



復旦大學 高分子科學系

《材料科學導論》講義

材料的電磁性能

徐一飛、高悅

復旦大學高分子科學系

xyf@fudan.edu.cn; yuegao@fudan.edu.cn

本讲内容

6.2.1 材料的导电性

6.2.2 材料的介电性

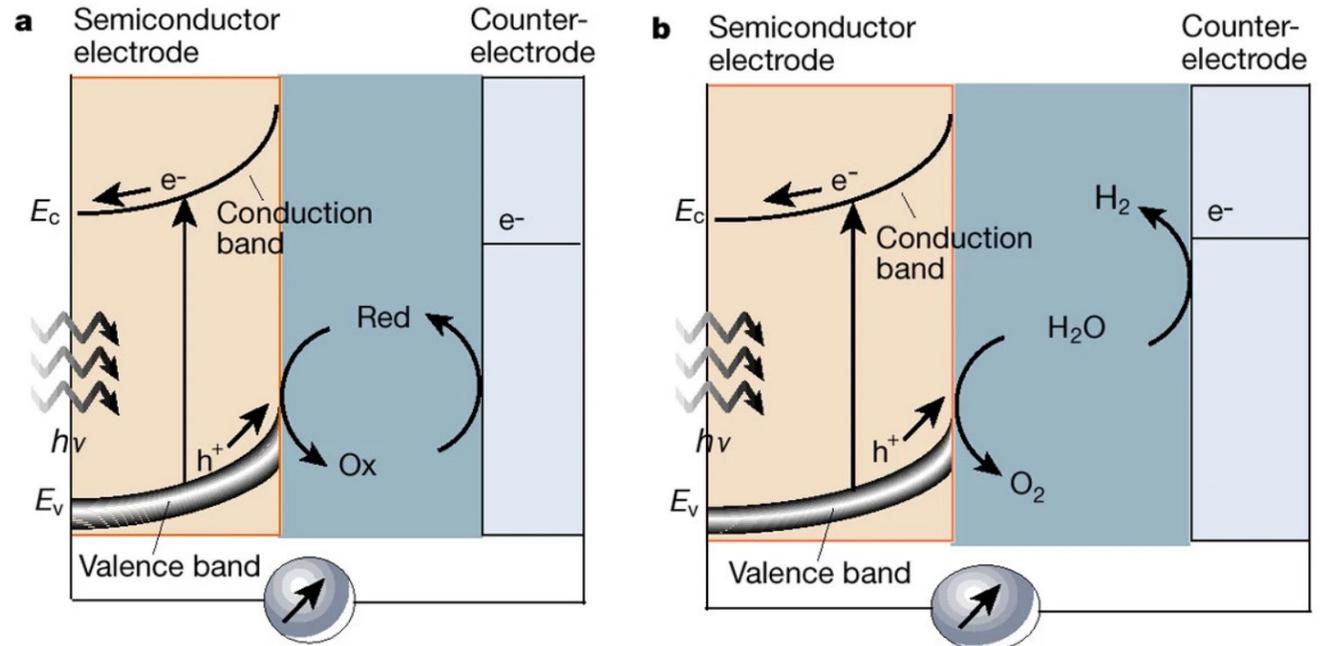
6.2.3 物质的磁性

6.2.4 材料的磁学性能

教学目标

- 掌握电导率等表征材料电学性能的基本参量
- 掌握材料结构与电学性能的关系
- 了解各种材料的磁学性能
- 熟悉常见材料的电磁性能

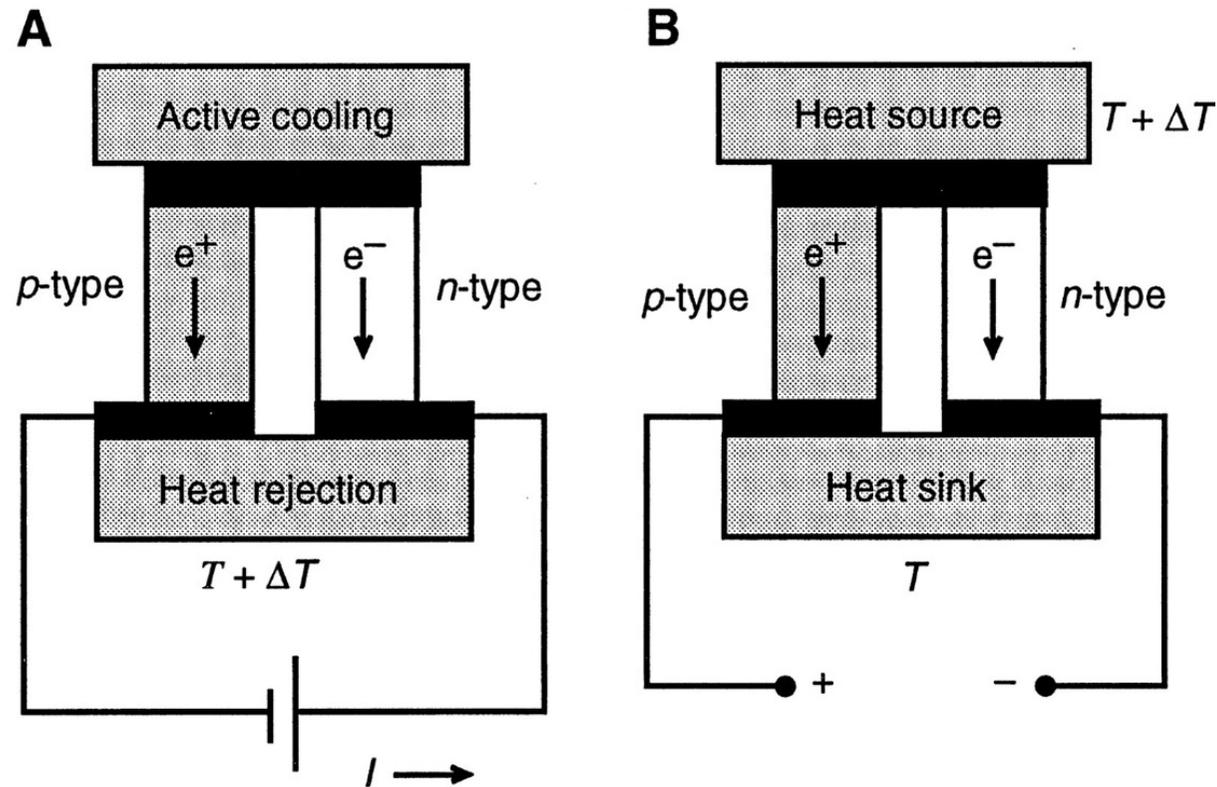
太阳能电池



半导体电极经光照后跃迁至导带，产生空穴-电子流。经由氧化还原中介反应调控，形成外场电流。能量转换效率一般为20%。

https://www.bilibili.com/video/BV1Vu4115756/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=1fc635e06bdf3882a28f190f43270f7f

