

# 半导体物理

## 1、教材/参考书：

- 1) 《半导体物理》讲义
- 2) 半导体物理（上册，新版）叶良修编著
- 3) 半导体物理学 刘恩科编著（国防科技出版社）
- 4) 半导体器件物理（Semiconductor Device Physics）  
施敏（S.M.Sze）著1981第二版
- 5) **Fundamentals of Modern VLSI Devices, Yuan Taur  
and Tak H. Ning, (Cambridge University Press,  
1998 edition)**
- 6) 半导体器件基础（电子工业出版社）黄如等译
- 7) 半导体物理与器件（电子工业出版社）赵毅强等译

# 第一章 概述

§ 1.1 半导体物理与微电子学的关系

§ 1.2 微电子学与半导体物理发展之间关系

§ 1.3 集成电路技术的发展规律

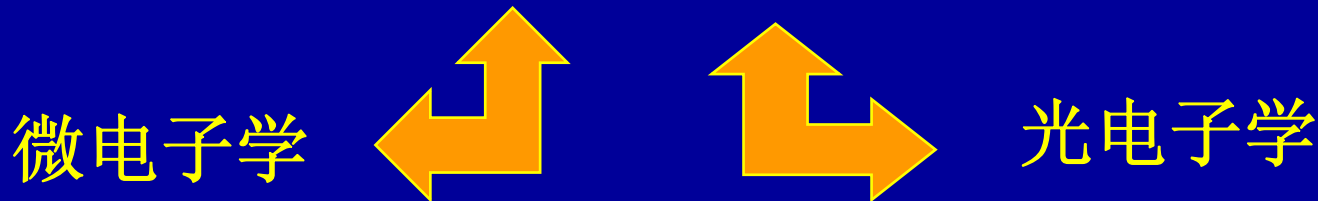
§ 1.4 微电子技术发展趋势和面临的挑战

§ 1.5 本课程的定位和内容安排

# § 1.1 半导体物理与微电子学的关系

半导体物理在学科中的位置和作用

固态电子学--现代信息科学的基础



- 研究在微小尺度下，固体（主要是半导体）材料上构成的器件、电路、及系统中电子运动规律的学科
- 微电子学是固态电子学的分支之一
- 脱胎于电子学和固体物理学的边缘性技术学科
- 其物理基础是固体能带论

# § 1.2 微电子学与半导体物理发展之间的关系

## 微电子学领域

- 半导体材料和器件物理
- 集成电路工艺
- 集成电路设计原理和技术
- 集成电路功能和特性测试

微电子技术的理论基础是半导体物理和器件物理，是固体物理理论中有关半导体材料和器件的学科分支。

微电子学理论（半导体物理和器件物理）的诞生是以半导体晶体管的发明和晶体管理论的建立为标志。

在微电子学的发展中，一些里程碑式的事件，对微电子学科的发展起了积极的推动作用。

## § 1.2 微电子学与半导体物理发展之间的关系

### 1、晶体管发明和晶体管理论的建立（1947年）

晶体管发明是固体物理理论研究、半导体材料、技术科学研究取得重大突破后的必然结果。

1) *量子力学的诞生* 19世纪末，现代物理学的一系列发现揭示了微观物理世界的基本规律，以此为基础诞生了现代物理学的基础——*量子力学*

（以海森堡和薛定谔建立的量子力学体系为基础，其中薛定谔提出的薛定谔方程已经成为量子力学最基本和广泛使用的方程）

量子力学理论的建立，实际上是近代在物理学研究方面取得的一系列理论和实验成果共同推动的结果：

- 黑体辐射实验与经典理论的矛盾和**Planck**量子论的提出；
- **Compton**散射实验揭示了光的粒子性特征；
- 光电效应实验进一步促成了**Einstein**光量子理论的提出；
- **Bohr**提出了关于原子结构的量子理论；
- **De Broglie**提出的微观粒子的波粒二像性（**Wave -Particle duality**）理论和电子衍射实验的验证；（电子的波动性）

