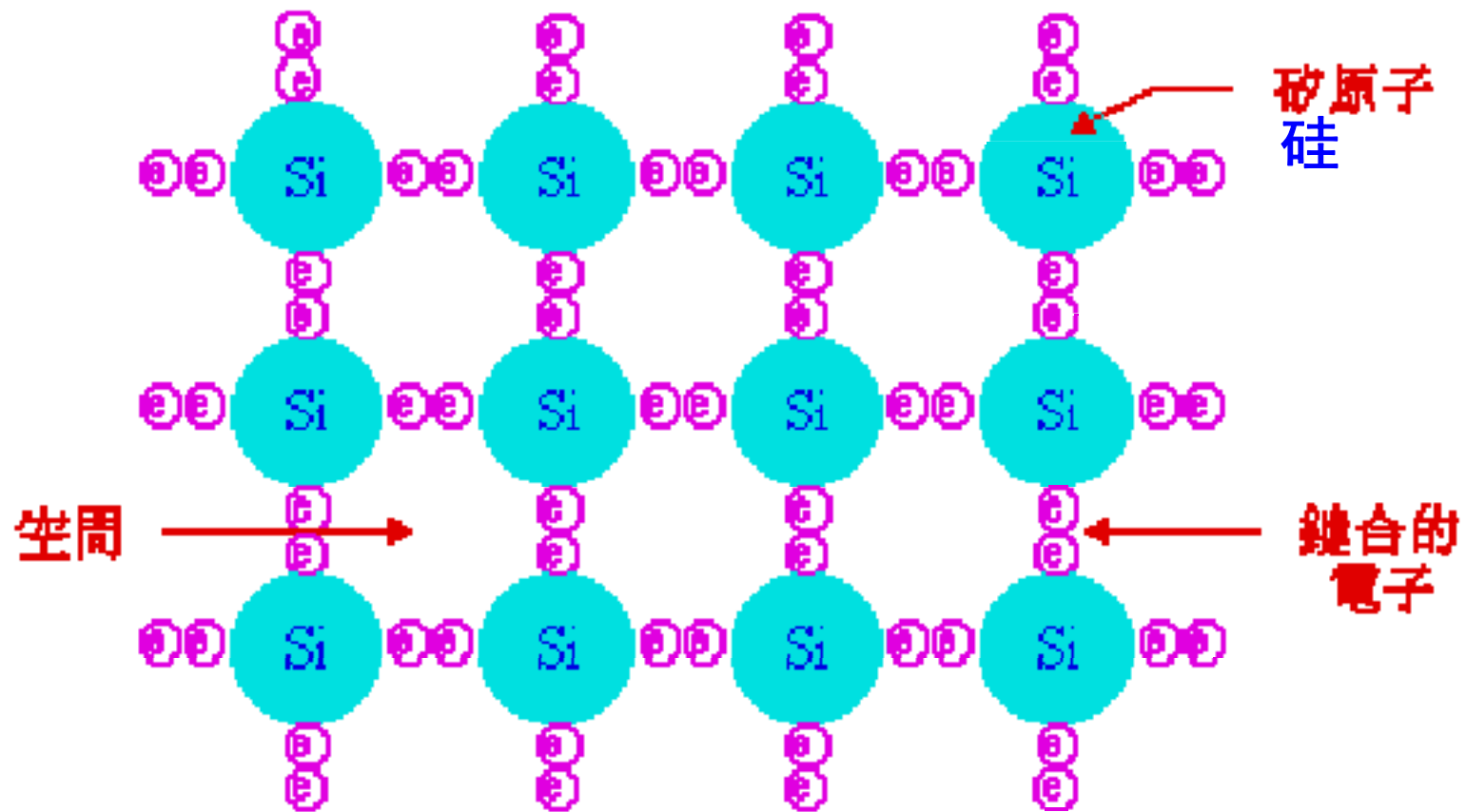
空穴与电子

- 如果电子载有负的电荷 $-e$ 离开了中性原子，这样一个空穴（或称为电洞）就会出现。这个空穴带正的电荷 $+e$ 。
- 而电子和空穴都能够自由地在物质内移动。

