

# 半导体物理

主讲人：蒋玉龙

微电子学楼312室，65643768

Email: [yljiang@fudan.edu.cn](mailto:yljiang@fudan.edu.cn)

<ftp://10.14.3.11>

# 课程简介1

课程代码: INFO130022.01

课程性质: 专业必修      学分: 3

时间: 周三 (3, 4)、周五 (3, 4)

教室: Z2207

课程特点: 内容广、概念多

课程要求: 着重物理概念及物理模型; 基本的计算公式

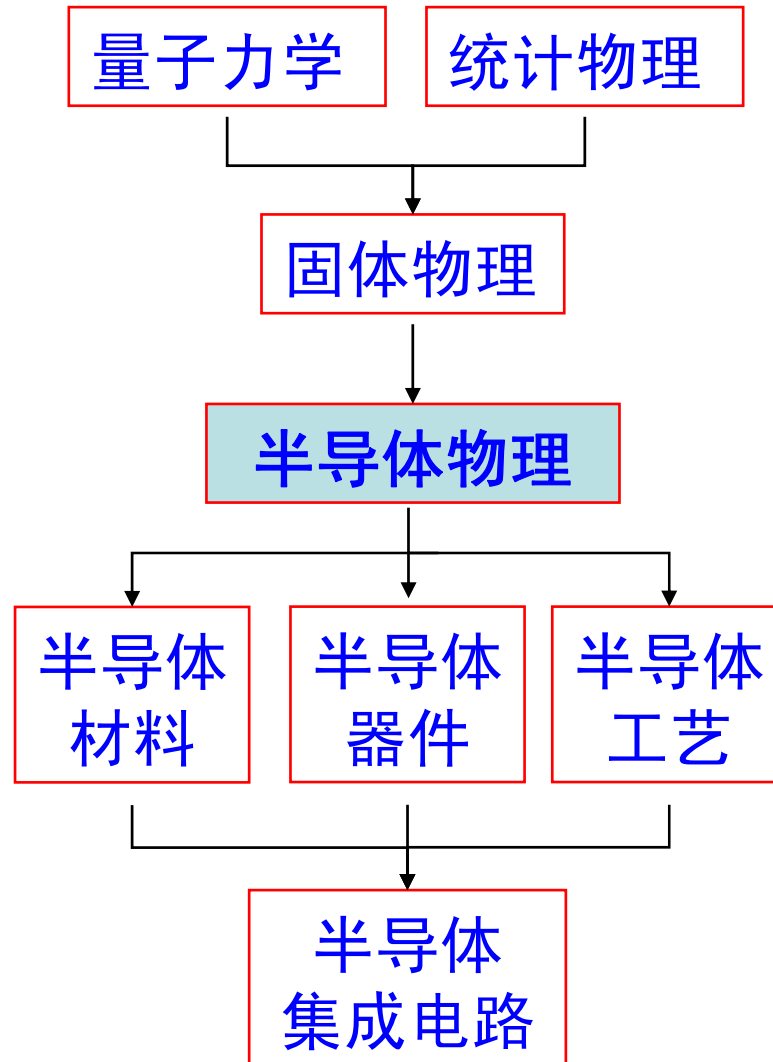
课程考核: 考勤 (10%), 作业 (20%), 期中 (30%), 期末 (40%)

# 课程简介2

## 参考书

1. Charles Kittel, 《固体物理导论》，化学工业出版社（2005）
2. 刘恩科, 朱秉升, 《半导体物理学》，国防工业出版社（2003）.
3. 叶良修, 《半导体物理学》，高等教育出版社（1987）.
4. R. M. Warner, B. L. Grung, 《Semiconductor-Device Electronics》，电子工业出版社（2002）.
5. K. Seeger, 《Physics of Semiconductor: An Introduction》，4th Ed. Springer-Verlag (2004).
6. 茹国平, 《半导体物理讲义》（2007）
7. 陆昉, 《半导体物理讲义》（2007）

# 课程简介3

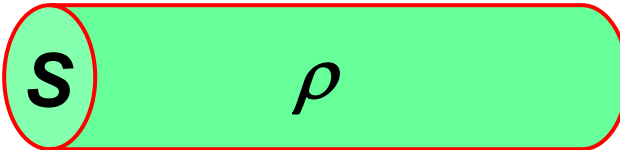


# 第一章 绪论

- 一、什么是半导体(semiconductor)
- 二、半导体的主要特征
- 三、半导体的发展历史和现状
- 四、半导体的明天

# 一、什么是半导体(semiconductor)?

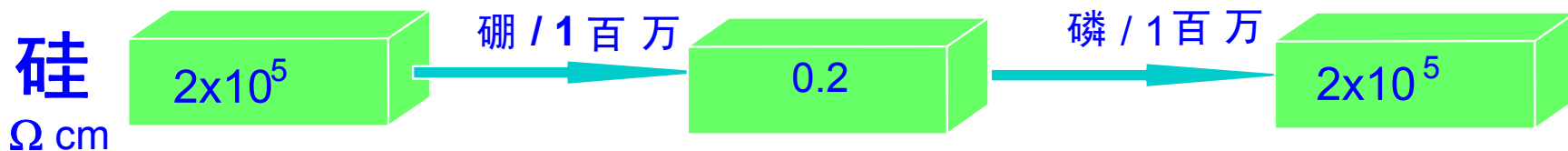
	导体	半导体	绝缘体
电阻率 ( $\Omega\text{cm}$ )	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	$10^{-4} \sim 10^{10}$	$>10^{10}$

$$R = \rho \frac{L}{S}$$


The diagram shows a green rounded rectangle representing a resistor. A red circle on the left end is labeled 'S' for cross-sectional area. The interior of the rectangle is labeled with the Greek letter rho ( $\rho$ ) for resistivity. Above the rectangle, the letter 'L' represents its length.

## 二、半导体的主要特征: 电阻率可在很大范围内变化

例子: 杂质对半导体电阻率的影响



硅的纯度仍高达99.9999%

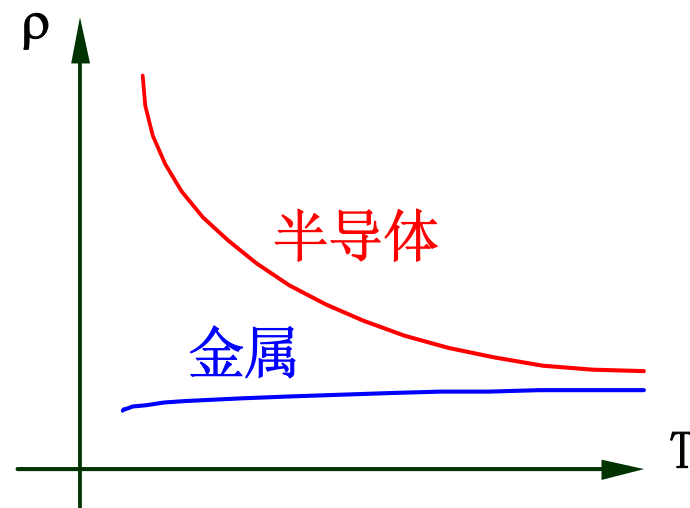
## 温度对半导体的影响

纯硅:  $T=300\text{K}$   $\rho = 2 \times 10^5 \Omega \text{ cm}$

$T=320\text{K}$   $\rho = 2 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$

## 光照对半导体的影响

硫化镉(CdS)半导体薄膜，无光照时的暗电阻为几十 $\text{M}\Omega$ ，当受光照后电阻值可以下降为几十 $\text{K}\Omega$ 。



气体、压力、磁场等对半导体电阻率都产生较大的影响

气敏传感器

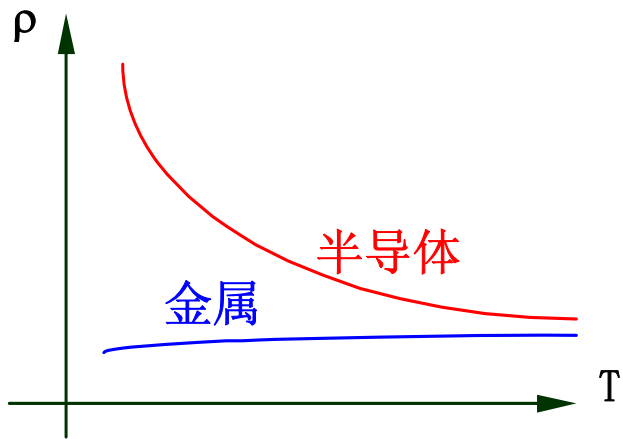
压力传感器

霍尔传感器

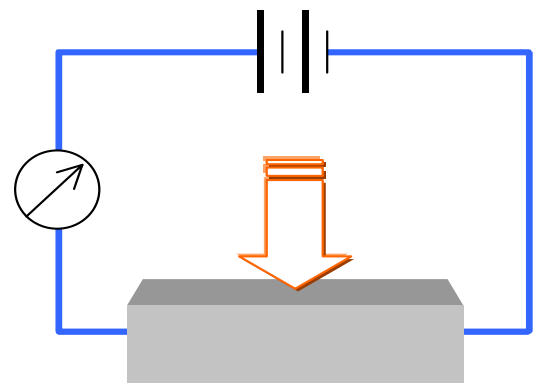
# 三、半导体的发展历史和现状

## 第一阶段：现象观察(1833-1931年)

- 1833年：M.Faraday发现半导体所具有的负电阻温度系数



- 1873年：W.Smith 首次发现半导体的光电导效应





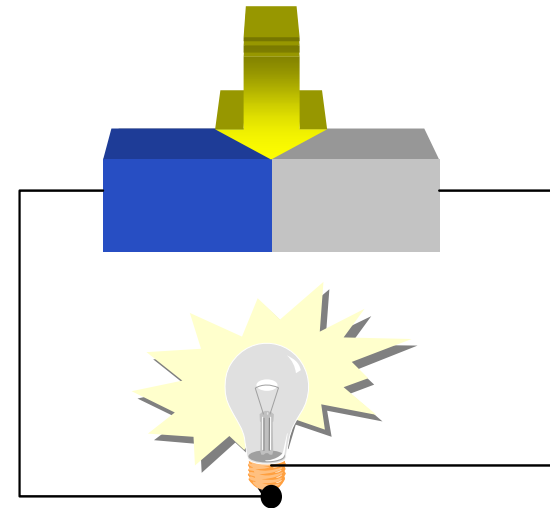
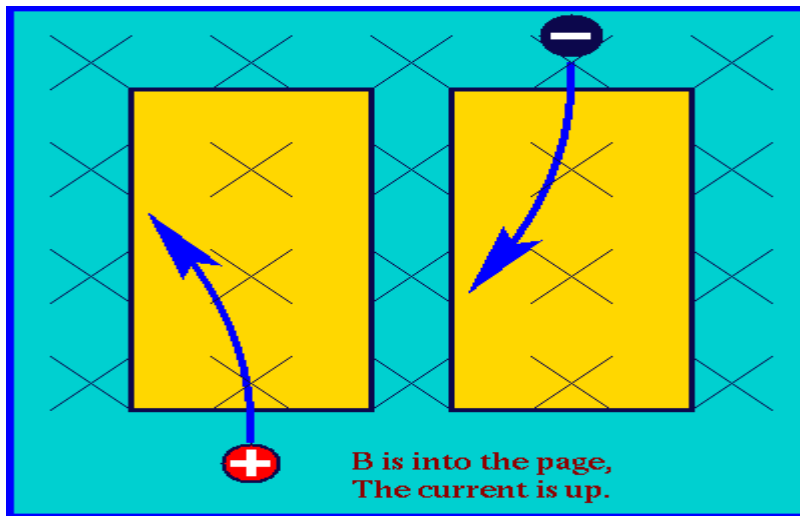
- 1874年: F.Braun 首次发现半导体的整流效应



1883年: 制造出硒整流器

1927年: 制造出氧化亚铜整流器

- 1879年: Hall首次发现 Hall效应 ( $R_H > 0$ ,  $R_H < 0$ )