量子力学建立的基础已经奠定，如何建立量子力学理论体系？

- 海森堡（**Heisenberg**）提出的不确定关系（**Uncertainty relation**）和动力学变量变算符的概念；
- 薛定谔方程（**Schrodinger Equation**）和海森堡建立了量子力学方程。
- Born**提出的概率波（**Probability wave**）概念和波函数(**wave function**)，为量子力学的应用奠定了基础；
- 基于量子力学的能带论建立，构成了固体物理学的基础。
- 现代固体物理学的成熟、完善和应用，为晶体管的发明奠定了理论基础。

2) 半导体材料研究方面取得的进展，为晶体管的发明奠定了必要的技术基础。

半导体材料的发现和材料提纯技术的改进、p型和n型半导体材料的获得，很快发现p-n结是很好的整流器，并具有光生伏特效应。

从与真空管的类比中，人们很自然地想到能否在p-n结上加一个控制栅极，从而做成一个固体放大器。

3) 在应用需求的推动下，1947年12月16日在贝尔实验室诞生了世界上第一个具有放大和功率增益性能的点接触晶体管。

1948年1月23日肖克莱完成了晶体管三个基本概念的建立。

1956年Bardeen、Brattain和Shockley获物理学诺贝尔奖。自此，以半导体物理为理论基础的微电子学诞生了，一个新的工业革命时代—信息社会开始了。



4) 在应用需求驱动下，借助于当时物理、材料和技术成果，美国TI公司的J. S. Kilby在深入的物理分析基础上，于1958年9月12日完成了另一里程碑性质的发明-集成电路的发明。

微电子技术由此进入一个迅猛发展的时期。此后40多年，在应用需求的推动下，微电子集成电路技术一直按照Moore定律预测的指数增长规律发展。

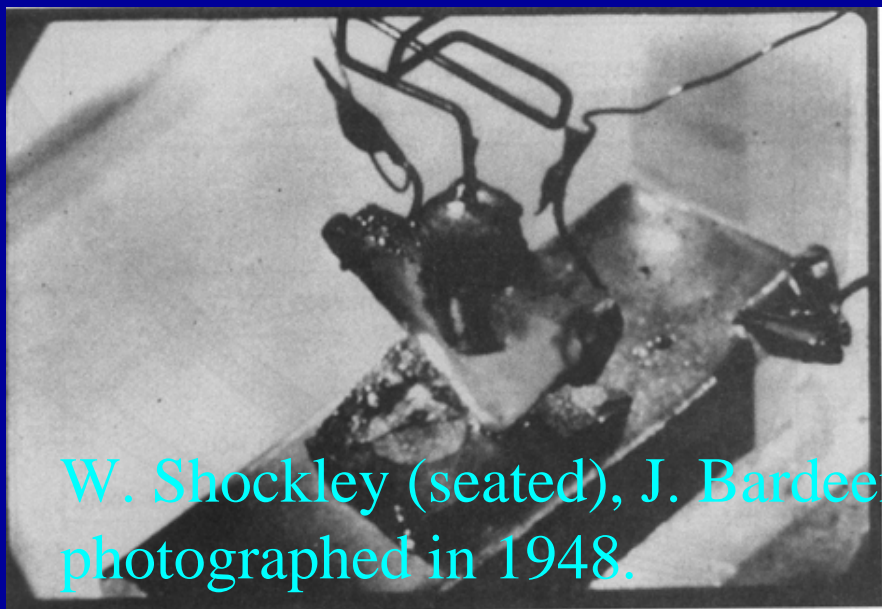
微电子技术的发展也同时推动了微电子学理论基础-半导体物理和器件物理学的快速成长。