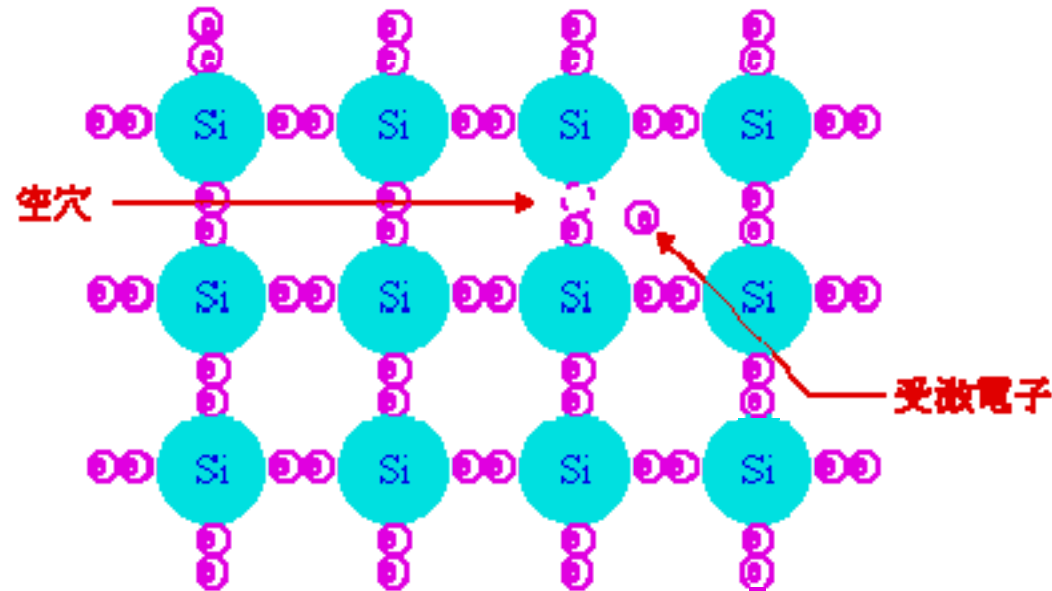
本质半导体

- 本质半导体是一种有相同数量的自由电子和空穴的纯半导体。
- 最普遍的本质半导体可算是硅和锗。它们都是四价的元素。物质的最外层有四个电子，称为价电子（**Valence electron**），而这四个电子都与相邻的四个原子结合，形成所谓的共价键，好像每个原子最外层都有八个电子，这称为共价键的八隅守则。

硅晶体的结构



在有限温度中的硅载流子

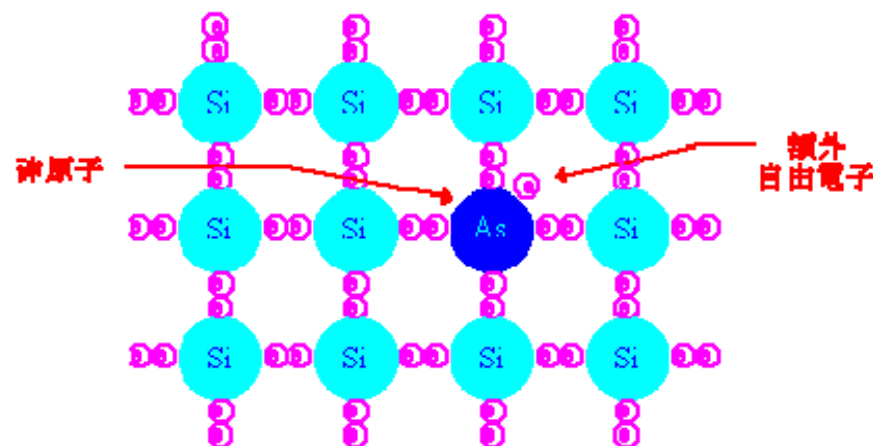


在常温下，原子的价电子可能从热运动中获得足够能量去破坏它们的共价键而成为自由电子。同样数量的空穴就会形成，称为电子对。这个过程提高半导体的导电性，而这些电子对会随温度的上升而增加。

非本质半导体

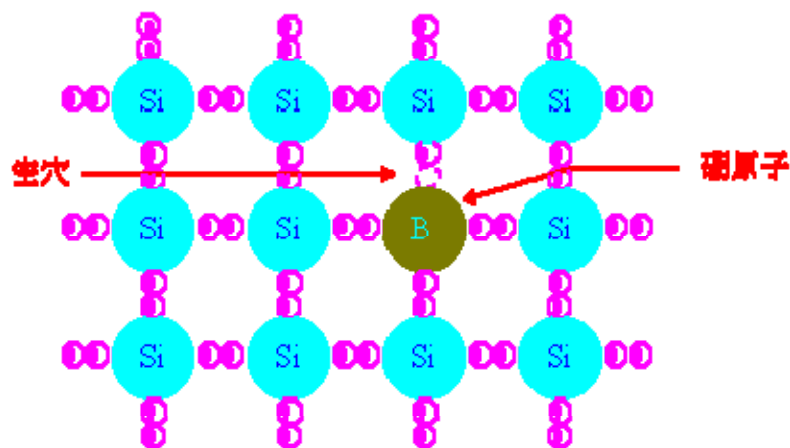
- 在本质半导体上加上小量（例如，百万分之一）杂质原子，半导体材料的特性就会发生重大改变，一个非本质半导体就会形成，而加上杂质的动作就称为掺杂。
- 常用的杂质元素有铝、镓（三价）和砷、锑（五价）等等。