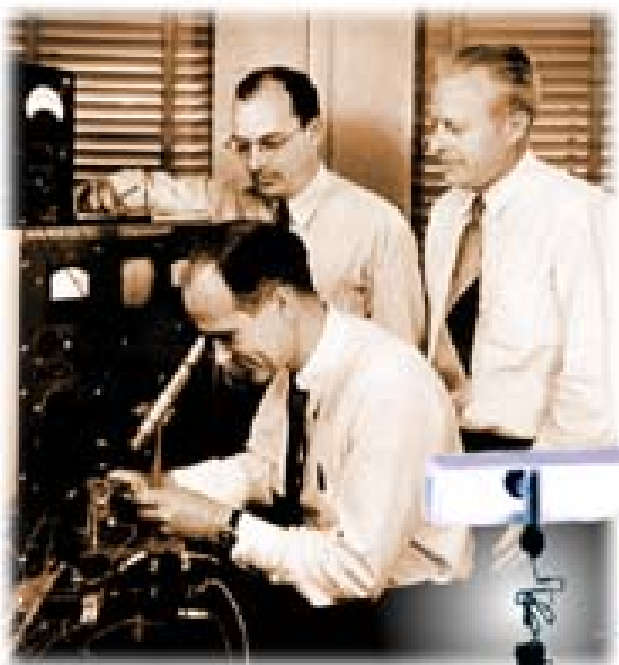
- 1931年: H.Dember 首次发现了光电池效应

## 第二阶段：理论指导

- 1931年：A.H.Wilson 通过解薛定谔方程发展了能带理论
- 1942年前后，多位科学家提出了基本类似的整流理论

## 第三阶段：晶体管诞生

- 1947年：Bardeen等人制造了第一个晶体管



**John Bardeen**

**William Bradford Shockley**

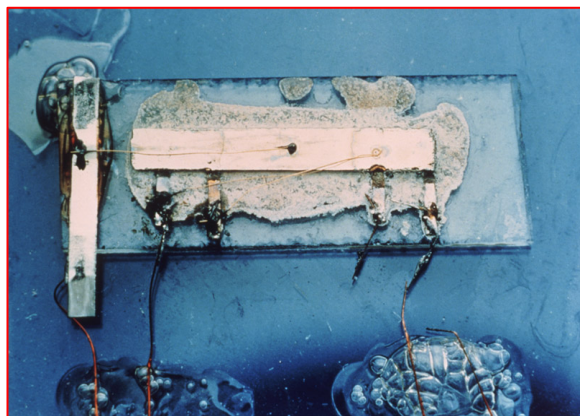
**Walter H. Brattain**



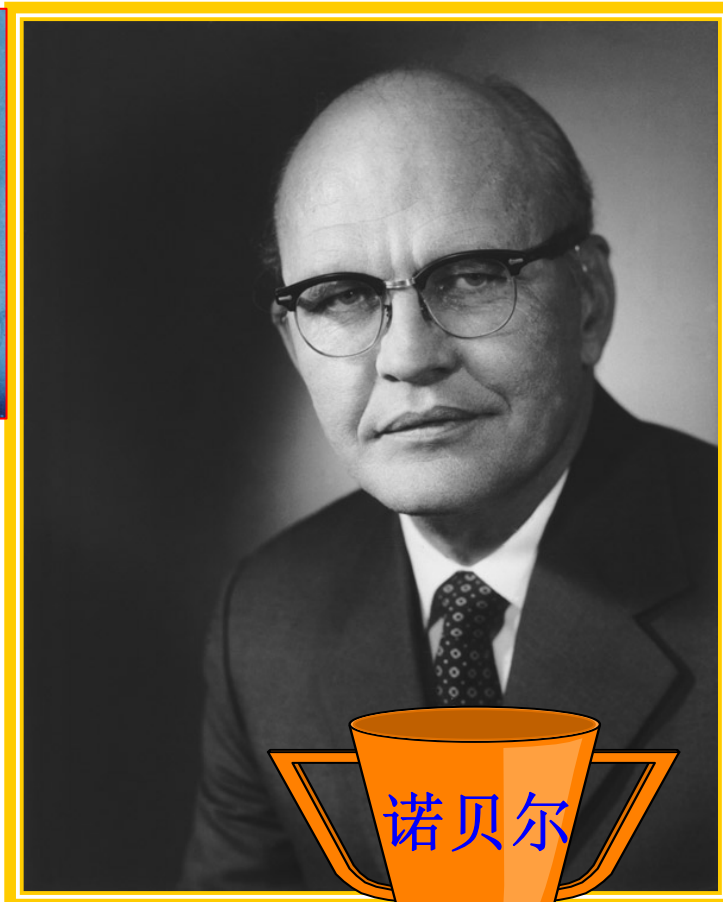
晶体管的三位发明人：  
巴丁、肖克莱、布拉顿

## 第四阶段：集成电路出现

- 1958年：杰克-S-基尔比发明第一块集成电路



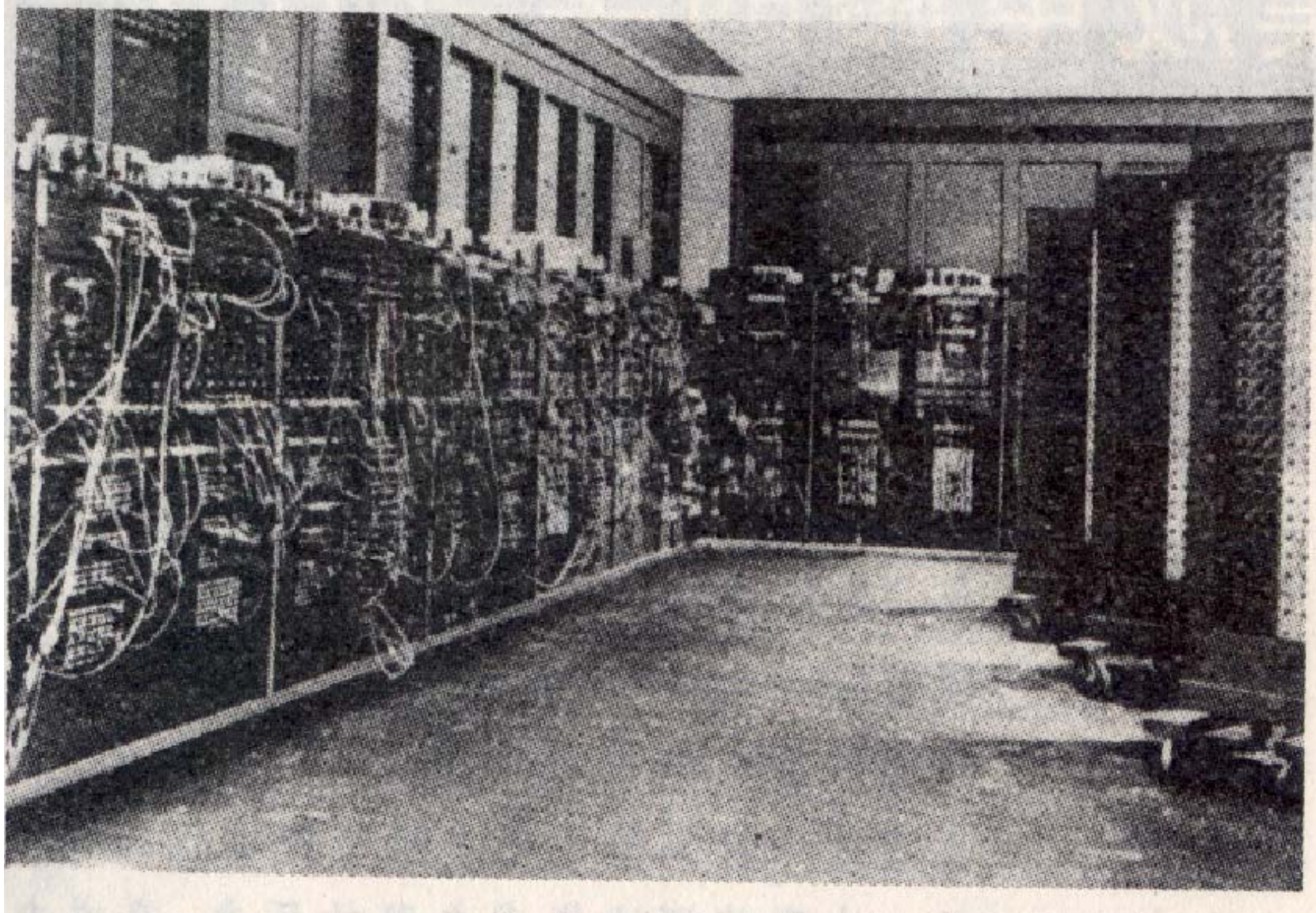
- 1966年：形成大规模集成电路
- 1971年：英特尔公司研制出第一块CPU集成电路4004(4位)
- 1973年：8008(8位)；
- 1978年：8086(16位)； .....



	SSI	MSI	LSI	VLSI	ULSI	GSI
元件数	$<10^2$	$10^2 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^5$	$10^5 \sim 10^7$	$10^7 \sim 10^9$	$>10^9$
门数	$<10$	$10 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^6$	$10^6 \sim 10^8$	$>10^8$

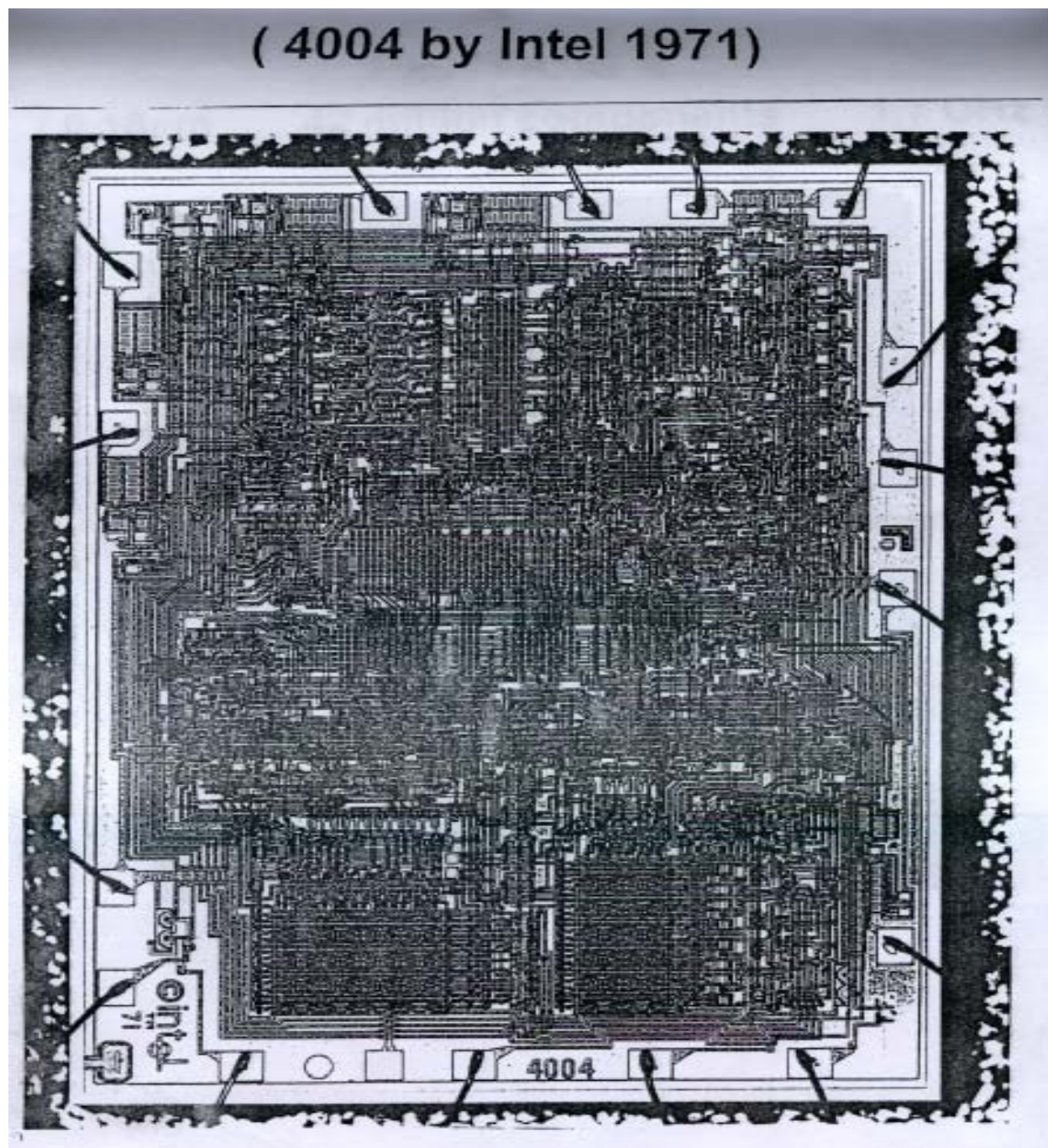
by云墨一点

1946年，世界上第一台电子计算机诞生，重30吨，用18000个电子管，电子管寿命有限，平均工作时间2.5小时





# 第一个微处理器



# PENTIUM 4微处理器芯片（0.18微米，1.7GHz,4200万个元件）

2001年

## PENTIUM 4

0.18 $\mu\text{m}$

42 million components

1.7 GHz



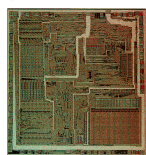


# 集成电路发展的 Moore定律 (1965年):

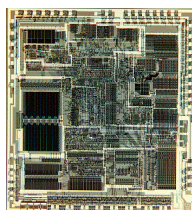
晶体管数目 (集成度) 每十八个月增长一倍 (即每三年增至四倍)