热电材料



图示为典型的热电装置，两种本征半导体材料受热后产生相反方向的电荷运动，电极上因此产生电压差。主动通电可对设备降温。常用于外太空探测装置的能源供给。

压电材料

Before applying stress

After applying stress

- Ferroelectric
- Crystalline
- Normal piezoelectric
- Polarized piezoelectric
- Internal dipoles of the material can be reoriented

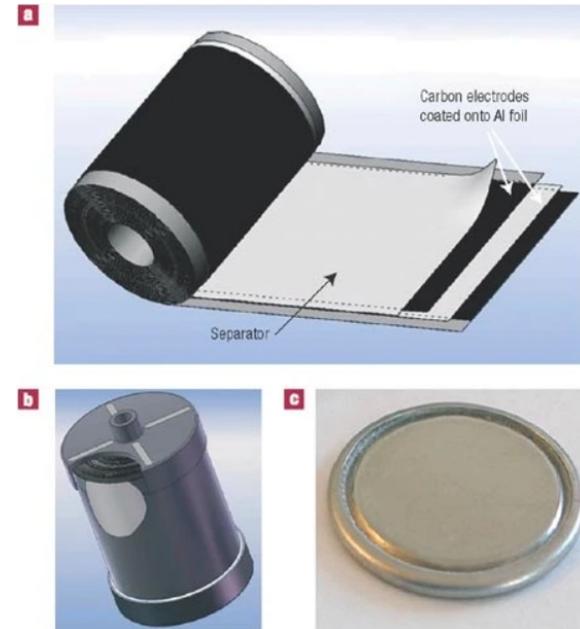
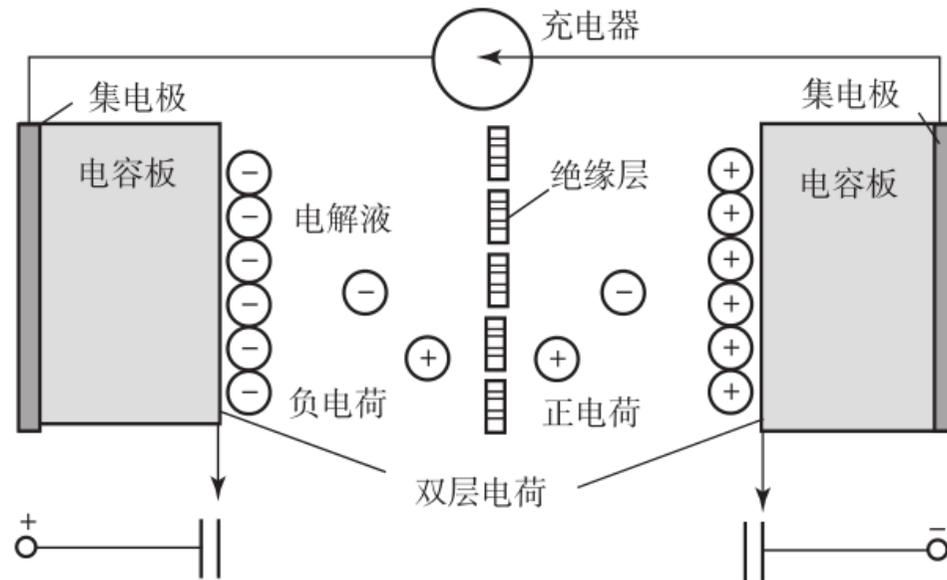
● Pb
● O
● Ti, Zr

b



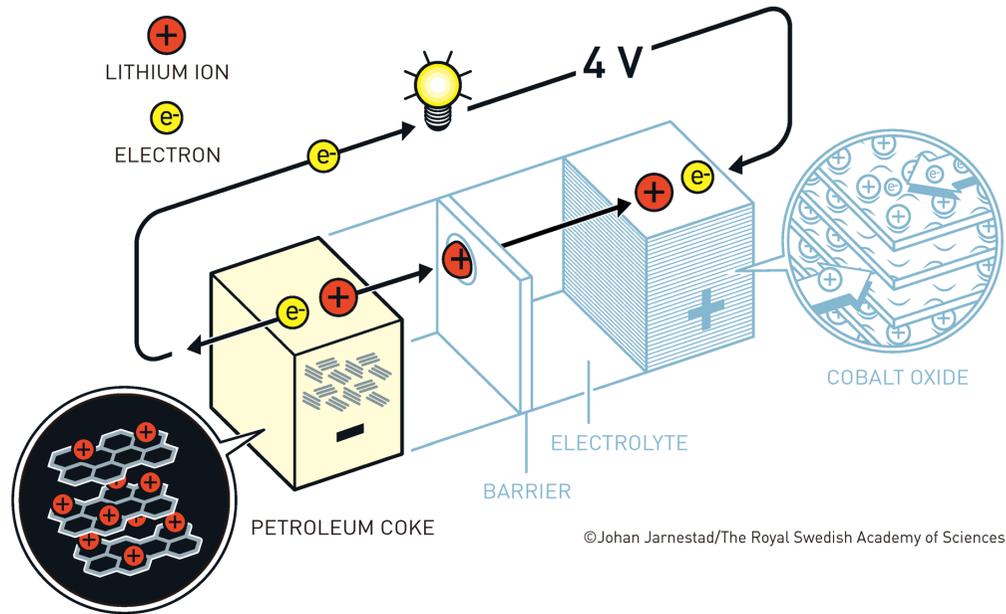
受到外力作用时，材料内部各偶极矩发生取向，不再为零，由此形成电压差。在生物传感器与可穿戴智能设备领域有重要作用。