N型半导体



- 如果在本质半导体中掺入微量的五价元素，好像**砷**、**锑**或**磷**，这些杂质原子会提供一个自由电子给晶体，称为**施体原子 (Donor)**。**施体电子**的形成不会同时制造空穴。
- 这些五价杂质因此提供了一个带负电的载电子，而这些物质就称为 **n型半导体**，而电流的形成主要由于电子的动作。所以在 **n型半导体** 中，电子称为**多数载流子**，而空穴（只会因热力效应而形成）就被称为**少数载流子**。

P型半导体



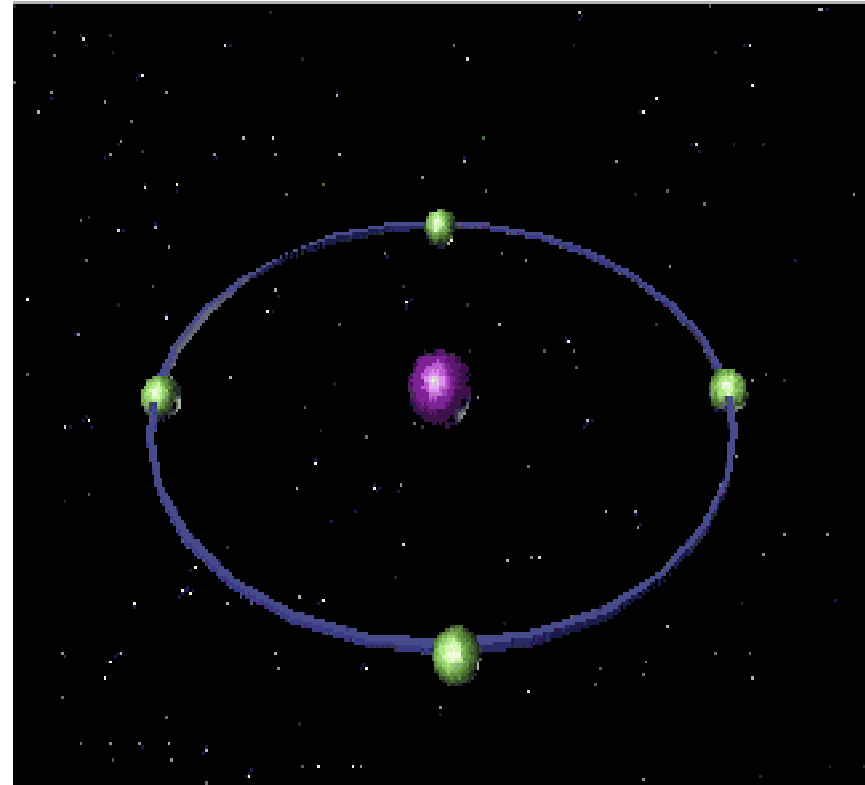
- 如果在本质半导体中掺入微量的三价元素（原子的最外层只有三个电子），好像**铝**、**硼**、**镓**或**铟**，这些杂质原子会在结晶提供一个空穴。
- 它们称为**受體原子 (Acceptor)**，因为每一个受體原子都会从附近的原子中接收一个电子。所以这些半导体都被称为 **p型半导体**，空穴是**多数载流子**，而**电子**就是**少数的载流子**。

硅的简介

硅是现在各种半导体中使用最广泛的电子材料，它的来源极广，譬如我们脚下所踩的砂。它的含量占地球表层的25%，纯化制作容易，取得成本较低，因此被用来做为集体电路制作的主要材料。如常见的微处理器（CPU），动态随机存取记忆体（DRAM）、等，都是以硅为主要材料。在元素週期表里，它是属于四价元素，排在三价的铝与五价的磷之间。