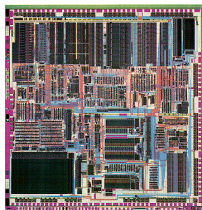
8080



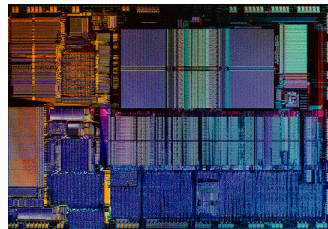
8086



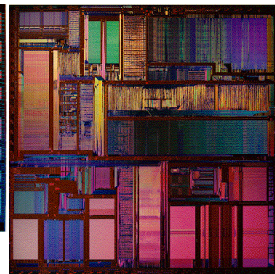
80286



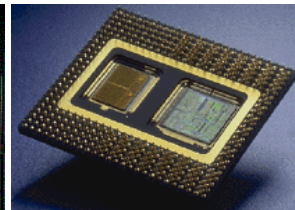
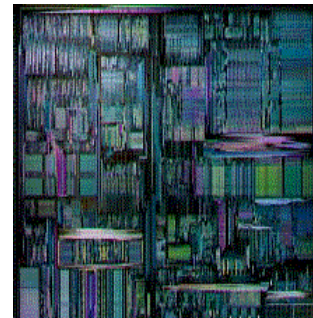
80386



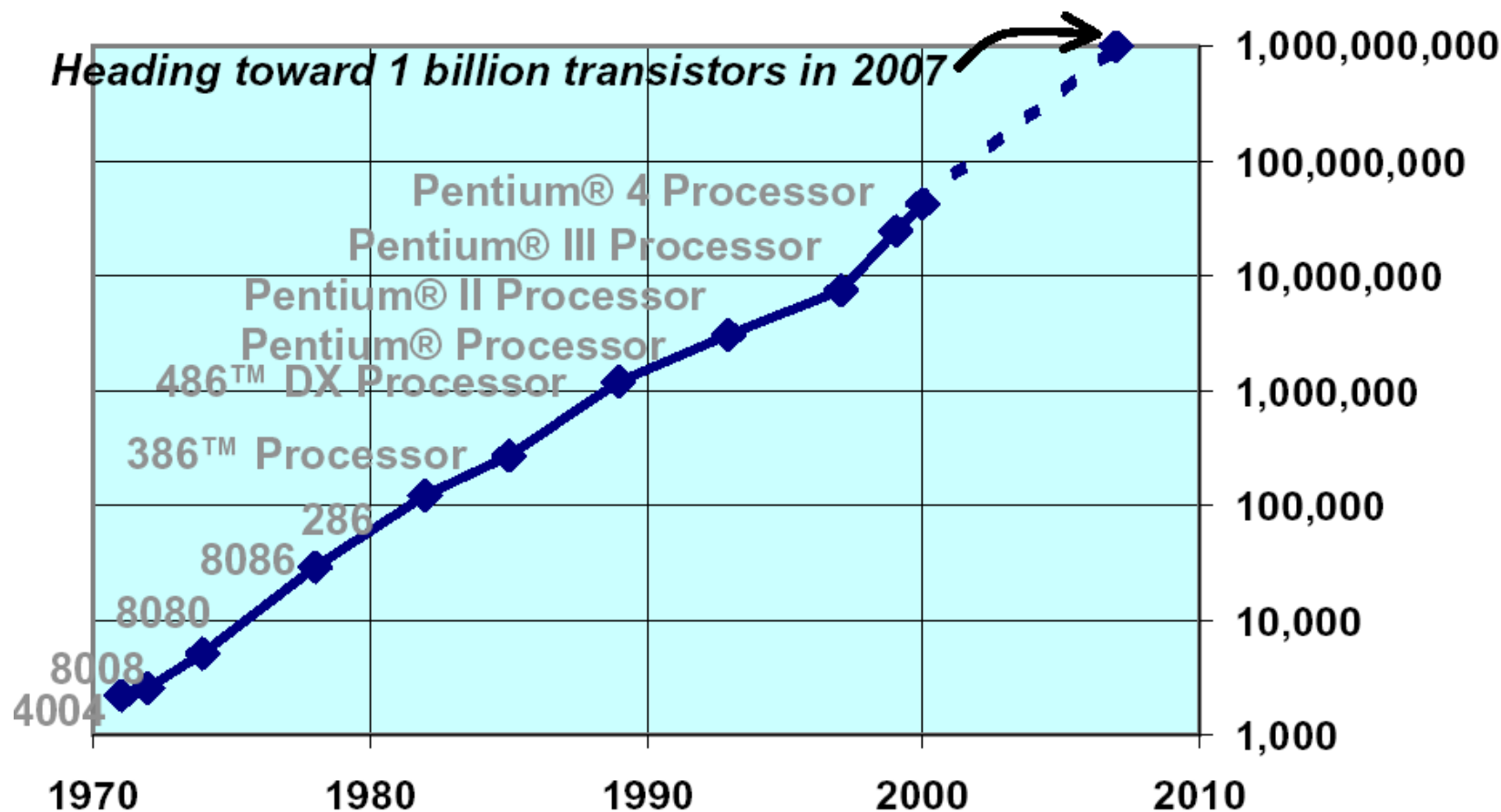
80486



Pentium

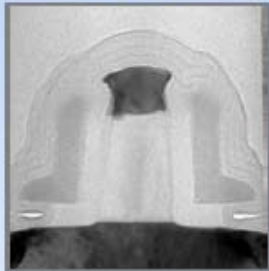


PentiumPro



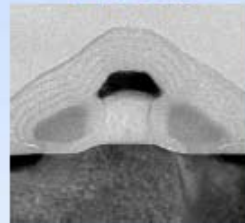
# 微电子 -> 纳电子

**90nm Node**  
**2003**



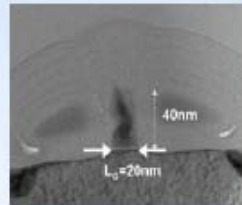
50nm Length  
(IEDM2002)

**65nm Node**  
**2005**



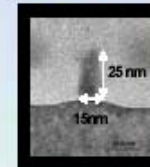
30nm Prototype  
(IEDM2000)

**45nm Node**  
**2007**



20nm Prototype  
(VLSI2001)

**32nm Node**  
**2009**



15nm Prototype  
(IEDM2001)

**22nm Node**  
**2011**



10nm Prototype  
(ITJ 2002)

Increasing leakage

Intel  
**Developer**  
Forum  
Spring 2003



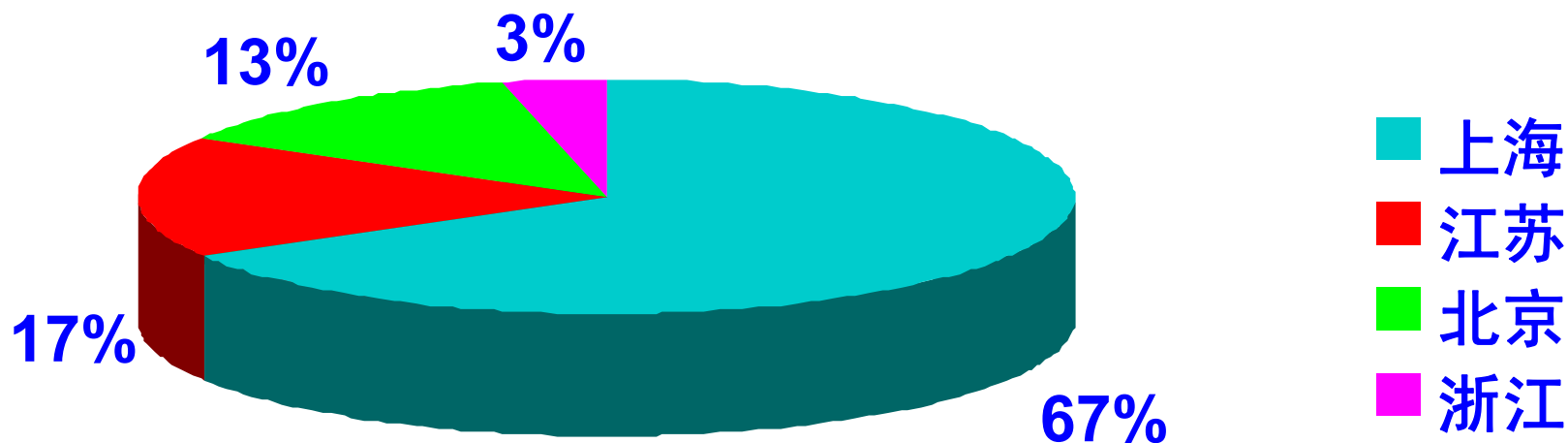
# 上海IC产业发展战略目标

年份	2000	2005	2010	2015	15年合计
销售收入(亿美元)	7	30	165	500	2300
5年平均年增长率 (%)		34	41	25	33
国内IC应用市场占有率	2%	9%	30%	50%	
国际市场占有率	0.43%	1%	3%	5%	
生产线技术水平	8"/0.35	8"/0.18	12"/0.10	12"/0.05	

浦东构造“世界级微电子产业基地” 22平方公里

- 到2010年总投资量600亿美元，建成20 ~ 40条生产线，200个设计公司 及20家封装/测试厂
- 带动上海700亿美元相关产业发展，成为第一大产业
- 上海贝岭：7.88亿元， 6英寸， 0.5 ~ 0.35微米
- 华虹NEC、英特尔
- 上海宏力：16 亿美元， 8英寸， 0.25微米
- 上海中芯国际：15亿美元， 8英寸， 0.25微米