超级电容器



超级电容器在充放电时，在固-固或液-固界面处形成或消耗正负双电层，由此实现可逆容量。充放电速度快，功率密度较高。

锂离子电池



锂离子电池被称为“摇椅式”结构。充放电期间，锂离子在正负极材料之间嵌入脱出，实现电能与化学能的转换。

<https://www.bilibili.com/video/BV1pz4y1571E/>

6.2.1 材料的导电性

电导率与电阻率

在直流电场中，对于长度为 l 的材料，其电阻 R 与试样面积 A 成反比。

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

电导率则是单位电场强度下流过每立方米材料的电流 I ：

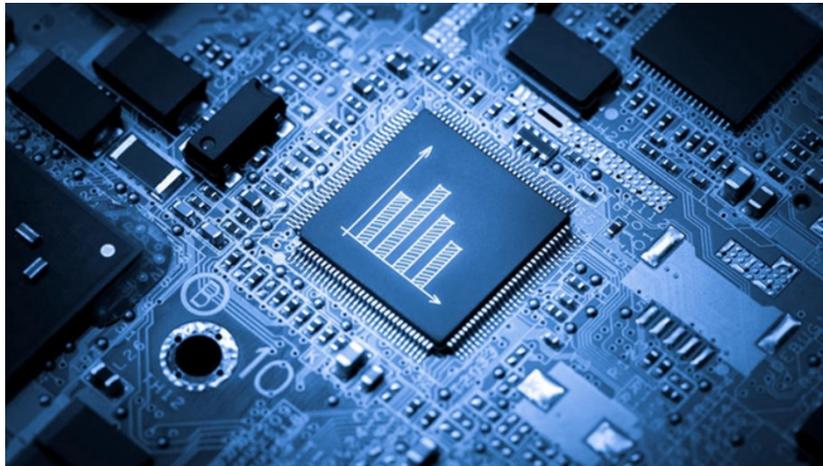
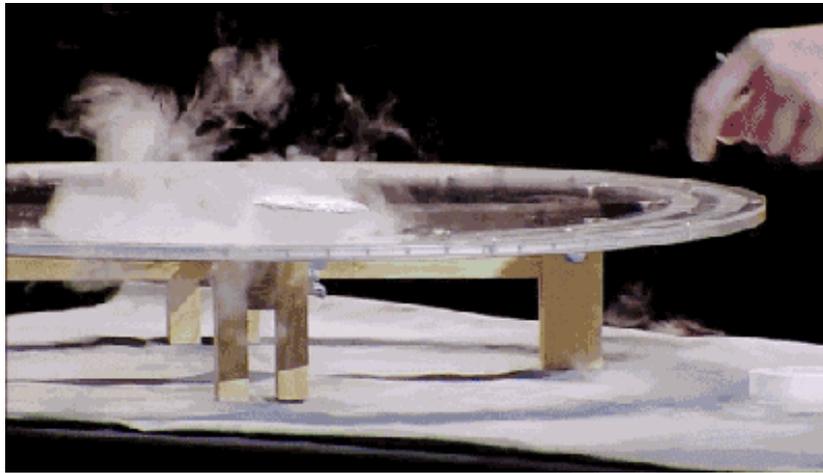
$$\sigma = \frac{IL}{VS}$$