- 微电子技术发展对半导体器件物理研究提出了更多需求；
- 半导体器件物理理论的发展也推动了微电子技术的发展。

# 微电子发展中的里程碑式的重大事件 (1)

## 晶体管的发明 (1947年)

应用需求推动下，理论和技术发展的结果。同时，晶体管发明后，晶体管理论的建立，则是技术推动下理论发展的典型事例。



W. Shockley (seated), J. Bardeen (left), and W. Brattain (right) photographed in 1948.

微电子学的发展正是这种应用需求、理论推动、技术发展共同作用的结果和集中体现。也是创新的源泉。

1956年Noble物理学奖

北京大学 微电子学研究所

# 微电子发展中的里程碑式的重大事件（2）

## 集成电路的发明

实际上，集成电路的思想19世纪处就由英国的科学家提出了。

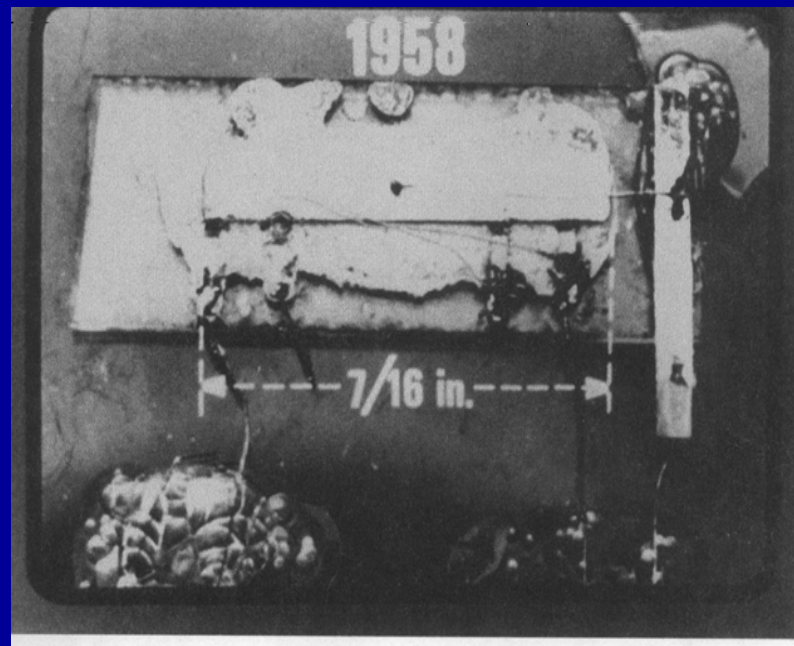
第一块集成电路，  
1958， Kilby

主要贡献：集成电路思想的实现和验证

在Ge衬底用键合的方法  
制备了1T、3R、1C

获2000年诺贝尔物理学奖

应用需求和技术发展，包括创新性的思想共同作用的结果。

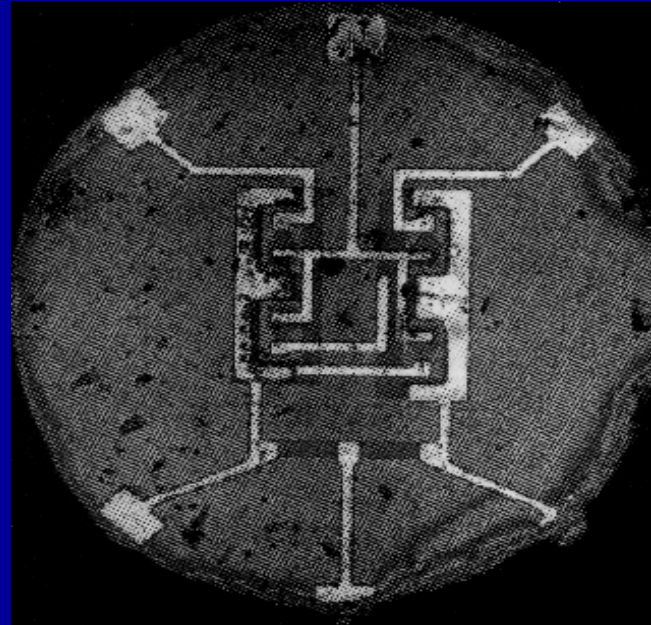


# 微电子发展中的里程碑式的重大事件 (3)

平面加工工艺（光刻）的发明  
使集成电路技术和产业迅速发展的关键

1957年，美国DOF实验室首先将光刻技术引入到半导体技术中。  
Fairchild公司的Noyce将光刻技术和SiO<sub>2</sub>巧妙结合起来，实现了精细晶体管 and 集成电路图形结构。  
由此导致了平面工艺的诞生。  
平面工艺的诞生是实现大规模、低成本制造集成电路的基础。