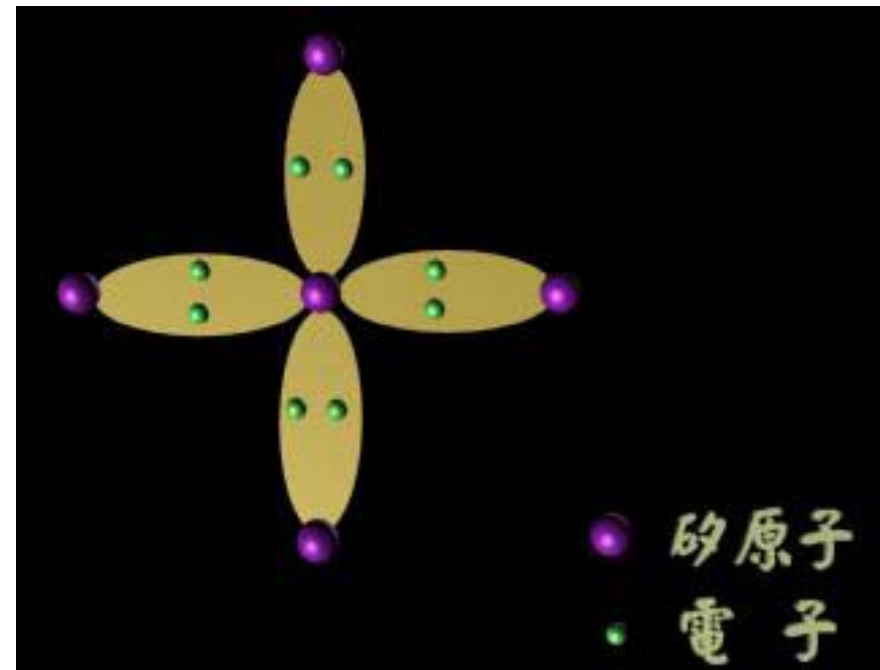
硅原子与电子图

硅是属于四价元素，原子序为**14**，虽然原子内所含的电子相当多，但是因为较接近原子核的电子被外层电子所遮蔽，所以内层电子对整体材料的电性影响也比较小，我们将探讨硅原子的**4个**外围电子，也就是价电子。