V 为电场强度，电导率单位为 $(\Omega\text{m})^{-1}$ 或 S/m 。显然：

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

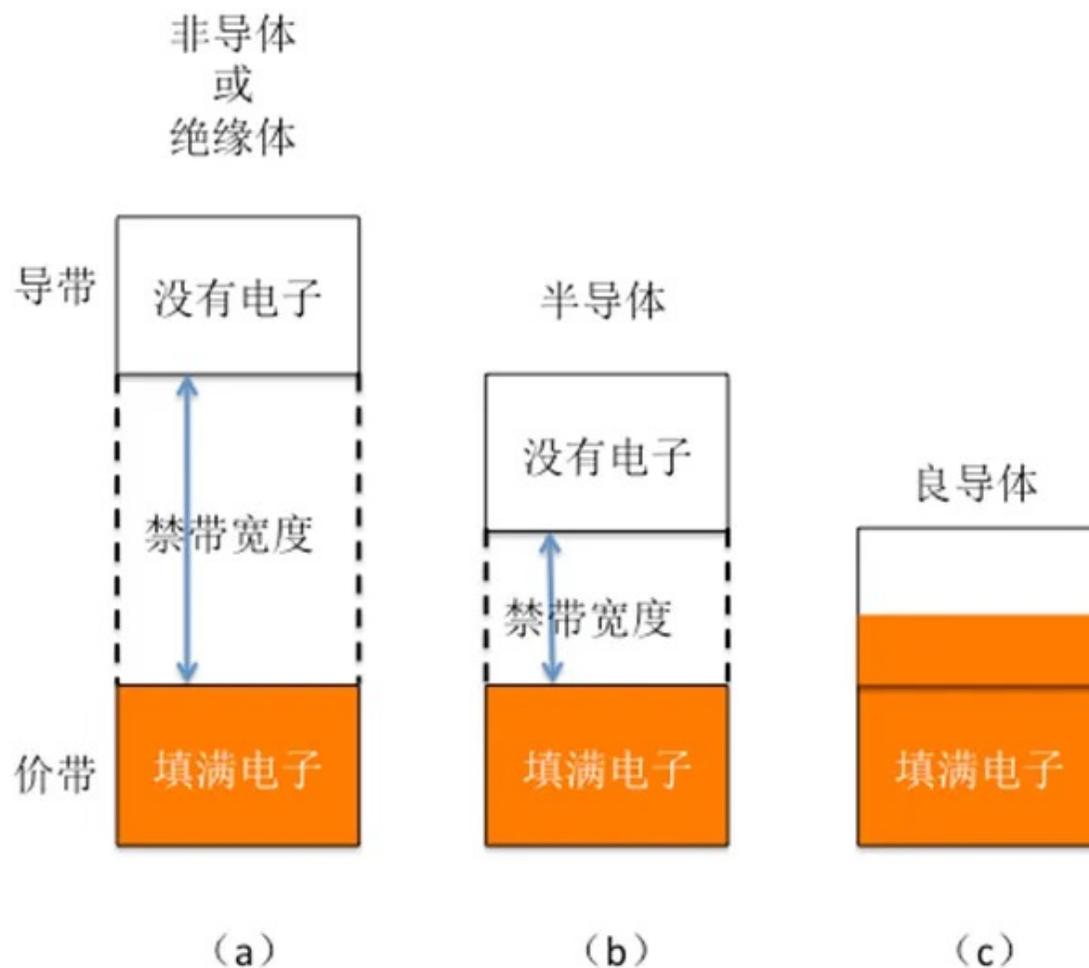
电导率与电阻率

根据电阻率或电导率的不同，可将材料分为超导体、良导体、半导体、绝缘体。



电导率与电阻率

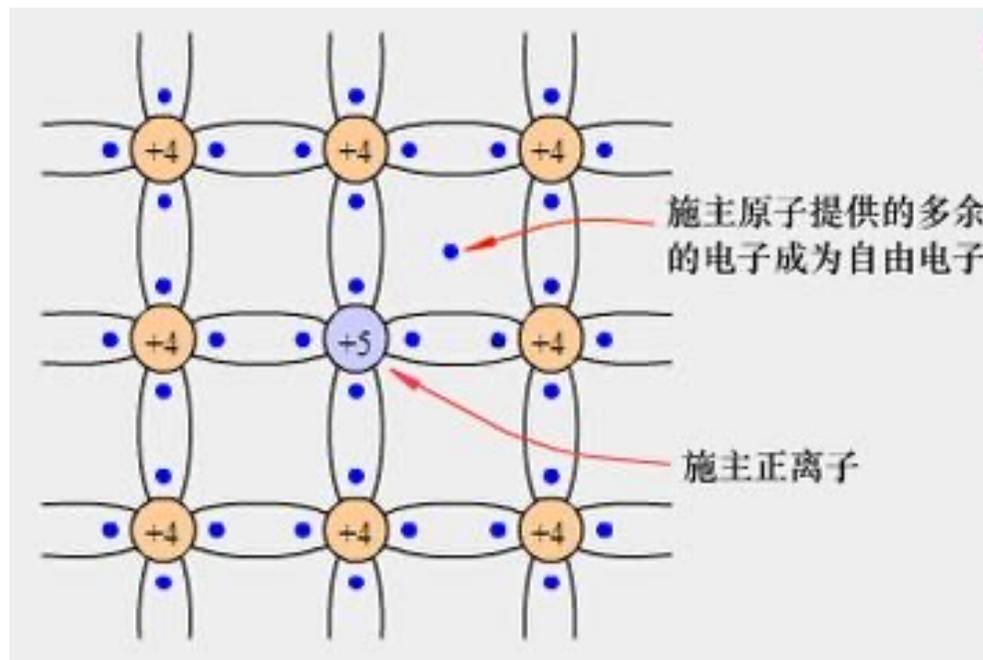
根据电阻率或电导率的不同，可将材料分为超导体、良导体、半导体、绝缘体。



电导率的决定参数

载流子指电荷的自由粒子，它可以是电子、空穴，也可以是正、负离子。载流子在电场作用下产生导电电流。根据载流子的种类，电导也可以分为离子电导、电子电导、本征电导等类型。