第一块单片集成电路，  
1959，Noyce



在Si衬底制备了真正的集成电路

# 微电子发展中的里程碑式的重大事件（4）

## 1960年，第一个MOSFET器件的发明

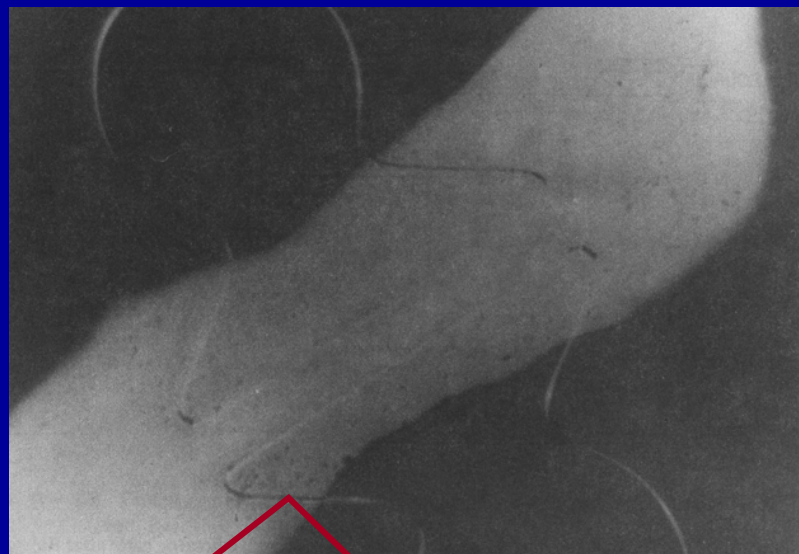
- 1959年，Atalla提出用硅片上热生长二氧化硅层作为栅绝缘层

- 1960年，贝尔实验室的Kahng和Atalla制备出了第一支MOS场效应晶体管

- 1963年Wanlass和Sah发明了CMOS

- A.S.Grove, C.T.Sah, E.H.Snow, B.E.Deal等合作，在1967年基本搞清了Si-SiO<sub>2</sub>系统的四个电荷的性质