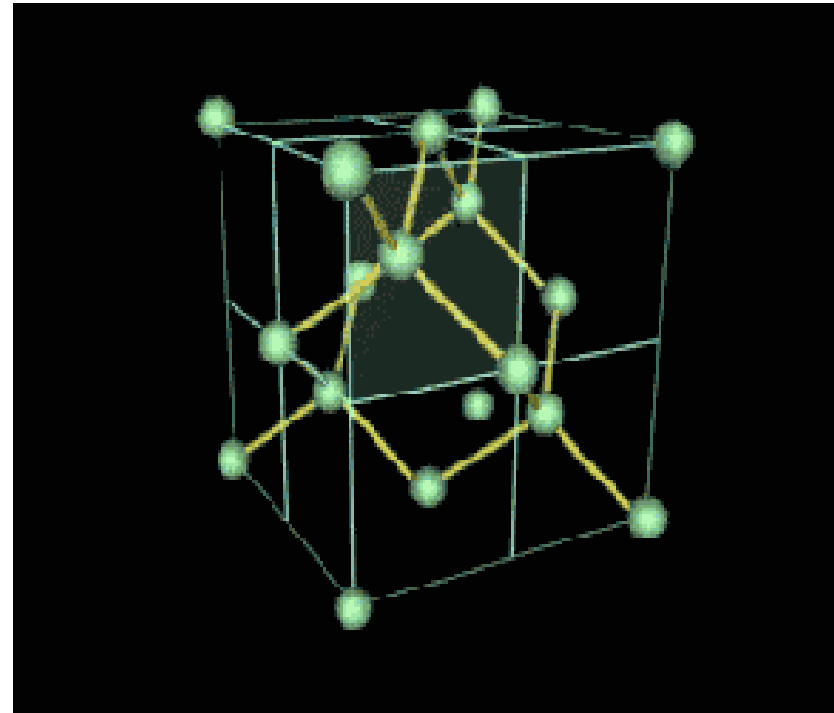
共价键

在硅晶体内，每个硅的四个外层电子分别与四个邻近硅原子的一个外层电子形成化学键结构，这种电子共有的化学键结构称为共价键。



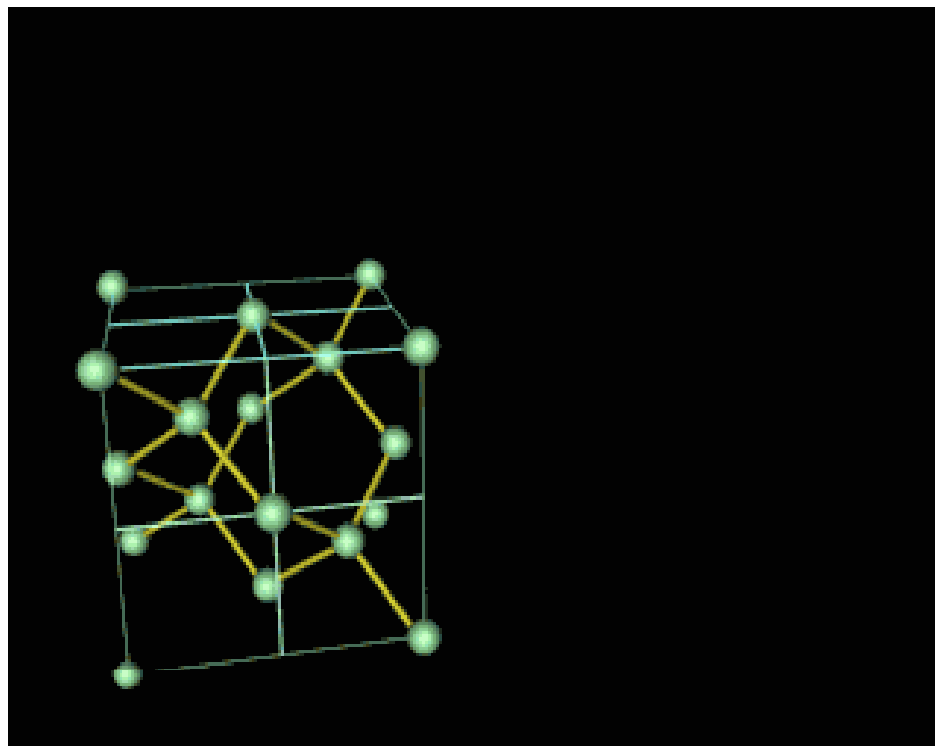
钻石结构

在三度空间中，硅晶体由许许多多四面体单元连接构成，四面体中心有一个硅原子，此外有四个硅原子位在四面体上的四个端点，八个四面体构成的立方结构称为钻石结构。



硅的结构

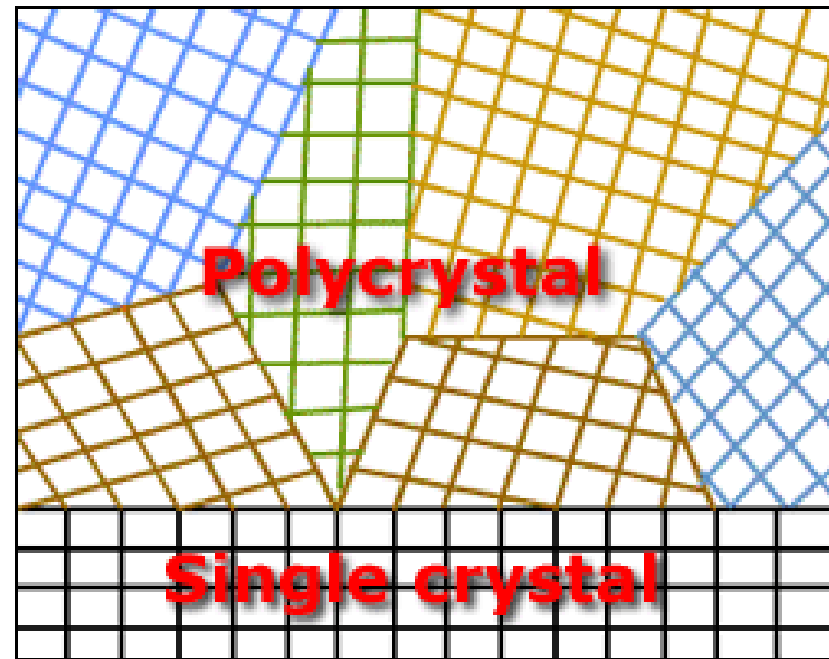
晶体和非晶体本身都可以是一种纯物质，而晶体的特点，就是材料内的原子或分子，在三度空间中，以周期性方式排列。硅晶体便是以钻石结构成为单位，晶体内的硅原子呈规则周期性的排列。



单晶硅与多晶硅

➤当一硅材整体的原子排列结构呈现规则性，此硅材称为单晶硅(**Single Crystal**)，硅半导体技术中所使用的硅晶圆即为单晶硅。

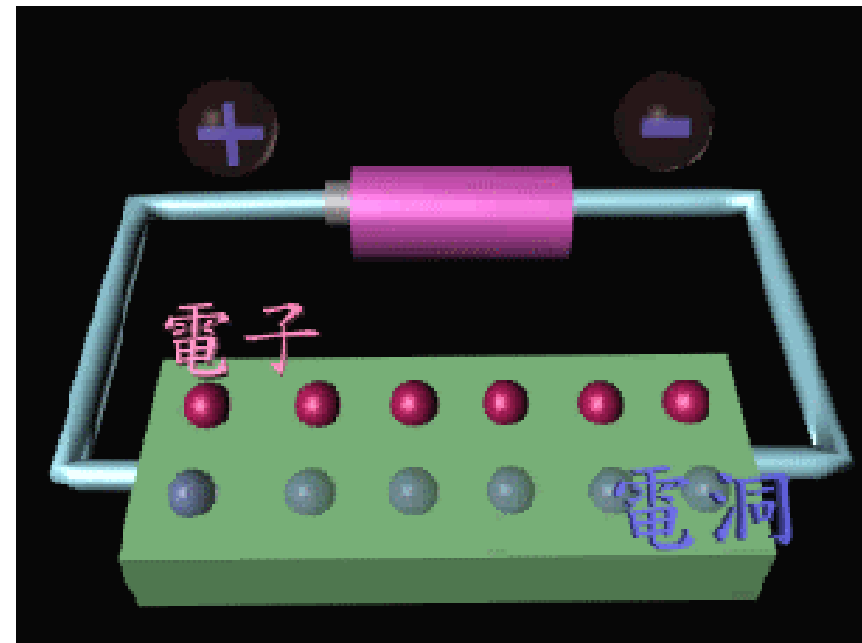
➤当硅材是由许多小单晶结构组成，各单晶颗粒间的原子排列方向彼此互异，此硅材便称为多晶硅(**Poly Crystal**)。