载流子的类型、载流子数以及载流子迁移率基本决定了材料的电导性。



电导率的决定参数

载流子的迁移率与材料电导率密切相关，其关系可通过如下模型给出：

单位面积A的材料中，单位体积中含n个带电荷量q的载流子，在外加电场E作用下，载流子发生漂移，速度为v。其电流密度应为：

$$J =$$

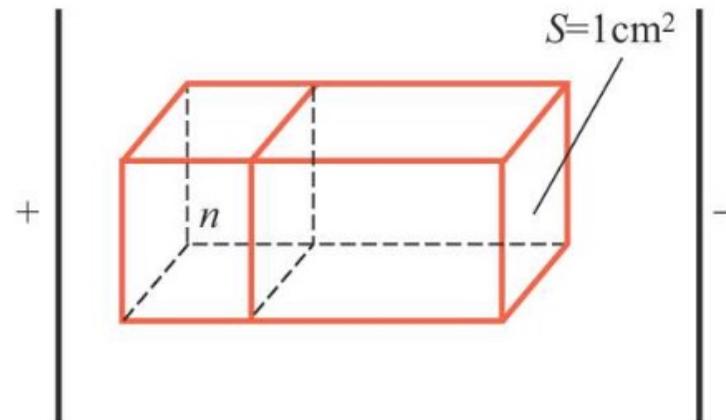
因此，

令 $\mu = \frac{v}{E}$ ，定义为载流子的迁移率，
因此，

$$\sigma = nq\mu$$

更一般地，

$$\sigma = \sum_i n_i q_i \mu_i$$



电导率的决定参数

载流子的迁移率与材料电导率密切相关，其关系可通过如下模型给出：

单位面积A的材料中，单位体积中含n个带电荷量q的载流子，在外加电场E作用下，载流子发生漂移，速度为v。其电流密度应为：

$$J = nqv = \frac{I}{A}$$

因此，

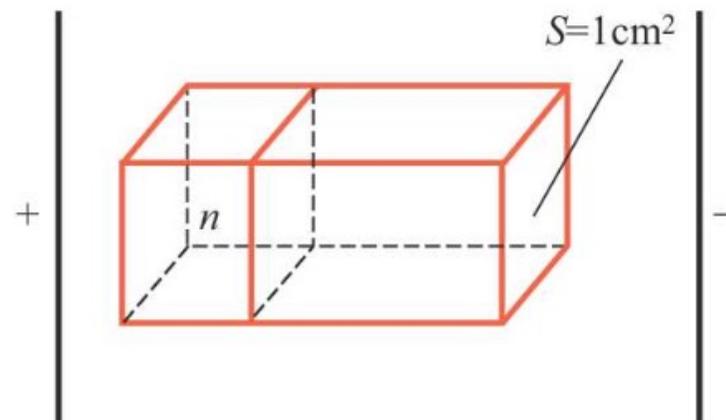
$$J =$$

令 $\mu = \frac{v}{E}$ ，定义为载流子的迁移率，
因此，

$$\sigma = nq\mu$$

更一般地，

$$\sigma = \sum_i n_i q_i \mu_i$$



电导率的决定参数

载流子的迁移率与材料电导率密切相关，其关系可通过如下模型给出：

单位面积A的材料中，单位体积中含n个带电荷量q的载流子，在外加电场E作用下，载流子发生漂移，速度为v。其电流密度应为：

$$J = nqv = \frac{I}{A}$$

因此，

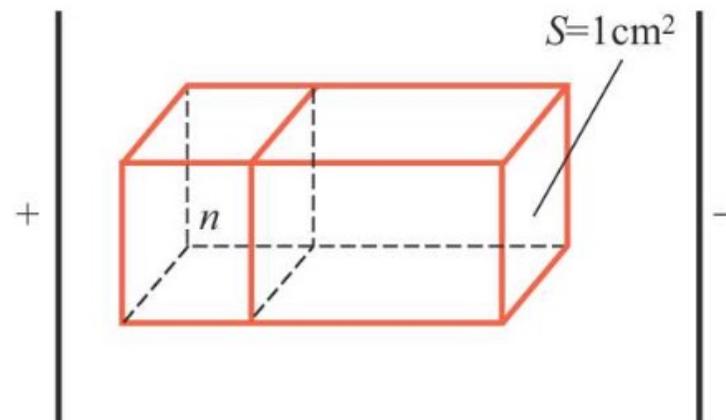
$$J = \frac{E}{\rho} = E\sigma$$

令 $\mu = \frac{v}{E}$ ，定义为载流子的迁移率，因此，

$$\sigma = nq\mu$$

更一般地，

$$\sigma = \sum_i n_i q_i \mu_i$$



离子电导率的影响因素

离子电导随温度的升高增加，其规律服从玻尔兹曼指数规律。

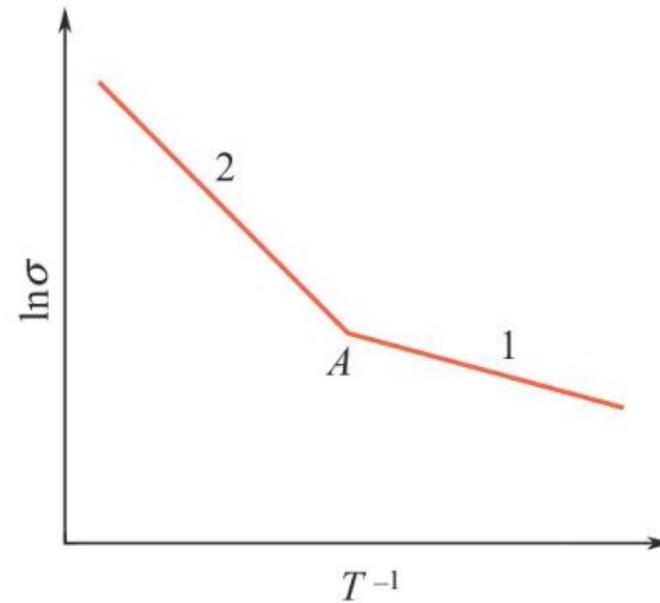


图4-62 杂质离子电导率与温度的关系

离子电导率的影响因素

离子电导随温度的升高增加，其规律服从玻尔兹曼指数规律。