## 场效应现象的发现和SiO<sub>2</sub>绝缘介质的发现



衬底：Si

栅氧化层：热氧化二氧化硅  
1000埃

栅电极：铝栅，其上为  
沟道长度：25微米

## 微电子发展中的里程碑式的重大事件（5）

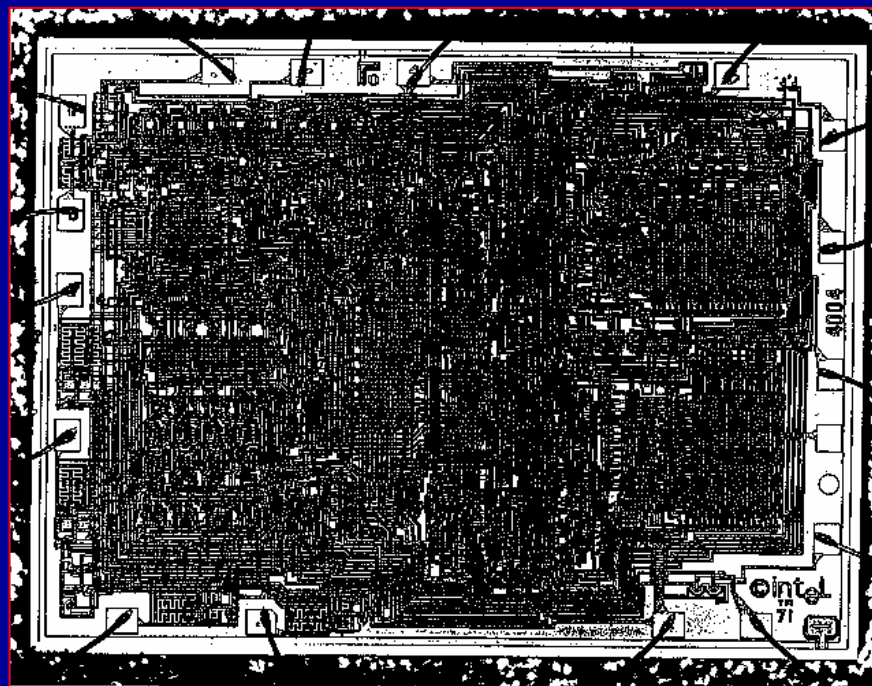
1968年，Dennard发明了1T1C—DRAM 单元电路

## 微电子发展中的里程碑式的重大事件（6）

微处理器的发明

1971年由Intel公司制造出  
第一个微处理器4004

从上世纪80年进入VLSI  
技术时代



# 微电子发展中的里程碑式的重大事件（7）

## 铜互连技术的发明（IBM和TI）

**Cu互连的两个主要历史壁垒问题：**

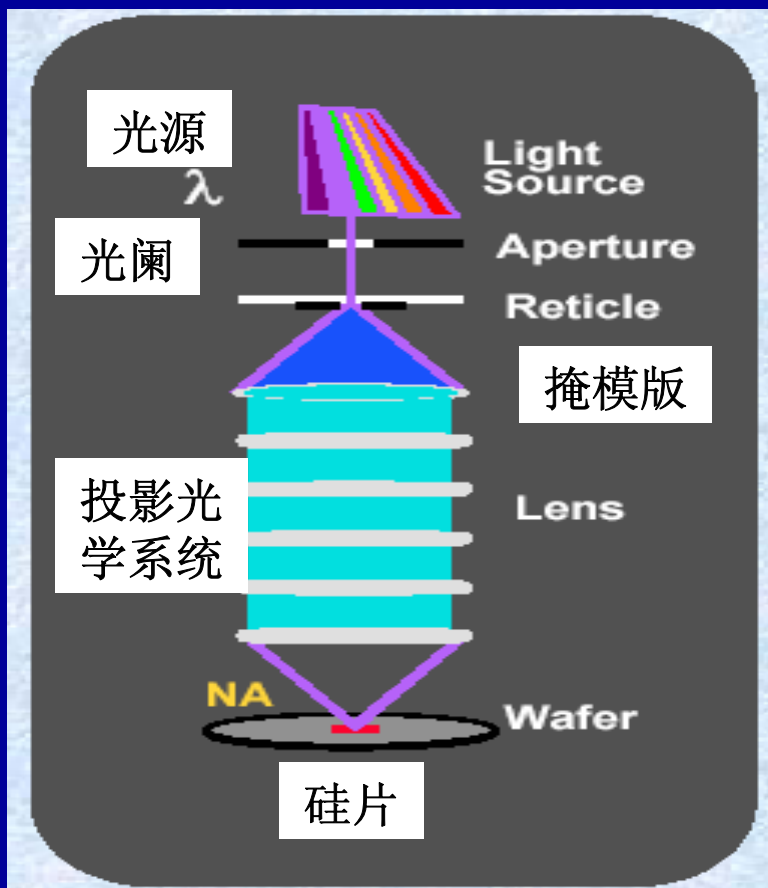
- ◆ 铜金属图形加工问题
- ◆ 铜的污染和扩散问题

**问题的解决：**

- **Dual Damascene**结构和**CMP**工艺的发明和集合
- **Cu**扩散势垒层技术的发明引入