# 我国集成电路骨干企业地区分布

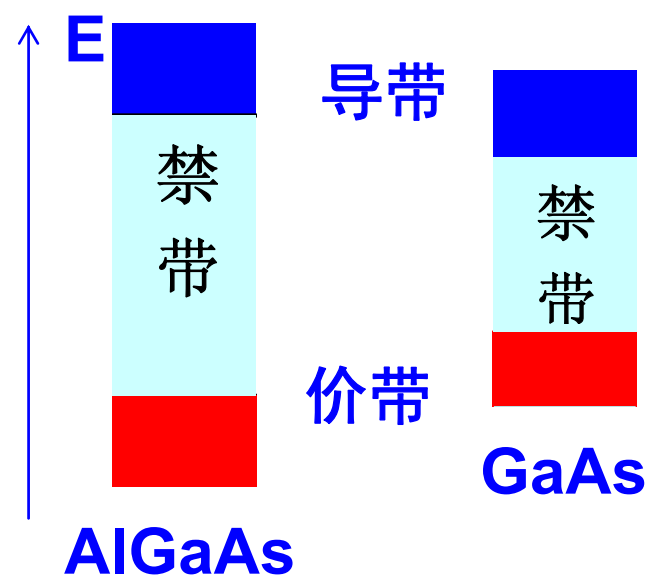
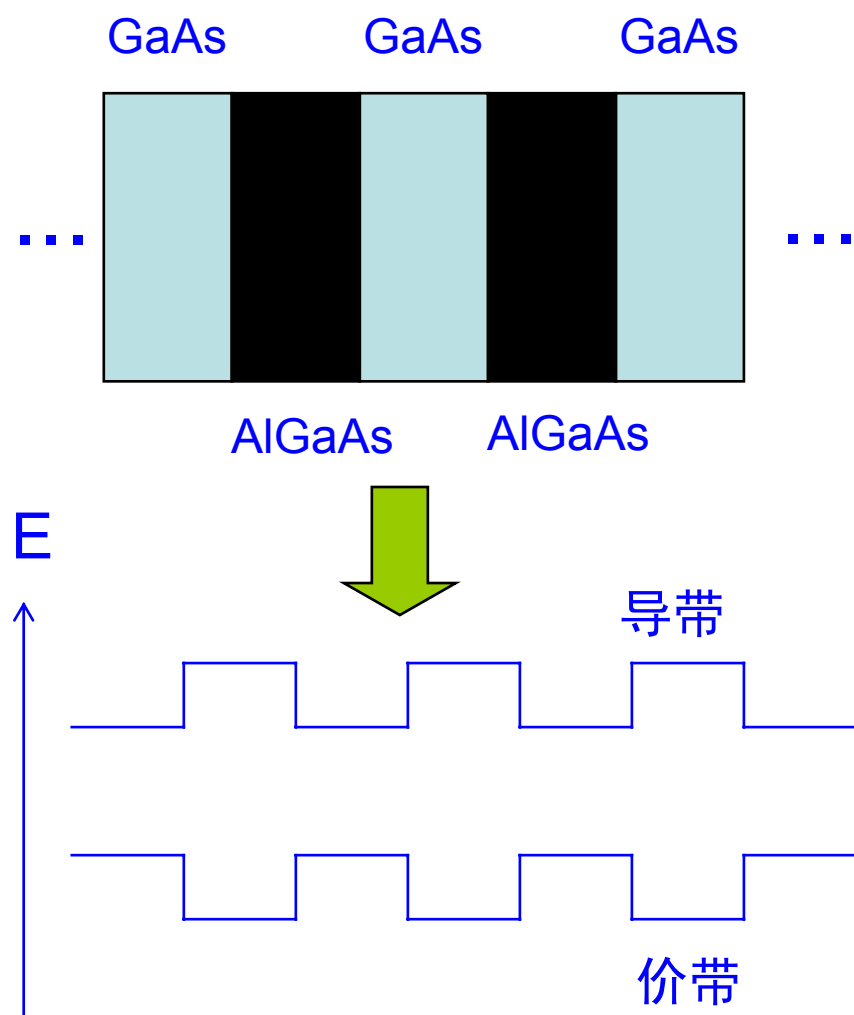


- 2000年：以集成电路为基础的电子信息产业成为世界第一大产业
- 硅是地球上除氧以外含量最丰富的元素，但它现在已经成为知识创新的载体，价值千金。这是典型的“点石成金”
- 至少在今后50年，微电子技术仍会高速发展

by 云墨一点

# 第五阶段：能带工程提出

- 1970年：Esaki(江琦) 提出超晶格半导体的概念
- 1971年：生长出GaAs/AlGaAs 超晶格材料

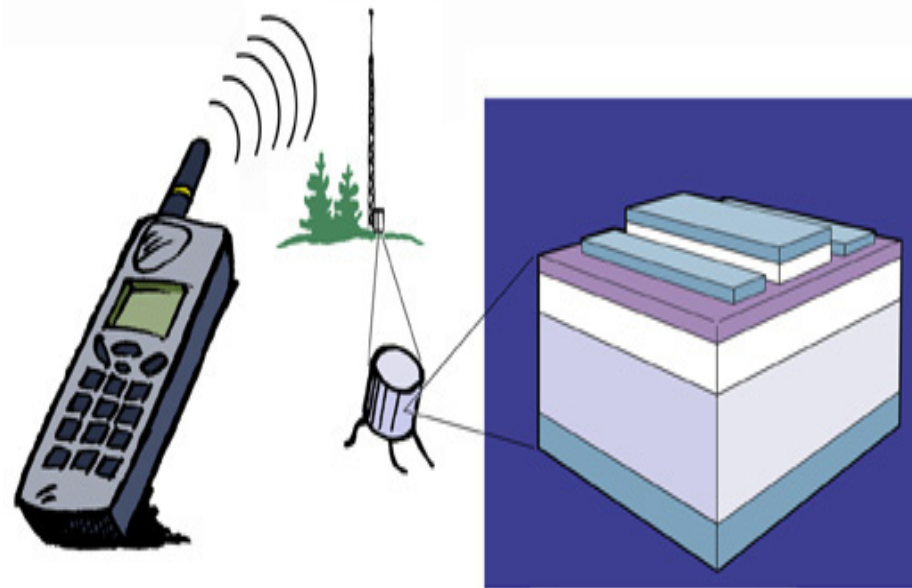


超晶格、量子阱

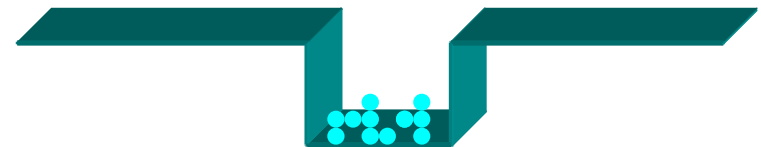
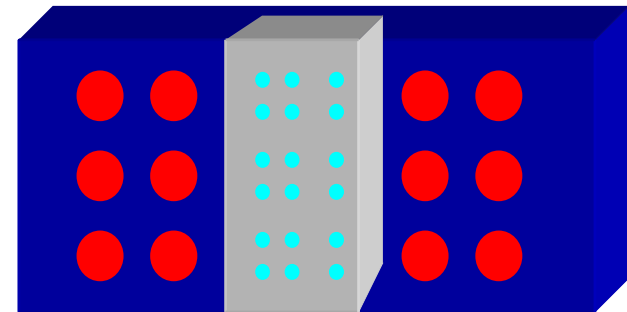
高速器件

光电子器件

## 例子：能带工程的应用1

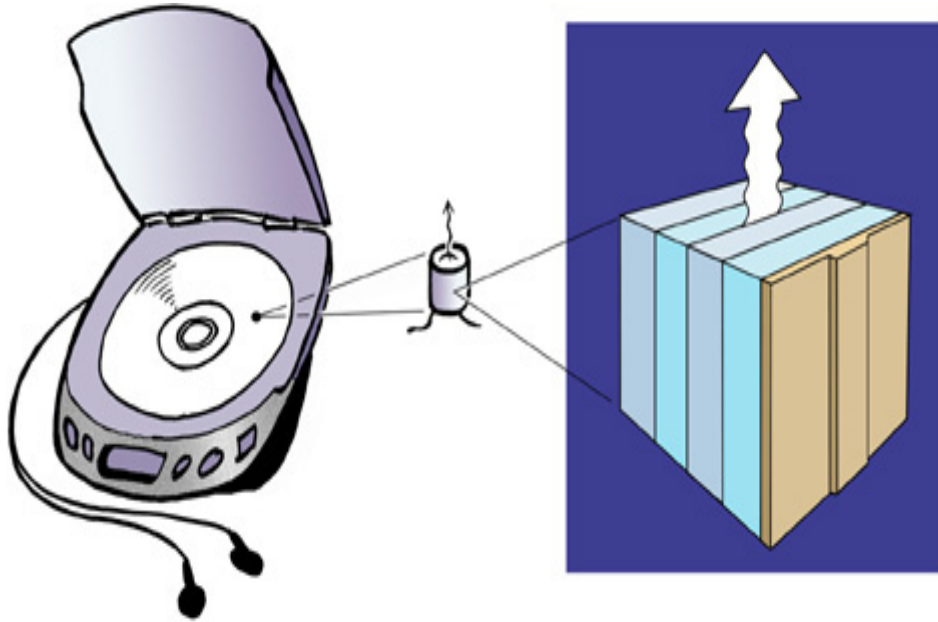


**High-speed  
devices**

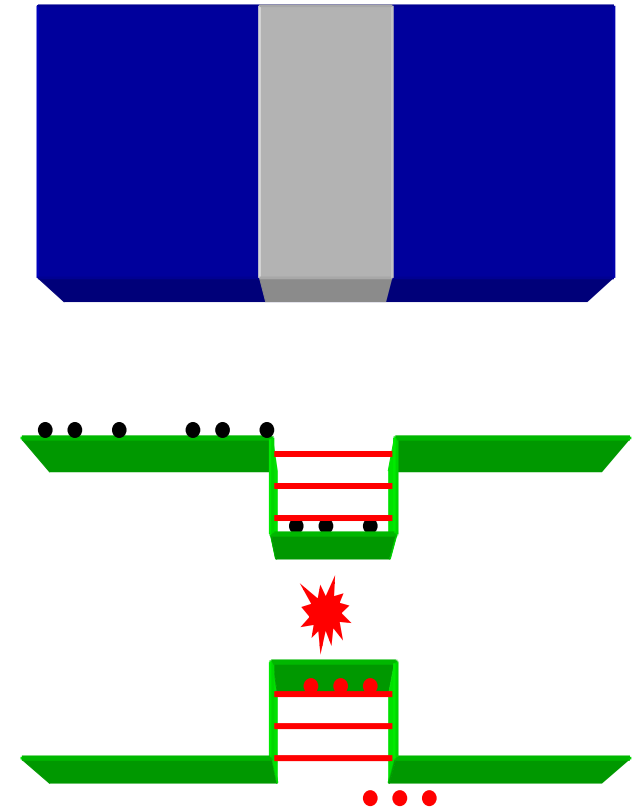


**two-dimensional  
electron gas**

## 例子：能带工程的应用2

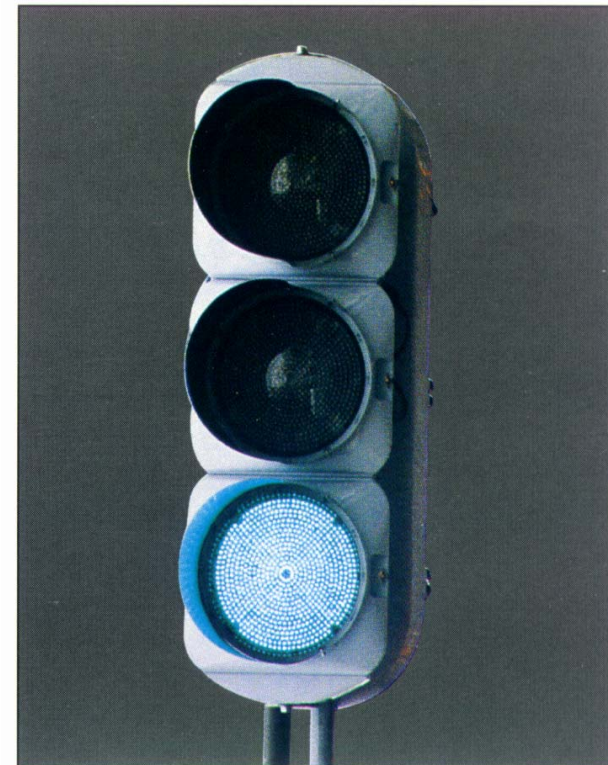
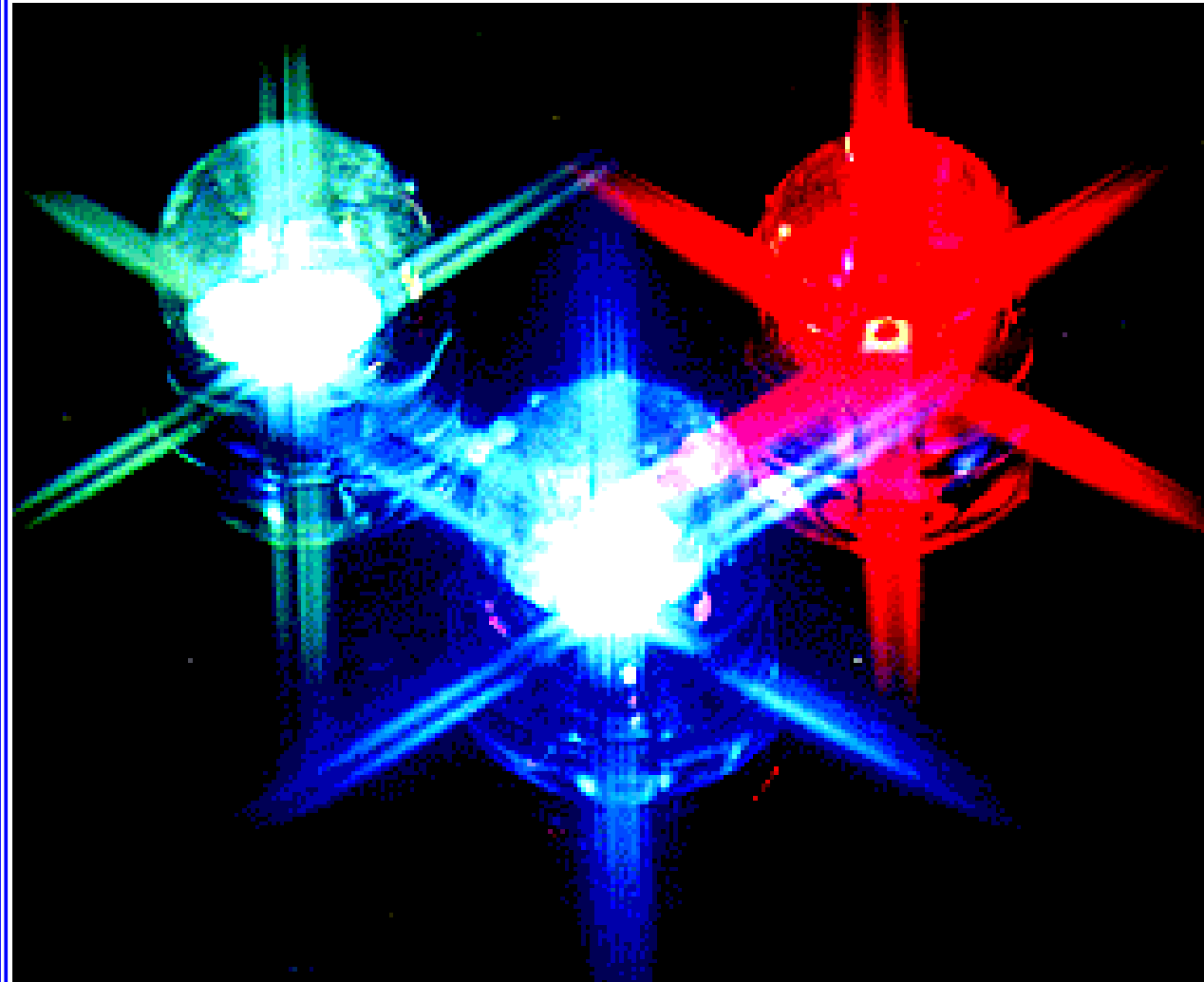