如图所示，含有杂质的电解质在低温下主要来自于杂质引起的电导，而温度升高后，热运动增加，本征电导的载流子明显增多，本征电导占主要作用。

两种不同的导电机制造成了转折点的出现。

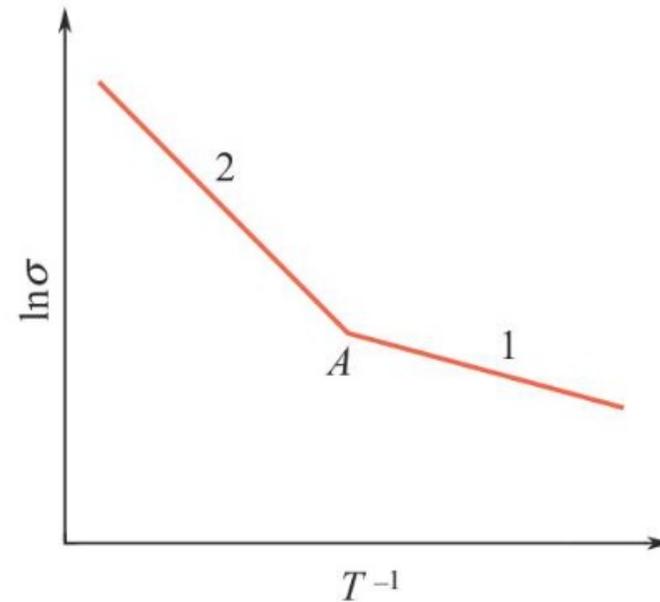


图4-62 杂质离子电导率与温度的关系

离子电导率的影响因素

晶体结构对应着离子的固定程度，也反映活化能的大小。

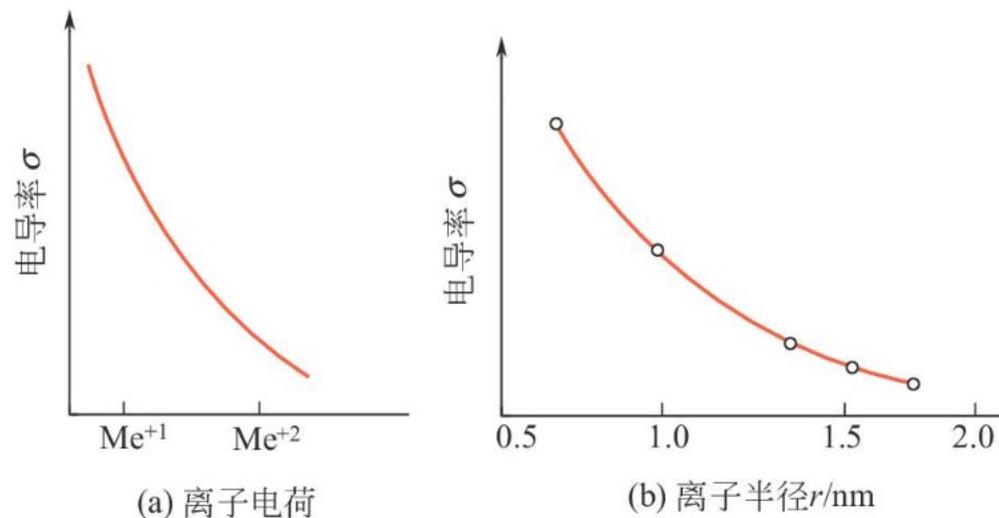


图4-63 离子晶体中阳离子电荷和半径对电导率的影响

离子电导率的影响因素

晶体结构对应着离子的固定程度，也反映活化能的大小。

通常结合力强的晶体表现出高熔点、高活化能、低电导。

高价正离子的价键强，通常也表现为低电导。

离子的尺寸影响晶格的间隙，影响离子移动的难易，故也影响材料的电导率。

此外晶格缺陷的浓度与生成也是影响离子电导的关键。

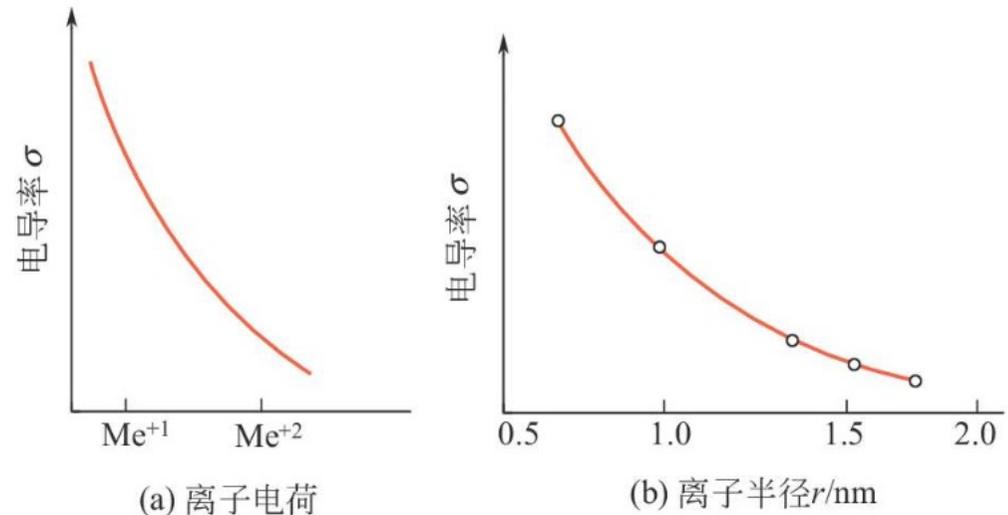


图4-63 离子晶体中阳离子电荷和半径对电导率的影响

电子电导率的影响因素

在温度变化不大时，电子电导率与温度关系符合幂指数关系。

晶格场中的电子迁移率应为：

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*}$$

其中 e 为元电荷， τ 是载流子和声子碰撞的弛豫时间， m^* 为电子有效质量。

声子对迁移率的影响为：

$$\mu_L = aT^{-3/2}$$

杂质离子对迁移率的影响为：

$$\mu_I = bT^{3/2}$$

总迁移率应为

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I}$$

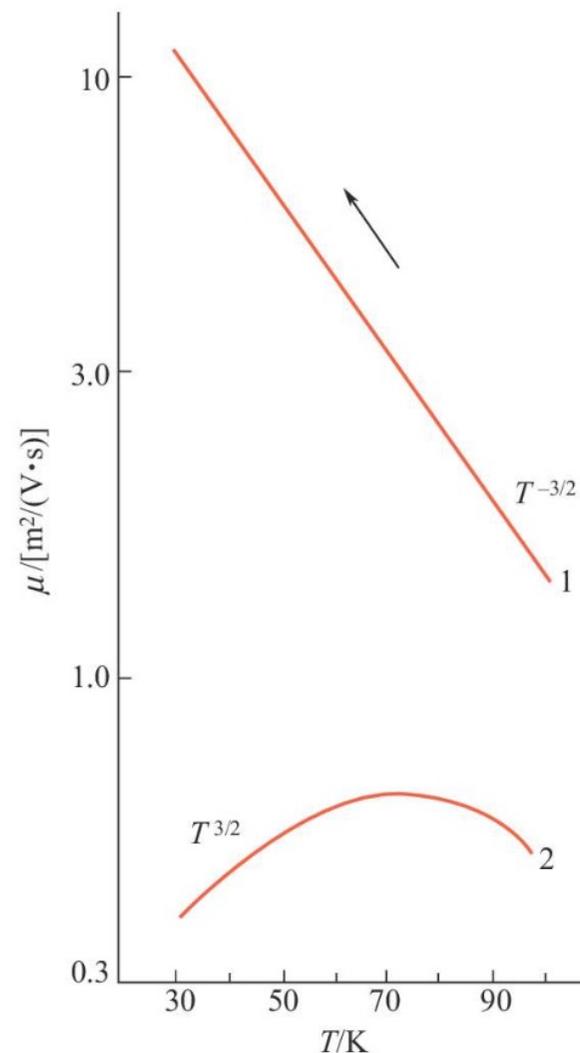


图4-64 迁移率与温度的关系

电子电导率的影响因素

杂质以及缺陷对电子电导的影响，主要来自于杂质离子或原子产生新的局部能级。实际应用中，可通过控制杂质引入有效地开发各种价控半导体。

对于金属单质，

$$\sigma \propto T^{-1}$$

但对于半导体或绝缘体，

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_c}{kT}\right) \text{ 或 } \sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