掺杂

所谓掺杂，就是在半导体材料中加入电子或空穴，半导体即利用电子或空穴来传导电信号。

掺杂又可以分为：正掺杂及负掺杂。

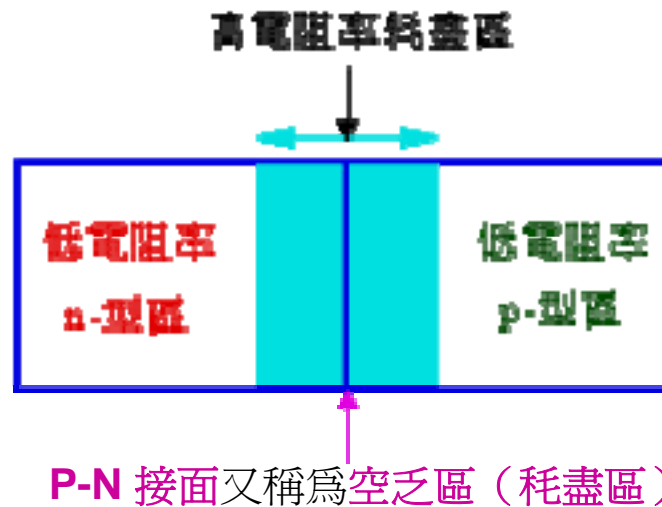


正掺杂及负掺杂

所谓正掺杂，就是在硅晶体中掺入周期表中的三族元素（此掺入的三族元素称为受体），由于和硅原子键结需要四个电子，三族元素原子仅可供应三个电子，因而形成了一个电子的空缺，我们称之为空穴。当外加一个电压时，空穴向负电位处移动，形成了电的传导。此掺杂的区域即称为正型区(**p-type region**)，主要的传导载子(**carrier**)为空穴。

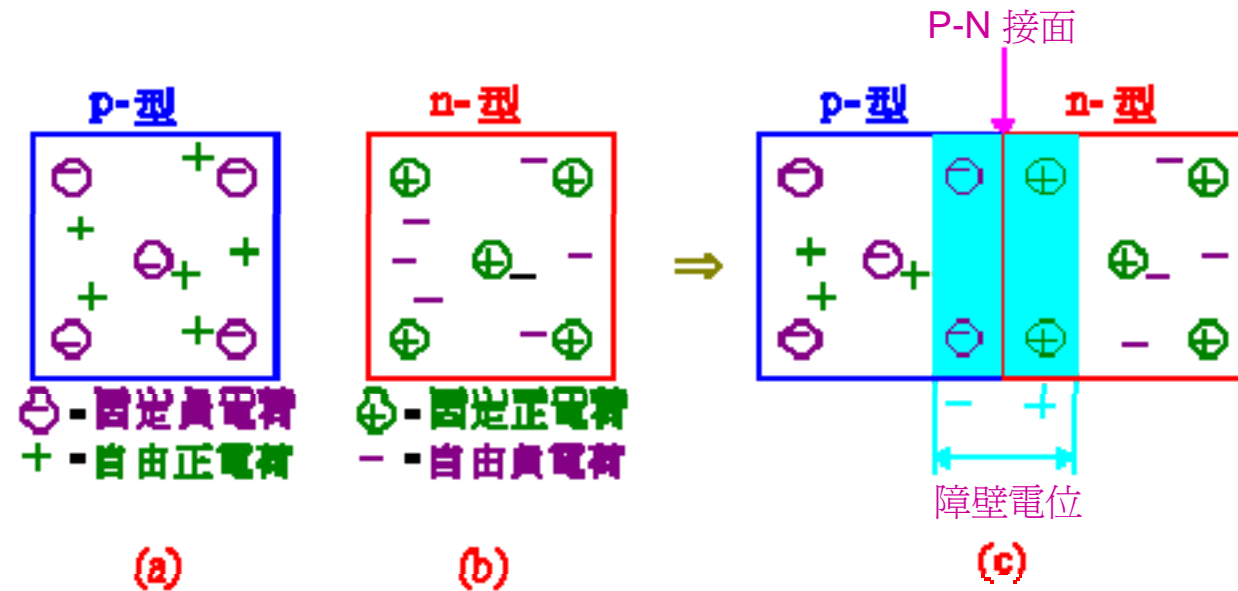
所谓负掺杂，就是在硅晶体中掺入周期表中的五族元素（此掺入的五族元素称为施体）。由于要和硅键结需要四个电子，五族元素原子却可提供五个电子，掺杂原子多出了一个电子，当外加一个电压时，电子向正电位处移动，形成了电的传导。此掺杂的区域即称为负型区(**n-type region**)，主要的传导载子(**carrier**)为电子。