**Optic-electric  
Devices**



## 例子：能带工程的应用3

High Brightness LEDs: NICHIA CHEMICAL INDUSTRIES, LTD.

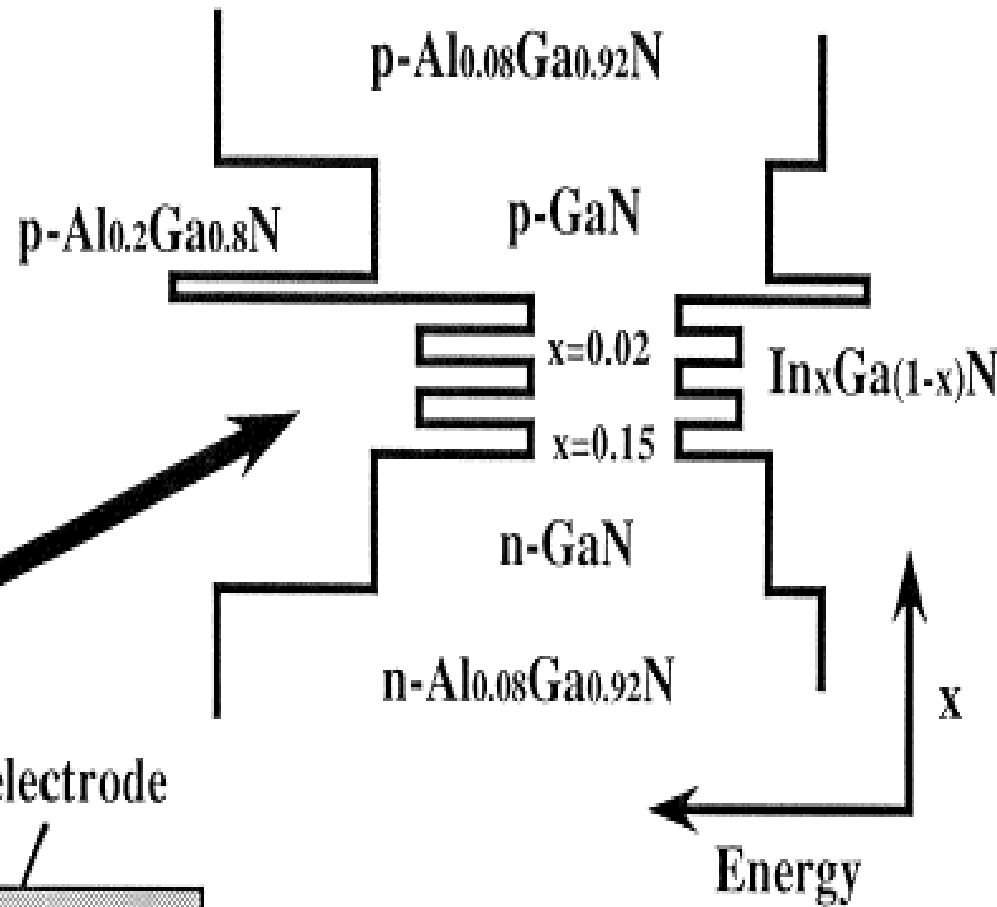
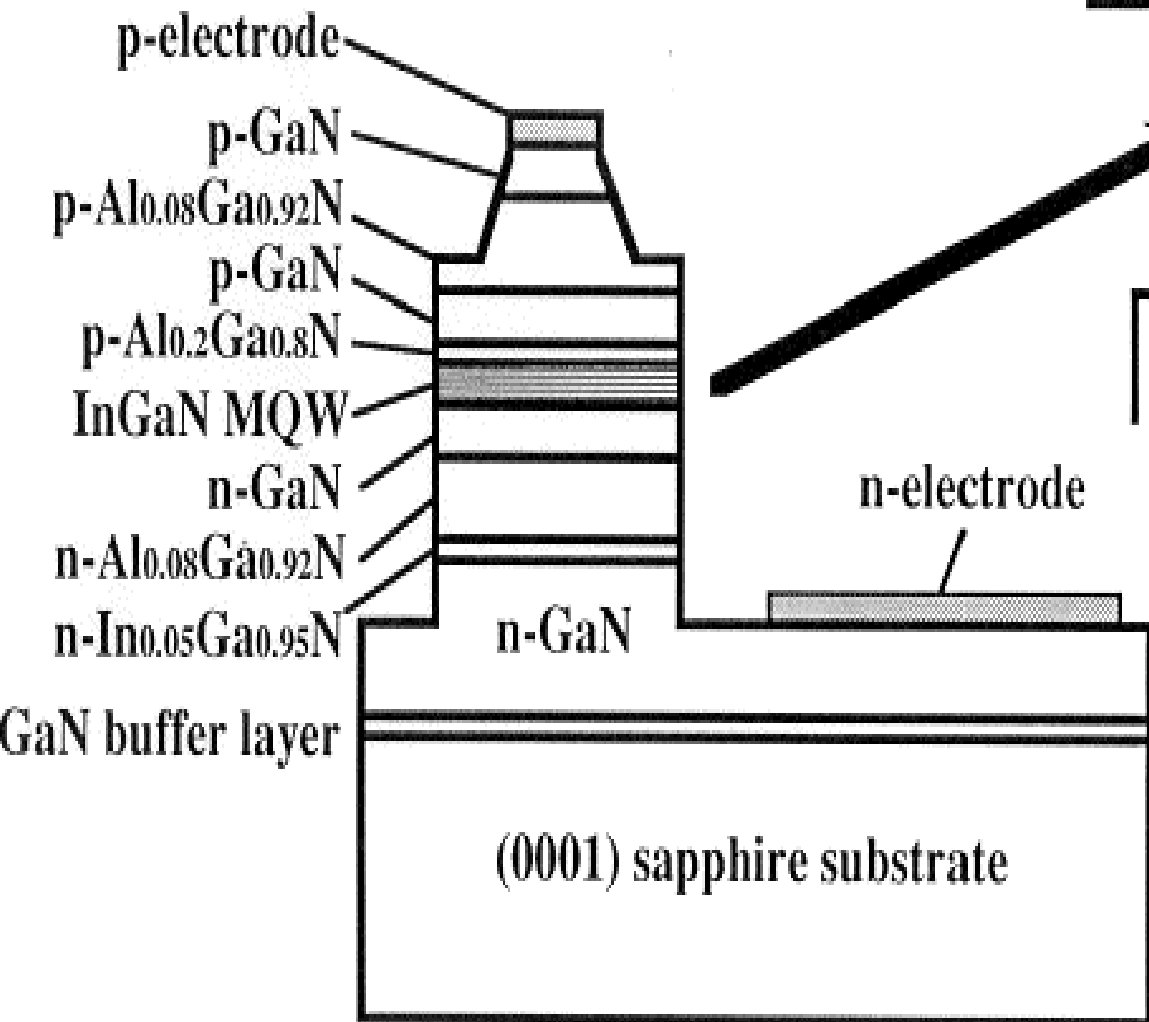


by 云墨一点

# 例子：能带工程的应用3

High Brightness LEDs: NICHIA  
CHEMICAL INDUSTRIES, LTD.

Mult-Quantum-Well Structure (MQW)



# 例子：能带工程的应用3 白炽灯和LED交通灯比较



Traffic lights cost comparison (without reduced maintenance)

长寿命、节能、安全、色彩丰富

	Incandescent	LED
No. of lamps	1	280
Cost of lamps	\$2.50	\$42.00
Power requirements	150 W	20W
energy consumption (kWhr/Yr)	788	105
Annual electrical bill (at \$0.10/kwhr)	\$78.80	\$10.50
Lifetime	2,000h	>100,000h



by云墨一点  
美国

设立《半导体照明国家研究项目》，计划用 1 0 年时间，耗资5亿美元开发半导体照明。  
预测，到 2 0 1 0 年，美国将有 5 5 % 的白炽灯和荧光灯被半导体灯替代，每年节约电费可达 3 5 0 亿美元，形成 5 0 0 亿美元的大产业

日本

推行《2 1 世纪光计划》，投资 5 0 亿日元。  
提出要用半导体灯大规模替代传统白炽灯。

中国

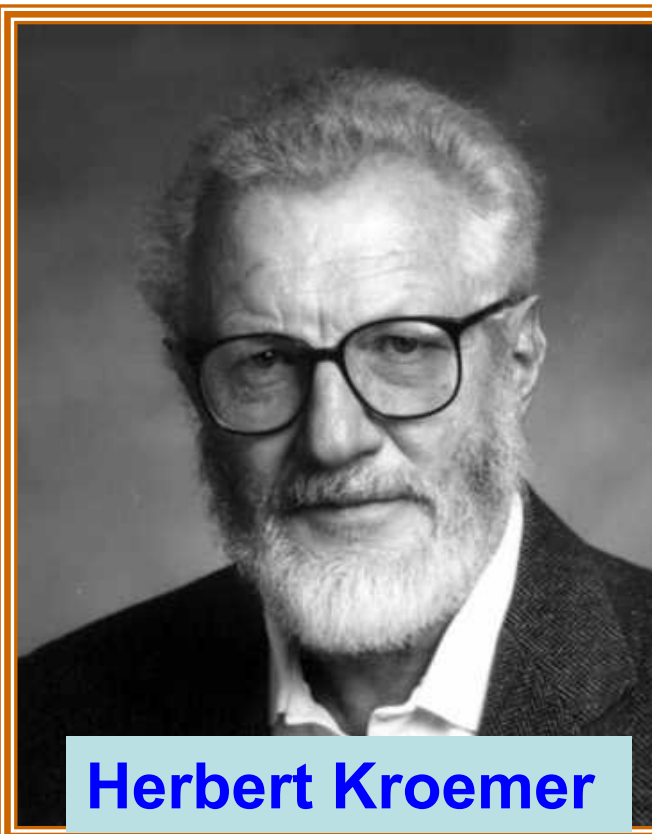
启动《国家半导体照明工程》，十一五期间安排100亿元资金用于发展我国半导体照明产业。  
专家估算：2010年如果半导体照明能够进入我国1/3的照明市场，那么每年就可以节电1000亿度，相当于一个三峡电站的发电量。