其中 E_c 为电导活化能， E_g 为价带与导带的间隙能，此间隙能的宽度也决定了材料是半导体还是绝缘体。

电子电导率的影响因素

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_c}{kT}\right) \text{ 或 } \sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

室温（25℃，298K）时，本征锗的电导率为2.2S/m，请估算150℃（423K）时本征锗的电导率。

查表知 E_g 为0.67eV。

电子电导率的影响因素

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_c}{kT}\right) \text{ 或 } \sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

室温（25℃，298K）时，本征锗的电导率为2.2S/m，请估算150℃（423K）时本征锗的电导率。

解：该题可用公式（4-105）计算。查表知 E_g 为0.67eV。

公式（4-105）取对数，得：

$$C = \ln\sigma + E_g / (2kT) = \ln 2.2 + 0.67\text{eV} / (2 \times 8.62 \times 10^{-5}\text{eV/K} \times 298\text{K}) = 13.83$$

$$150^\circ\text{C} \text{ 时, } \ln\sigma = C - E_g / (2kT) = 13.83 - 0.67\text{eV} / (2 \times 8.62 \times 10^{-5}\text{eV/K} \times 423\text{K}) = 4.64$$

则 $\sigma = 103.8\text{S/m}$

答：150℃（423K）时的电导率为103.8S/m。

材料电子结构与导电性

材料电子结构与导电性的关系通常用能带理论描述。N个原子聚集成固体后，能级将裂分形成较宽的能带。在无外场作用时，固体中无电流，但在外场作用下，不满带导电而满带不导电。能隙的宽度通常与原子平衡半径有关。