## 微电子发展中的里程碑式的重大事件 (8)

### 浸入式光刻技术 (Immersion Lithography) 的发明



分辨率(**R**): 光刻系统所能分辨和加工的最小线条尺寸

焦深(**DOF**): 投影光学系统可清晰成象的尺度范围

$$R = k_1 \lambda / NA$$

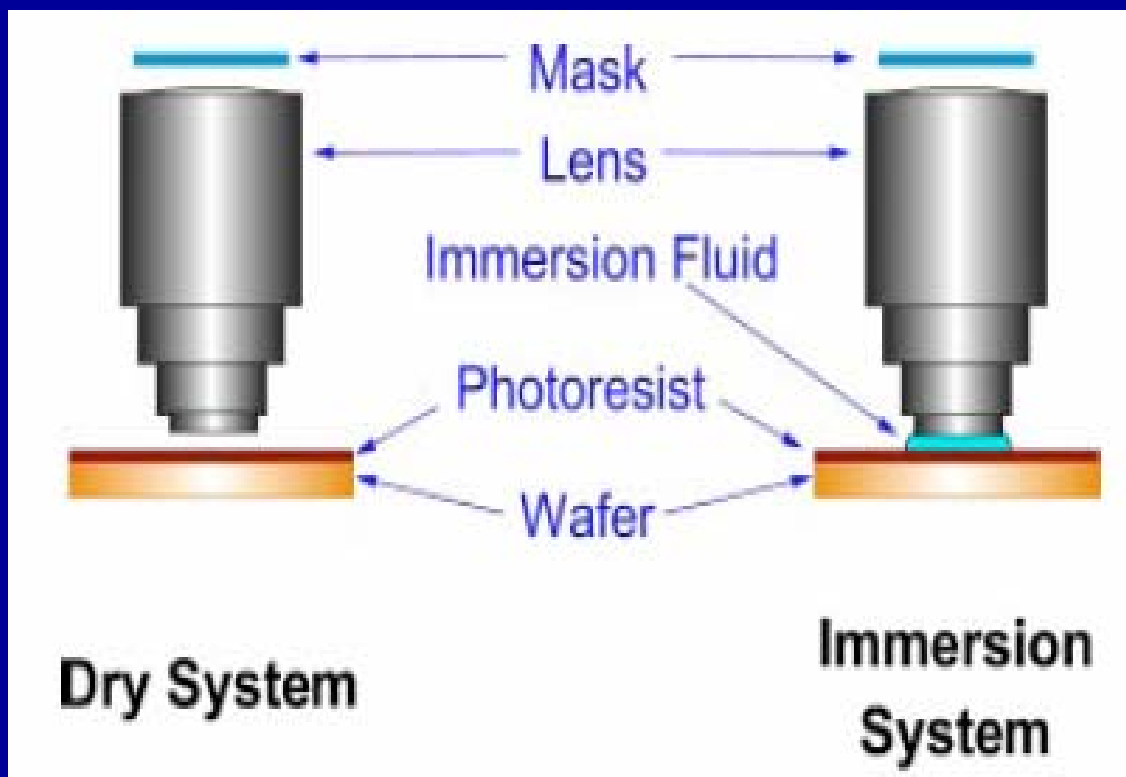
$$DOF = k_2 \lambda / (NA)^2$$



# □ 浸入式（Immersion）光刻技术

利用湿法光刻替代了干法光刻：

- 显著改进光刻系统分辨率
- 显著改进光刻系统的焦深性能



传统光刻系统与浸入式光刻系统结构示意图比较

# 微电子发展中的里程碑式的重大事件（9）

## 高K/金属栅材料引入到CMOS技术中

metal gates and high-k gate dielectrics represents a major milestone as the industry races to reduce electrical current leakage in transistors