上海

成立《半导体照明工程技术研究中心》，2005年在浦东张江正式挂牌，上海将借此打造半导体照明光源产业的“光谷”。



**Zhores I. Alferov**



**Herbert Kroemer**



若尔斯-阿尔费罗夫:1962年提出半导体异质结构概念

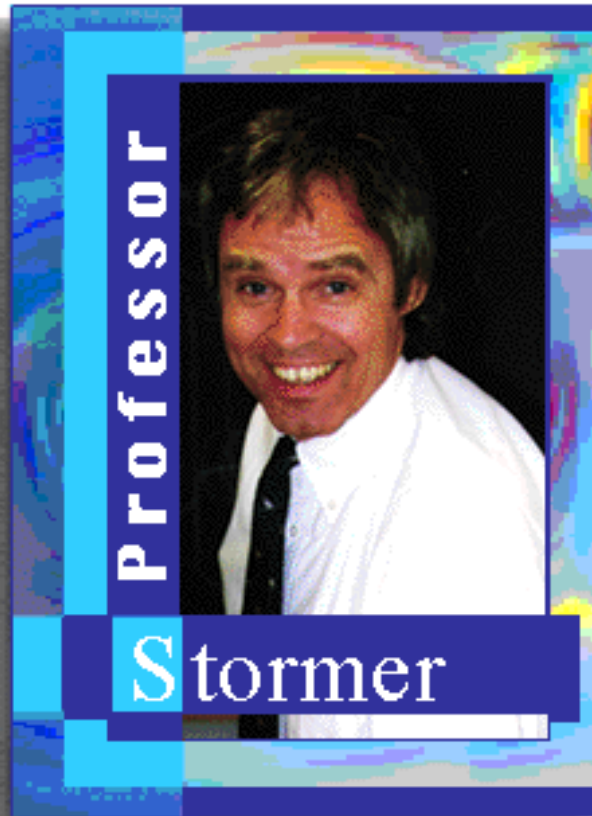
赫伯特-克勒默:1963年提出了双异质结构激光的概念

**for developing semiconductor  
heterostructures used in high-  
speed- and opto-electronics**

by云墨一点

K. Von Klitzing : 发现量子霍尔效应

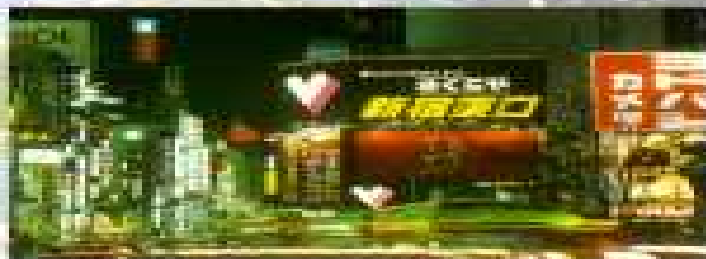
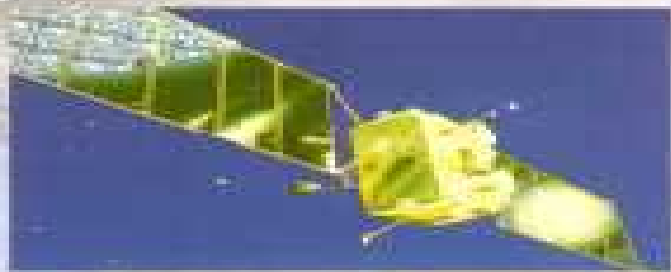
Robert B. Laughlin, Daniel C. Tsui,  
Horst L. Stormer: 发现分数化量子  
霍尔效应



Von Klitzing, Klaus







## 四、半导体的明天

- ◆ 微米 → 纳米（纳米电子学）
- ◆ 同质结 → 异质结（能带工程）
- ◆ 三维 → 低维（二维、一维、零维）
- ◆ 普通禁带 → 宽禁带
- ◆ 单晶 → 多晶（非晶）
- ◆ 无机 → 有机

**半导体——一个充满前途的领域！**

# 半导体物理

主讲人：蒋玉龙

微电子学楼312室，65643768

Email: [yljiang@fudan.edu.cn](mailto:yljiang@fudan.edu.cn)

<ftp://10.14.3.11>



# 第二章 固体物理导论

## 2.1 晶体结构

## 2.2 晶体衍射和倒易点阵

## 2.3 自由电子费米气体

## 2.4 能带

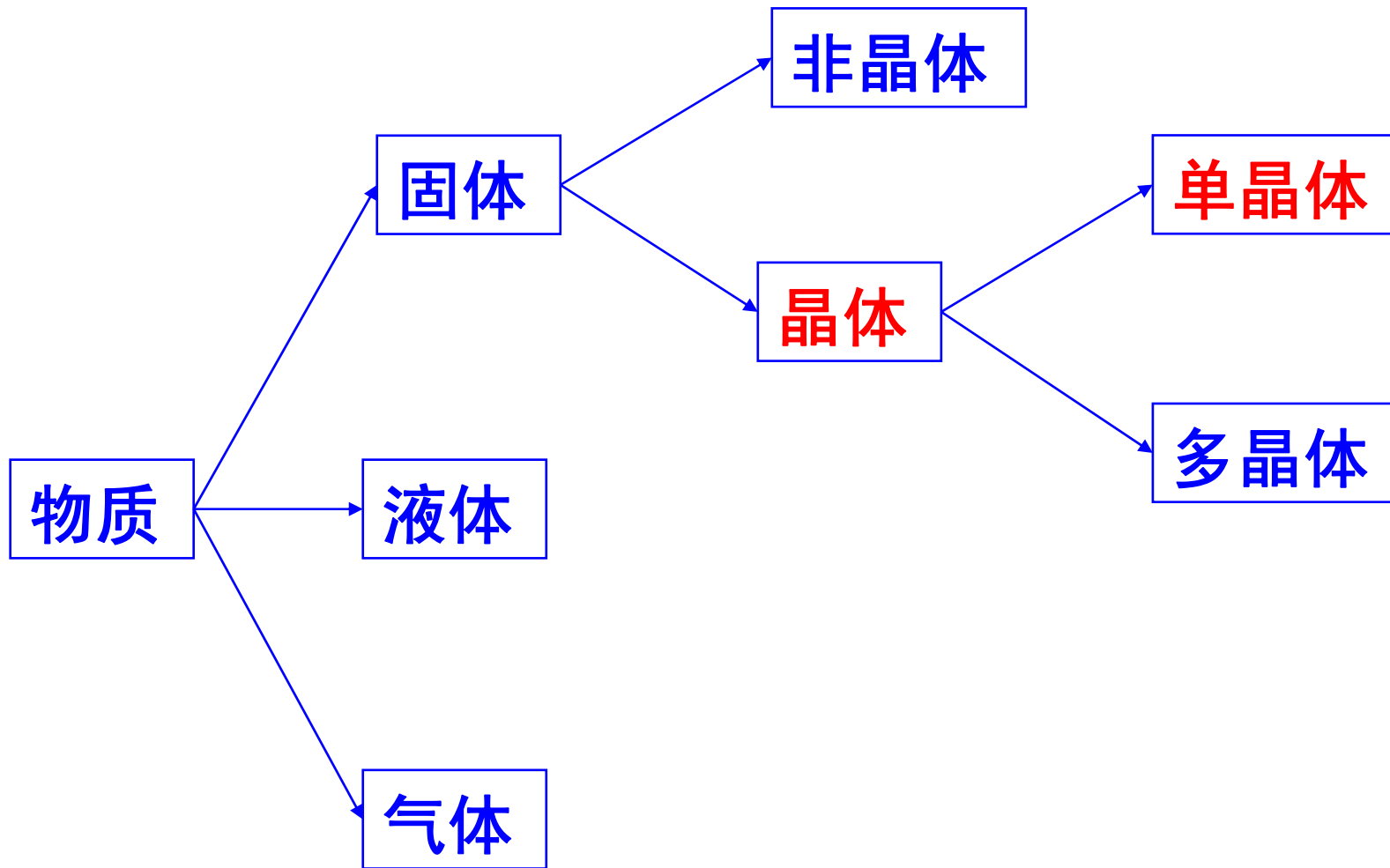
## 2.5 半导体晶体

## 2.1 晶体结构<sub>1</sub>

固体物理主要研究**晶体**和**晶体中的电子**。在本世纪初期，随着**X射线衍射**的发现以及对晶体性质一系列简明而成功的计算和预测的公布，固体物理的研究作为原子物理的一个扩充领域，开始发展起来。

—C. Kittel

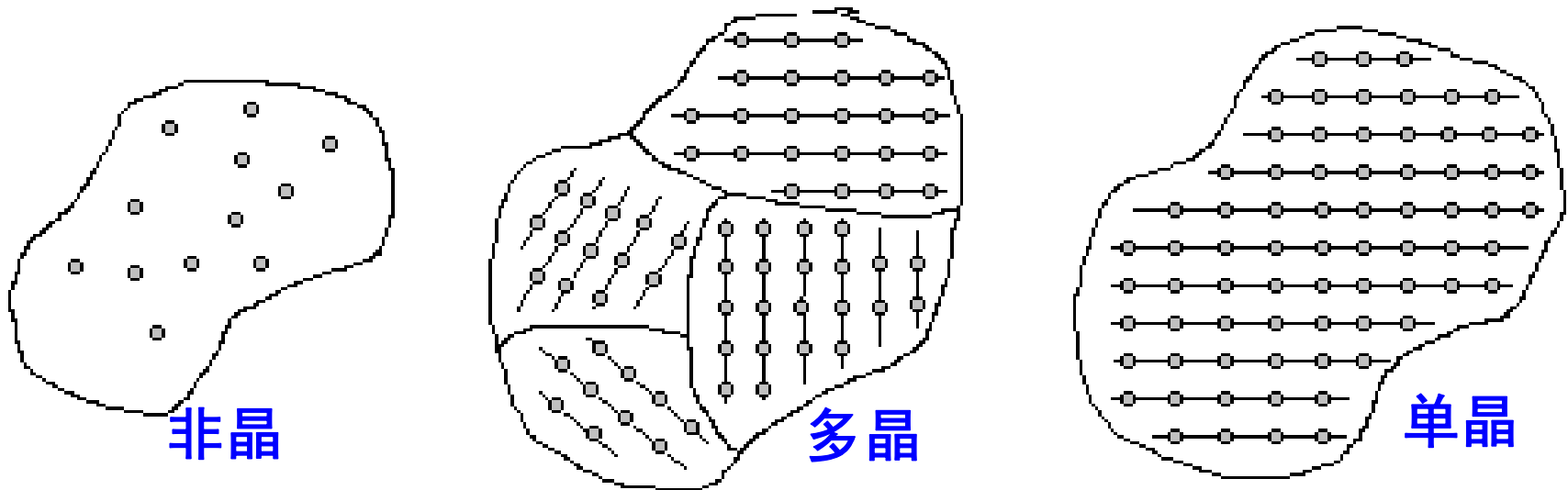
## 2.1 晶体结构<sub>2</sub>



## 2.1 晶体结构<sub>3</sub>

### 2.1.1 晶体的基本特点

- 组成晶体的原子按一定的方式有规则的排列而成
- 固定的熔点
  - 硅的熔点:  $1420^{\circ}\text{C}$ , 锗的熔点:  $941^{\circ}\text{C}$
- 单晶具有方向性: 各向异性



## 2.1 晶体结构<sub>4</sub>

### 2.1.2 原子的周期性阵列

- 理想晶体是由**全同**的结构单元在空间无限重复而构成的。
- 结构单元组成：  
单个原子（铜、铁等简单晶体）  
多个原子或分子（ $\text{NaCd}_2$ ，1192个原子组成最小结构单元！；蛋白质晶体的结构单元往往由上万了原子或分子组成！）
- 晶体结构用**点阵**来描述，在点阵的每个**阵点**上附有一群原子。
- 这样一个原子群成为**基元**。
- 基元在空间重复就形成晶体结构。

## 2.1 晶体结构<sub>5</sub>

### 2.1.2.1 点阵平移矢量和点阵

- 给定三个基本平移矢量 $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$

$$\vec{r}' = \vec{r} + u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c} \quad (u, v, w: \text{整数})$$

结果：从任意一个点 $\mathbf{r}$ 去观察原子排列时，同从 $\mathbf{r}'$ 点去观察所看到的原子排列在各方面都是一样的。

**点阵**的定义：让 $u$ ,  $v$ ,  $w$ 取所有整数值，由上述方程所确定的一族点 $\mathbf{r}'$ 就定义了一个点阵。

一点阵就是点在空间中周期性的规则排列。

一点阵是一种数学上的抽象，只有当原子基元以同样方式安置于每个阵点上，才能形成晶体结构。

## 2.1 晶体结构<sub>6</sub>

基本关系

点阵+基元=晶体结构

初基平移矢量的定义：若有任意两个点 $r$ 和 $r'$ ，通过适当选择整数 $u, v, w$ ，它们始终满足点阵的定义方程，而且从这两个点所观察到的原子排列是一样的，那么这个点阵和平移矢量 $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ 就称为初基的。