P-N接面(结)



当 P-型和 N-型半导体“连”在一起的时候，交界面处就形成很薄 ($\sim 10^{-3}$ mm) 的一个接合介面（**PN 接面**）。一些在 n-区的自由电子就会越过接合介面向 p-区扩散。同时一些在 p-区的自由空穴就会越过介面向 n-区扩散。所以，这些自由电荷会因复合反应而在**PN 接面**中结合然后消失。因此，在 **PN 接面** 两侧没有多数载流子。

障壁电位



由于 p-区失去一部份空穴，所以帶上负电性。同样地，n-区亦失去一部份电子，因此帶上正电性。一个障壁电位 (Potential barrier) 就会跨越两区建立起来。锗的障壁电位大约是 0.2 至 0.4V，而硅的障壁电位大约是 0.6 至 0.8 V。

基本电路

- Bipolar (双极的)
- PMOS
- NMOS
- CMOS (PMOS+NMOS) (互补金属氧化物半导体)
- BiCMOS (Bipolar+CMOS) (双极-互补金属氧化物半导体)

Bipolar-双极集成电路

- 早期的IC芯片
- 1961年：4个双极性晶体管，120USD.
- 后市场占有率迅速下降
- 但仍被模拟系统和电力器件所用

PMOS

- 第一个MOS场效应晶体管，1960
- 在60年代为数字的逻辑器件所用
- 70年代中期后被NMOS取代

NMOS

- 比PMOS快
- 在70年代和80年代为数字逻辑器件所用
- 电子表和手持计算器
- 80年代后被CMOS取代

CMOS

- 自80年代以来在IC芯片中最常用的电路
- 低耗电量
- 高温度稳定性
- 高抗扰度
- 均衡性设计

BiCMOS（双极CMOS）

- CMOS与双极电路的结合
- 始用于90年代
- CMOS逻辑电路
- 双极输入/输出
- 比CMOS快
- 高耗电量
- 当电力供给的电压降至1伏时极可能产生问题

第一个的历史

- 第一个可用的电子管：弗莱明（John Ambrose Fleming），1904年
- 第一个晶体管：AT&T贝尔实验室，1947年
- 第一个锗单晶：1952年
- 第一个硅单晶：1954年
- 第一个集成电路：TI（德州仪器），1958年
- 第一个商用集成电路：Fairchild（仙童），1961年