### High-k + Metal Gate Transistors

#### Metal Gate

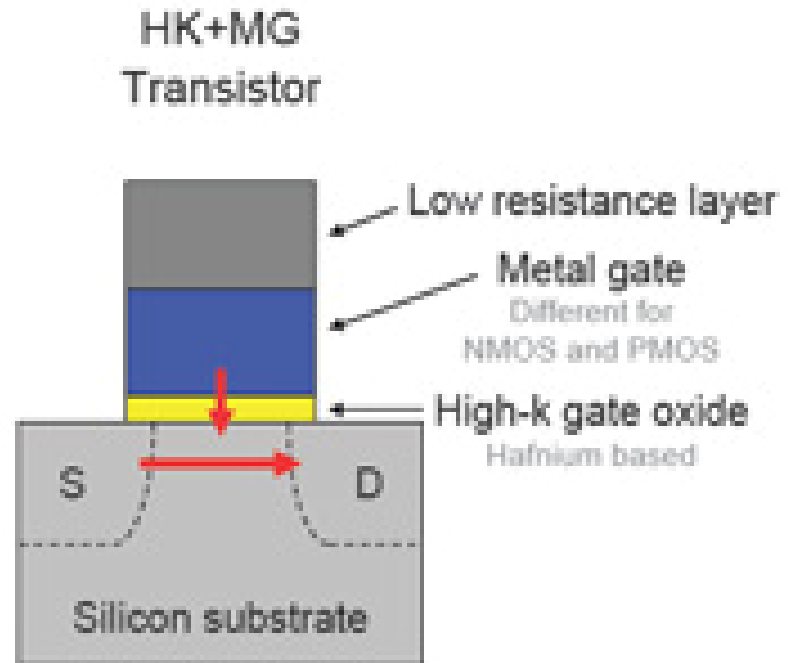
- Increases the gate field effect

#### High-k Dielectric

- Increases the gate field effect
- Allows use of thicker dielectric layer to reduce gate leakage

#### HK + MG Combined

- Drive current increased >20% (>20% higher performance)
- Or source-drain leakage reduced >5x
- Gate oxide leakage reduced >10x



## § 1.3 集成电路技术的发展规律（指数增长率）

应用需求和技术发展共同作用的结果

**Moore Law:** 在单IC芯片上集成的元件数，即集成电路的集成度，每18个月增加一倍，IC芯片的需求量也以相同的速度增加。具体为集成度每三年翻两番、特征尺寸缩小0.7倍

Intel公司创始人之一，时任Fairchild公司研究部主任 Gordon E. Moore于1964对未来IC发展趋势做的预测

Moore定律并不是一个物理规律，而是在商业利益推动下的技术发展，集成电路技术能够按照Moore定律发展的原动力来自于其可同时实现电路性能提高和制造成本的降低，因此可获得最大的经济利益。

## § 1.4 微电子技术的发展趋势和所面临的挑战

据预测，在未来15~20年内，集成电路技术将继续按**Moore**定律规律发展，与纳米技术的结合将成为发展趋势所面临的挑战：

- ❖ 基本物理规律（解决的途径：无基本物理规律无法突破）
- ❖ 材料（高**K**/金属栅、低**K**介质、应变**Si**，**SOI**）
- ❖ 技术（光刻，**Immersion**光刻技术、**EUV**光刻技术）
- ❖ 器件（**CMOS**，新的器件结构、新原理器件）
- ❖ 系统（互连：三维集成、**RF**互连、光互连等）
- ❖ 传统理论方面（模型、模拟、物理学基础）  
量子力学基础的模型模拟方法、介观物理、纳电子学
- ❖ 经济因素

针对相关的需求和面临的挑战，提出解决问题的方案，将是创新的源泉

# § 1.5 本课程的定位和内容安排

## ❖ 本课程的定位

讨论VLSI技术相关的半导体材料和器件中的基本物理问题，在基础物理和微电子专业技术之间建立起联系的桥梁

## ❖ 内容安排

第一章：引言

第二章：半导体的基本性质

第三章：平衡态半导体的物理基础

第四章：半导体中载流子的状态和运动规律

第五章：PN结

第六章：M/S与异质结

第七章：MOS结构

思考题：一个空白U盘与存满数据的U盘在质量上是否相同？