— 定义确保了没有比这组初基平移矢量所构成的体积更小的晶胞存在于这个点阵中。

— 常用初基平移矢量来定义晶轴，但如果非初基晶轴更简单些，则采用非初基晶轴。

— 晶轴 $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ 构成一个平行六面体的三个邻边，如果只在平行六面体的角隅上有阵点，那么它就是个初基平行六面体。

## 2.1 晶体结构<sub>7</sub>

$$\vec{T} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$$

点阵平移操作定义：晶体通过晶体平移矢量 $\mathbf{T}$ 平行于自身的位移。

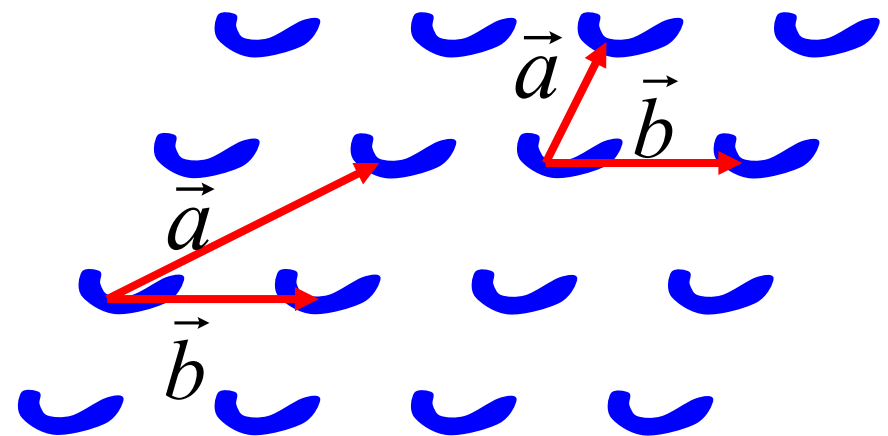
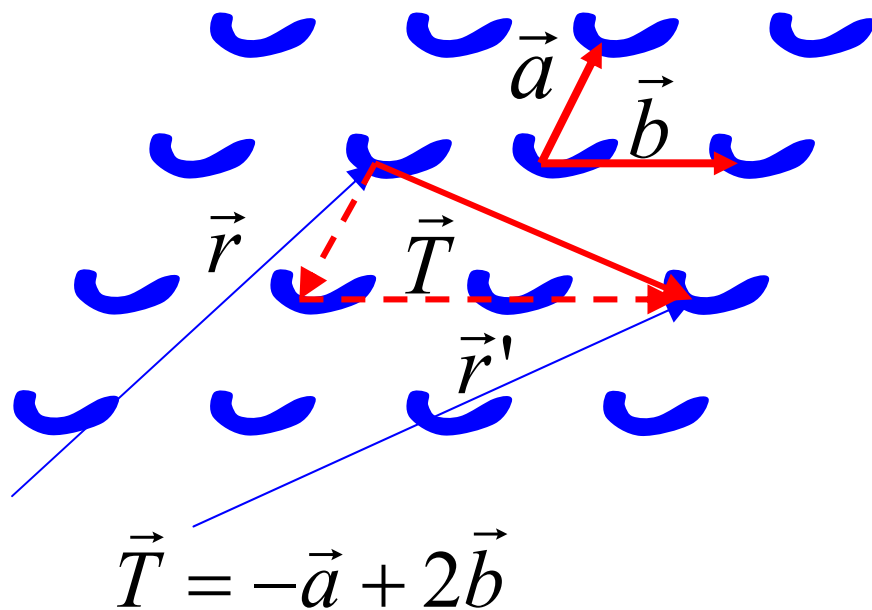
—任意两个阵点都以这种形式的矢量连接起来。



## 2.1 晶体结构<sub>8</sub>

### 2.1.2.2 对称操作

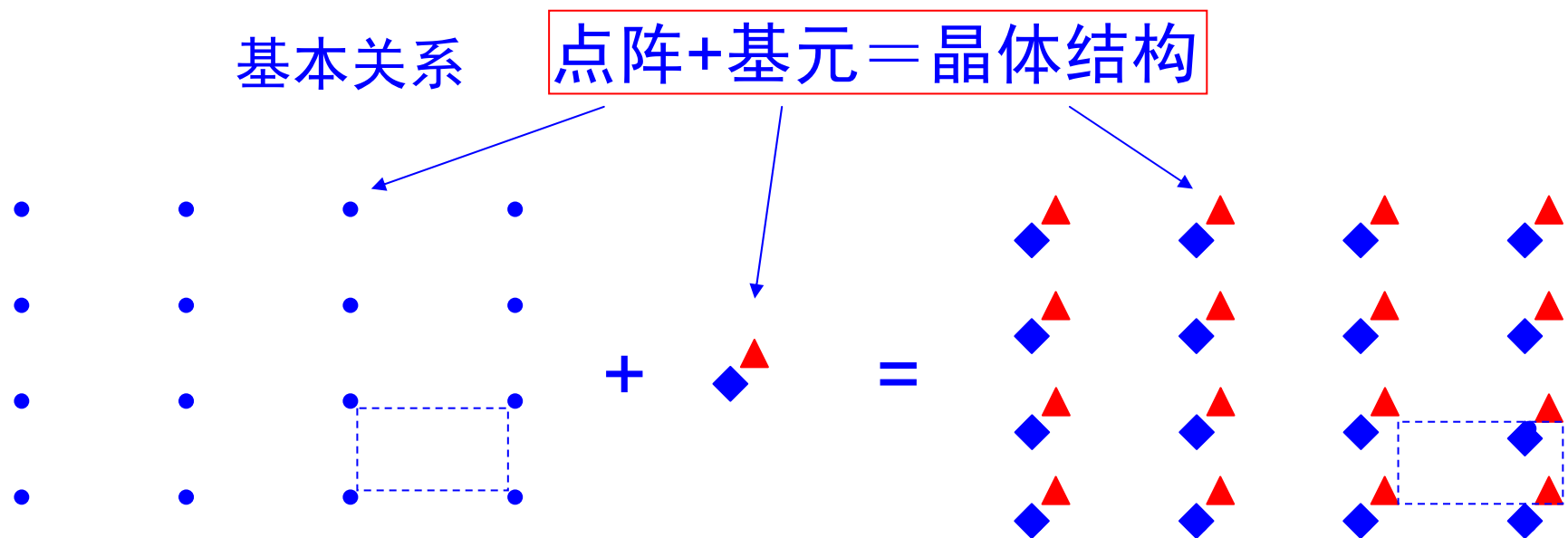
- 晶体的对称操作使晶体结构与自身重合。
- 包括：点阵平移操作 $\vec{T}$ 、转动操作和反映操作（后两者称为点操作）；复合造作：平移操作和点操作的组合操作。



晶轴不唯一

# 2.1 晶体结构<sub>9</sub>

## 2.1.2.3 基元和晶体结构

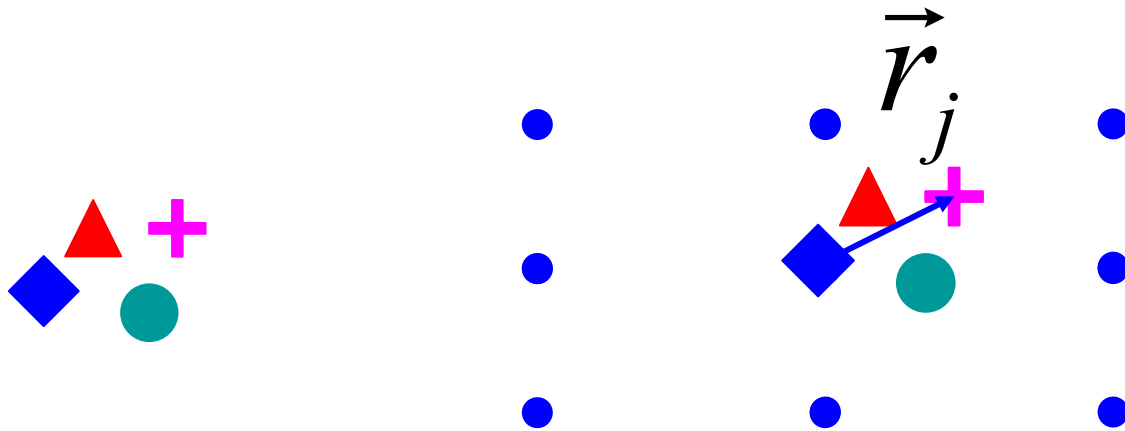


1. 每个阵点上附加一个基元，就构成晶体结构；
2. 每个基元的组成、位形和取向都是全同的；
3. 相对一个阵点，将基元放在何处是无关紧要的。

## 2.1 晶体结构<sub>10</sub>

基元中的原子数目，可以少到一个原子，如许多金属和惰性气体晶体；但也有很多结构，其基元中的原子数目超过1000个。基元中第 $j$ 个原子的中心位置相对于一个阵点的空间位置表达式：

$$\vec{r}_j = x_j \vec{a} + y_j \vec{b} + z_j \vec{c} \quad (0 \leq x_j, y_j, z_j \leq 1)$$

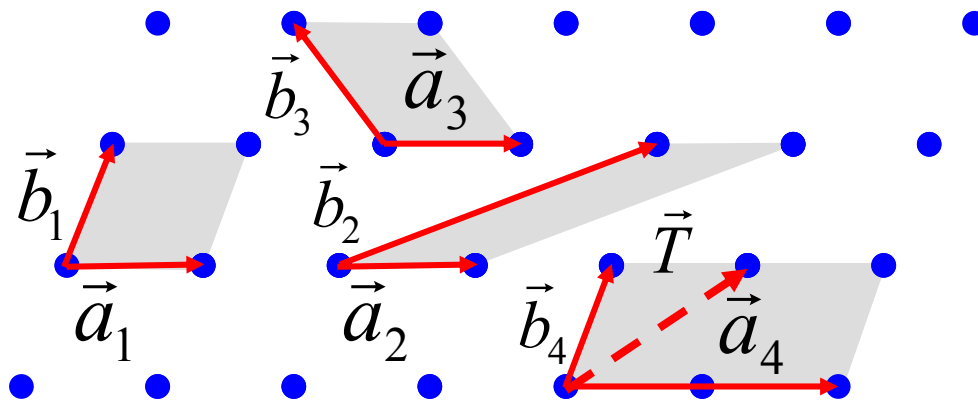


# 2.1 晶体结构<sub>11</sub>

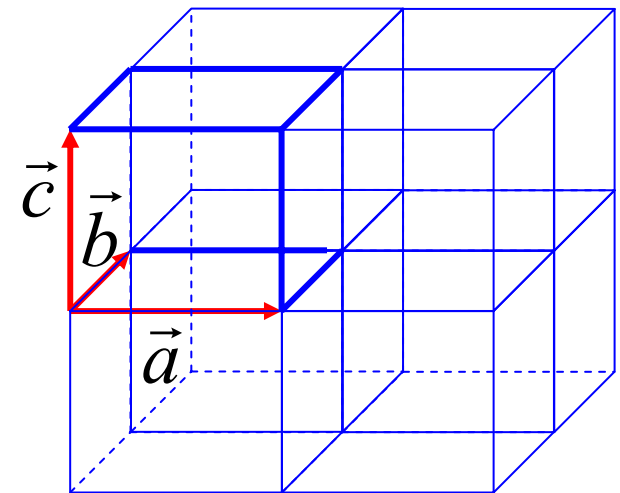
练习：初基平移矢量的选择

$$\vec{r}' = \vec{r} + u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$$

( $u, v, w$ : 整数)