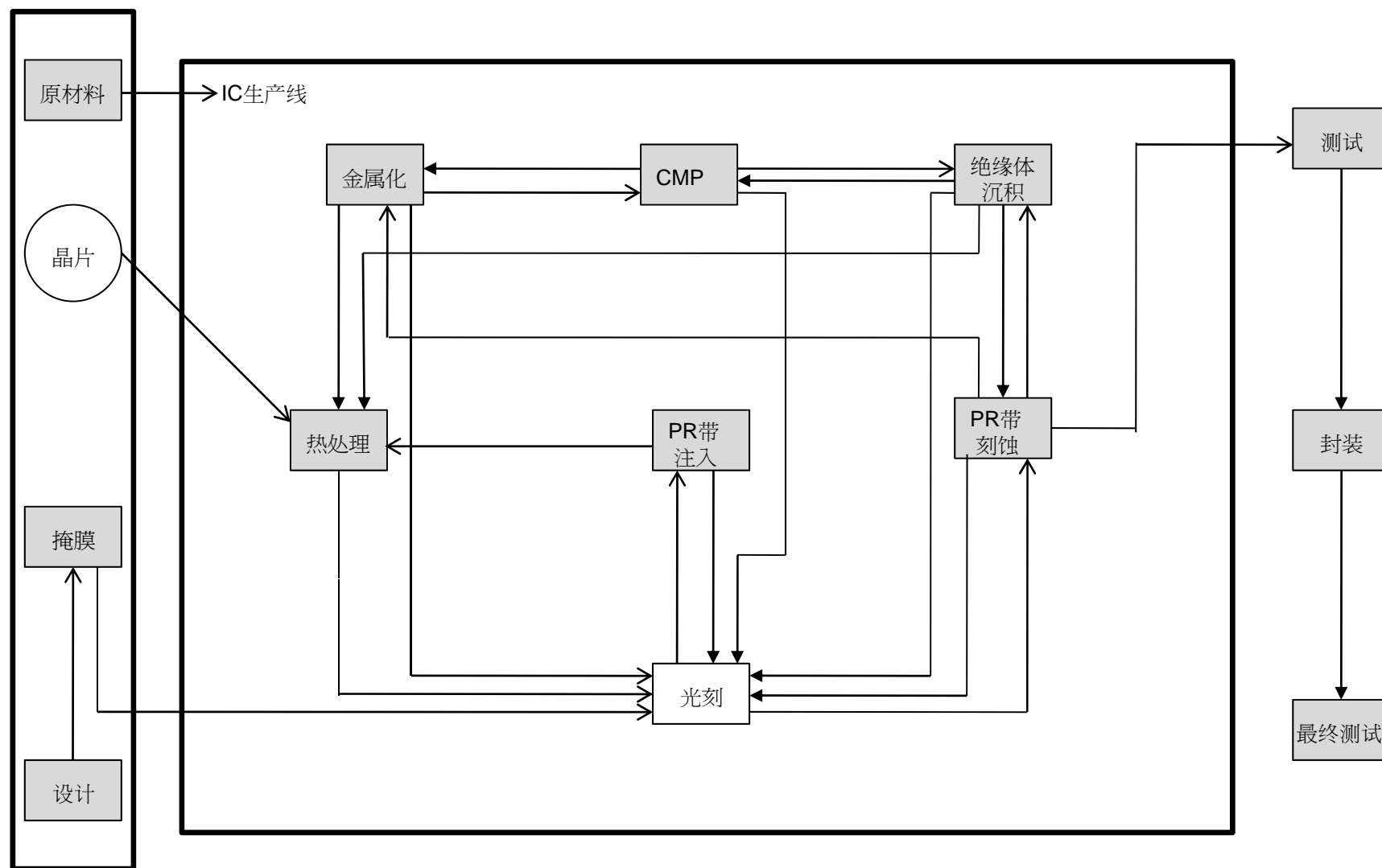
摩尔定律

- 英特尔的共同创始人Gorden Moore(摩尔)在1964年发现
- 晶体管的数量每12个月要翻一番而价格不变
- 在80年代放缓到每18个月
- 而到了1995年变成每2年翻一番
- 这种情况可能会延续至2010年
- 最终会缓慢到衰弱

IC规模

综合水平	缩写	一块芯片上器件的数量
小规模集成电路	SSI	2 to 50
中规模集成电路	MSI	50 to 5,000
大规模集成电路	LSI	5,000 to 100,000
极大规模集成电路	VLSI	100,000 to 10,000,000
超大规模集成电路	ULSI	10,000,000 to 1000,000,000

晶片制作工艺流程



半导体构成原料

- 气体
 - N₂ , O₂ , 硅烷 , 四氟化氮 (CF₄) , Ar , ...
- 液体
 - 去离子水(DI) , 光刻胶液 , 四乙氧基硅烷 , 氢氟酸 , H₂O₂ , HNO₃ , H₂SO₄ , CMP浆 , 电镀溶液 , ...
- 固体
 - P , As , Sb , Al , Cu , Ti , Ta , ...

- 极高的纯度
- 易燃、易爆
- 有毒、有害
- 腐蚀性
- 高危险性

从沙子到晶片

- 石英砂：二氧化硅
- 从砂到金属级硅（**MGS**）
- 金属硅粉末（**MGS**）与盐酸反应形成三氯化硅（**TCS**）
- 汽化并浓缩纯净的**TCS**
- **TCS**与氢气反应生成多晶硅（**EGS**）
- 溶化**EGS**并拉伸形成单晶硅锭

从沙子到晶片 -2

- 尾部切割、侧面抛光并形成切口或磨平
- 将硅锭锯成晶圆
- 切圆，研磨，湿法刻蚀，化学机械抛光
- 激光刻录

硅外延生长和绝缘体上硅

- 硅外延生长
 - 单晶原料在单晶底层上生长
- 绝缘体上硅（SOI）
 - 更好的绝缘设计
 - 更好的性能

光刻

- 将设计版图从掩膜上转移到晶圆表面的光刻胶上
- 最关键技术
- 最昂贵设备：步进光刻/扫描仪
- 确定了技术节点
- IC生产过程中大量重复
- 黄光区

建立生产线成本

- 较高的开销：一个300mm的生产线超过20亿美元
- 净化间
- 器材，通常重要设备都超过\$1M
- 原材料 -- 要求较高的纯度
- 厂房
- 人员的培训和支出