二维点阵的初基轴  
和初基晶胞

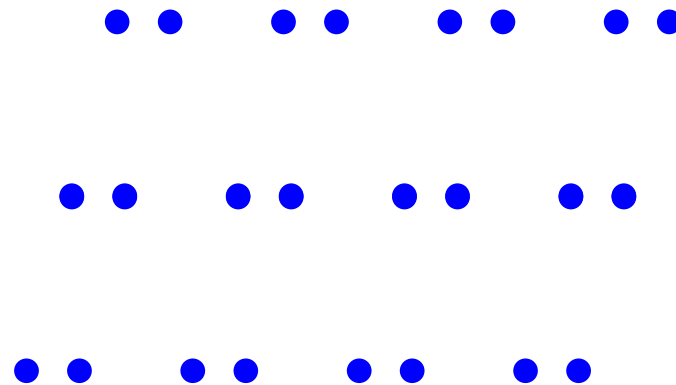


三维点阵的初基轴  
和初基晶胞

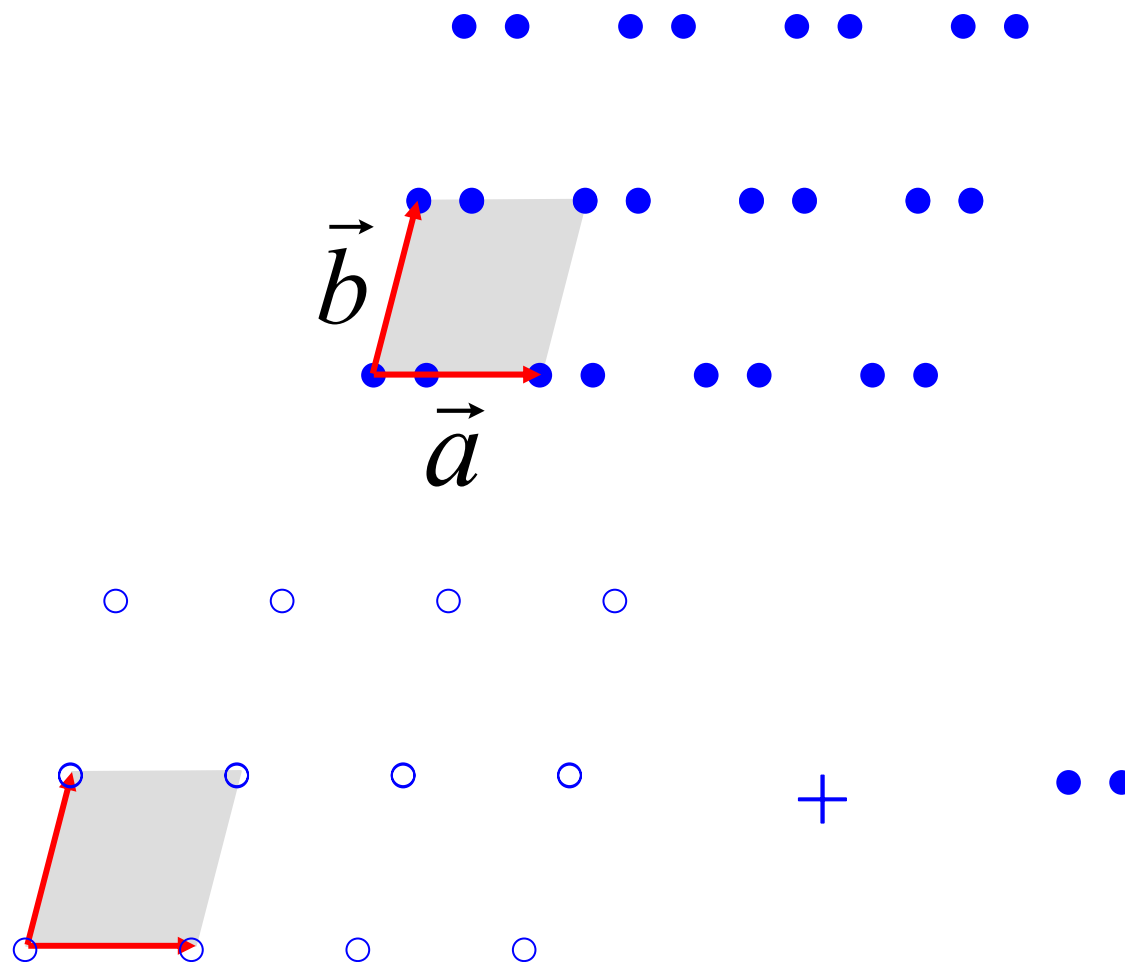
## 2.1 晶体结构<sub>12</sub>

练习：初基平移矢量的选择

假设这些点都是全同的，请画出一组阵点，选择初基轴和一个初基晶胞，以及与一个阵点相联系的原子基元



## 2.1 晶体结构<sub>13</sub>



基本关系

点阵+基元=晶体结构

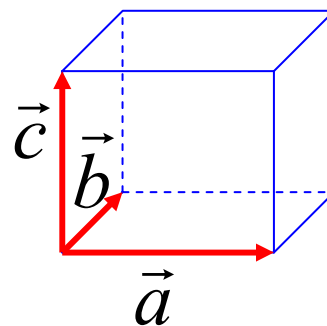
## 2.1 晶体结构<sub>14</sub>

### 2.1.2.4 点阵初基晶胞

- 初基轴  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  确定的平行六面体称为一个初基晶胞（单胞）
- 通过适当平移操作，晶胞可以填充整个空间
- 一个初基晶胞是一个体积最小的晶胞
- 同一点阵，可以有多种方式选择初基轴和对应的初基晶胞；但初基晶胞中的原子数目（密度）都是一样的
- 初基晶胞中只含有一个阵点（平行六面体的8个角隅，1/8共享）

$\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  确定的平行六面体的体积为

$$V_c = \left| \vec{a} \times \vec{b} \cdot \vec{c} \right|$$

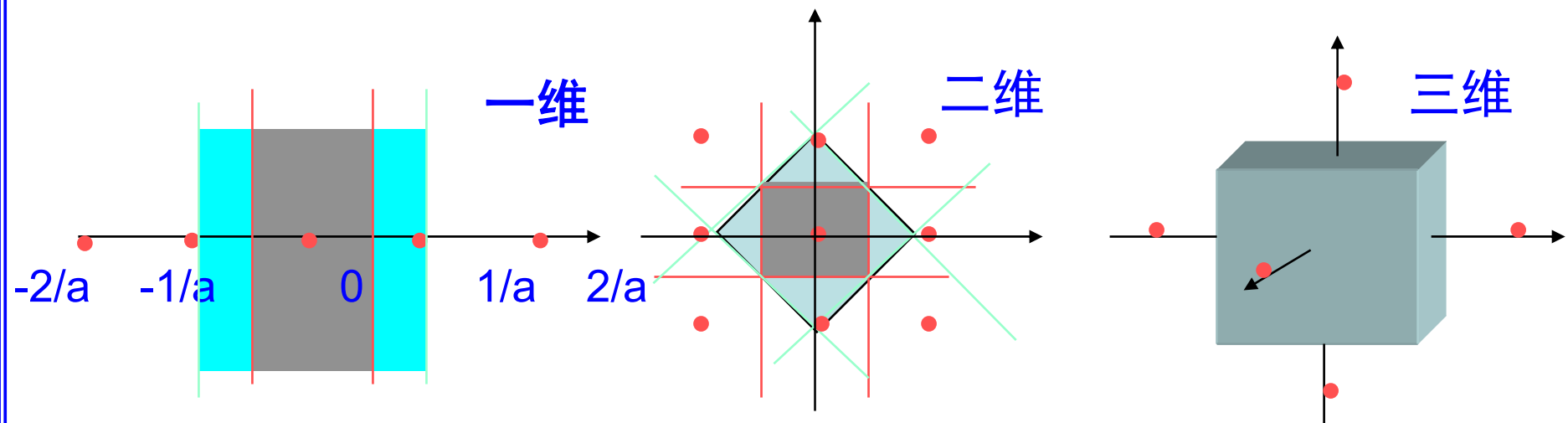


## 2.1 晶体结构<sub>15</sub>

### 初基晶胞的另一种选择方式

— Wigner-Seitz primitive cell (维格纳—赛茨初基晶胞)

- 把某个阵点同所有与它相邻的阵点用直线连接起来
- 在连线の中点处，作垂线和垂面
- 以这种方式围成的最小体积就是维—赛初基晶胞



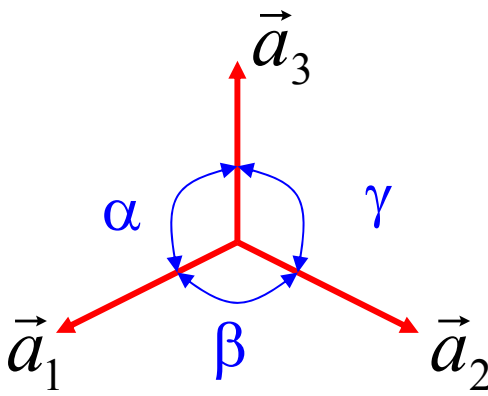


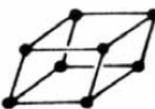
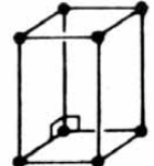
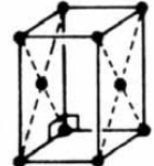


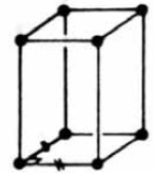

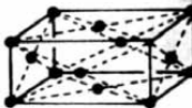
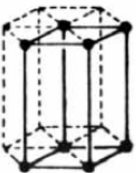
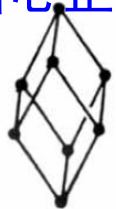
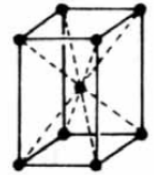
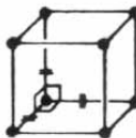
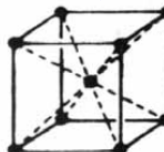
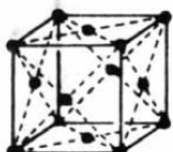
# 2.1 晶体结构<sub>16</sub>

## 2.1.3 点阵的基本类型

### 三维点阵类型

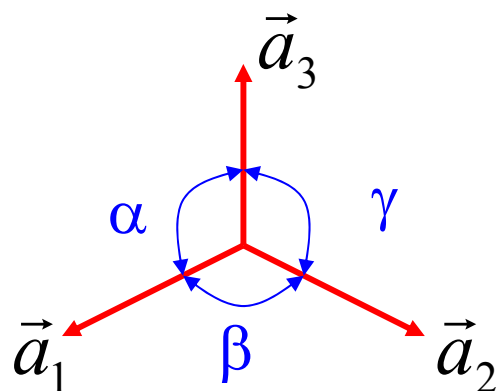
- 一根据惯用晶胞的轴间特定关系
- 一点对称群产生14种不同点阵类型
- 一1种一般性的，13种特殊性的
- 一布喇非点阵；图中是惯用晶胞，不一定总是初基晶胞



 Triclinic - P 简单三斜	 Monoclinic - P 简单单斜	 Monoclinic - B 底心单斜
 Orthorhombic - P 简单正交	 Orthorhombic - C 底心正交	 Tetragonal - P 简单四方
 Orthorhombic - I 体心正交	 Orthorhombic - F 面心正交	
 Hexagonal - P 六角	 Trigonal - R 三角	 Tetragonal - I 体心四方
 Cubic - P 简单立方	 Cubic - I 体心立方	 Cubic - F 面心立方

# 2.1 晶体结构<sub>17</sub>

任何一种真实晶体，对应的点阵都是十四种布喇非点阵之一。



晶系	单胞基矢的特性	布拉伐格子	所属点群
三斜晶系	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ 夹角不等	简单三斜	$C_1, C_2$
单斜晶系	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $a_2 \perp a_1, a_3$	简单单斜 底心单斜	$C_2, C_s, C_{2h}$
正交晶系	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $a_1, a_2, a_3$ 互相垂直	简单正交 底心正交 体心正交 面心正交	$D_2, C_{2v}, D_{2h}$
三角晶系	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ$ , $\neq 90^\circ$	三角	$C_3, C_{3i}, D_3, C_{3v}, D_{3d}$
四方晶系	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	简单四方 体心四方	$C_4, C_{4h}, D_4, C_{4v}$ , $D_{4h}, S_4, D_{2d}$
六角晶系	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $a_3 \perp a_1, a_2$ $a_1, a_2$ , 夹角 $120^\circ$	六角	$C_6, C_{6h}, D_6, C_{3v}$ , $D_{6h}, C_{3h}, D_{3h}$
立方晶系	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	简单立方 体心立方 面心立方	$T, T_h, T_d, O, O_h$

## 2.1 晶体结构<sub>18</sub>

- 例子：布喇非点阵中使用惯用晶胞，不一定总是初基晶胞

面心立方晶体的初基晶胞是一个菱面体。 $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$ ,  $\mathbf{a}_3$ 的轴间夹角为60度。