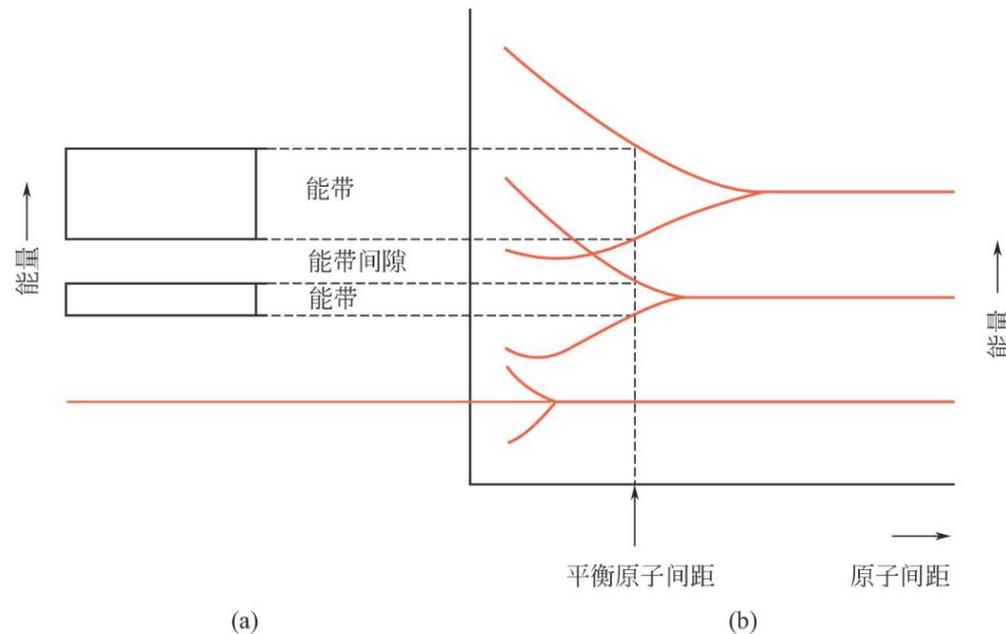


图4-65 原子距离对能带结构的影响

(a) 固体在平衡原子分离状态下的电子能带结构； (b) 原子聚集体中的电子能量和原子间距关系

材料电子结构与导电性

固体材料中，能带的分布常具有多种形式。

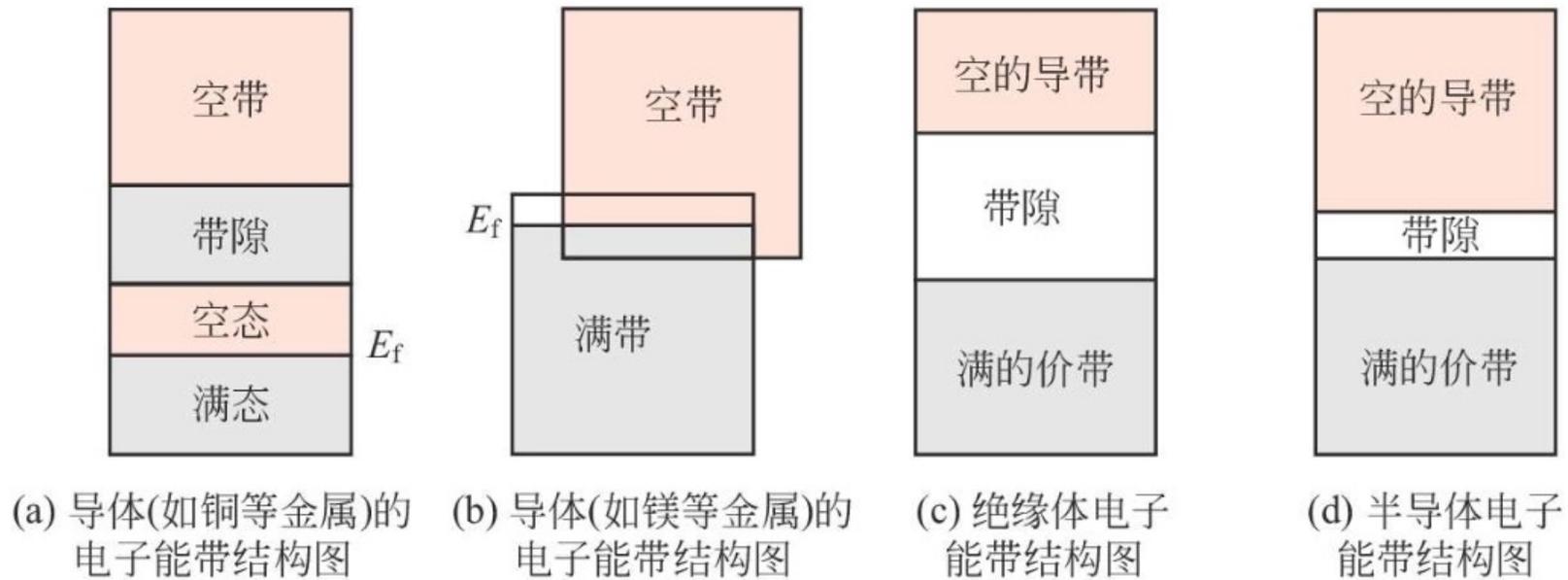


图4-66 固体在0K时各种可能的电子能带结构

导体电子结构与导电性

若电子未能填满最高能带，或满带与空带之间有重叠，则会形成导体。导体可分为以下几种类型：

1) 碱金属。Li、Na、K等。

导体电子结构与导电性

若电子未能填满最高能带，或满带与空带之间有重叠，则会形成导体。导体可分为以下几种类型：

1) 碱金属。Li、Na、K等。Na ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$)

导体电子结构与导电性

若电子未能填满最高能带，或满带与空带之间有重叠，则会形成导体。导体可分为以下几种类型：

1) **碱金属**。Li、Na、K等。以Na ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$) 为例，众多原子的s能带分裂形成半充满s能带，属于**不满带**的情况，故而导电。

导体电子结构与导电性

若电子未能填满最高能带，或满带与空带之间有重叠，则会形成导体。导体可分为以下几种类型：

1) **碱金属**。Li、Na、K等。以Na ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$) 为例，众多原子的s能带分裂形成半充满s能带，属于**不满带**的情况，故而导电。

2) **碱土金属**。Be、Mg等。

导体电子结构与导电性

若电子未能填满最高能带，或满带与空带之间有重叠，则会形成导体。导体可分为以下几种类型：

1) **碱金属**。Li、Na、K等。以Na ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$) 为例，众多原子的s能带分裂形成半充满s能带，属于**不满带**的情况，故而导电。

2) **碱土金属**。Be、Mg等。以Mg ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$)

导体电子结构与导电性

若电子未能填满最高能带，或满带与空带之间有重叠，则会形成导体。导体可分为以下几种类型：

1) **碱金属**。Li、Na、K等。以Na ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$) 为例，众多原子的s能带分裂形成半充满s能带，属于**不满带**的情况，故而导电。

2) **碱土金属**。Be、Mg等。以Mg ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$) 为例，尽管其3s能带已被填满，但由于其**3s能带与3p能带重叠**，故也是导体。但Ca的能带重叠程度很小，故为不良导体。

导体电子结构与导电性

3) 贵金属。Au、Ag、Cu。

4) 过渡金属。Ni、Co、Fe等过渡金属具有未填满的d能带，属于导体，但d能带易夺取外层s能带的电子以使体系能量降低。更强的电子结合力使材料导电性下降。

导体电子结构与导电性

3) 贵金属。Au、Ag、Cu。



4) 过渡金属。Ni、Co、Fe等过渡金属具有未填满的d能带，属于导体，但d能带易夺取外层s能带的电子以使体系能量降低。更强的电子结合力使材料导电性下降。

导体电子结构与导电性

3) 贵金属。Au、Ag、Cu。以Cu
($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$) 为例，Cu含一个s能级的价电子，本身能带并未被填满，且由于其3d能级填满，原子不宜压缩，故为良导体。

导体电子结构与导电性

3) 贵金属。Au、Ag、Cu。以Cu ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$) 为例，Cu含一个s能级的价电子，本身能带并未被填满，且由于其3d能级填满，原子不宜压缩，故为良导体。

4) 过渡金属。

导体电子结构与导电性

3) **贵金属**。Au、Ag、Cu。以Cu ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$) 为例，Cu含一个s能级的价电子，本身能带并未被填满，且由于其3d能级填满，原子不宜压缩，故为良导体。

4) **过渡金属**。Ni、Co、Fe等过渡金属具有未填满的d能带，属于导体，但d能带易夺取外层s能带的电子以使体系能量降低。更强的电子结合力使材料导电性下降。

导体电子结构与导电性

金属的自由电子需受激发（例如升温），跃迁至费米能级以上才能导电。此外，金属的电阻率受到温度、杂质、塑性形变的影响：

$$\rho_{total} = \rho_t + \rho_i + \rho_d$$

此式也称Matthiessen定律。

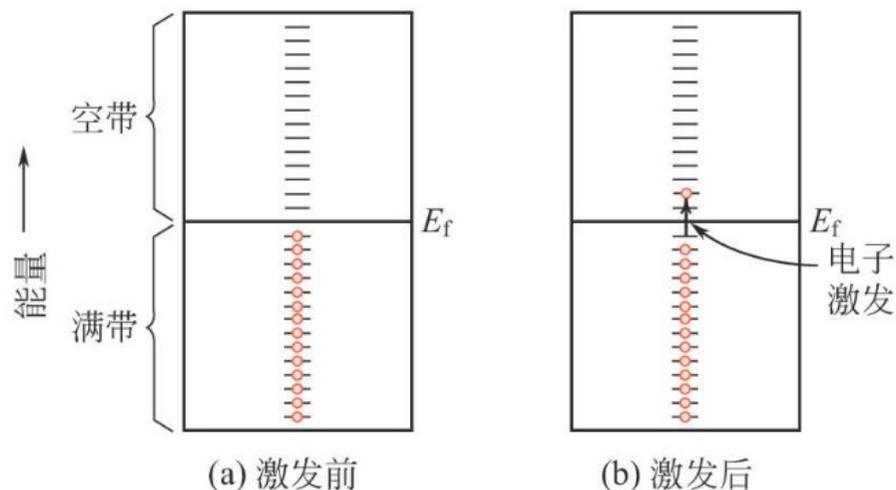


图4-67 金属电子激发前后的电子占有状态

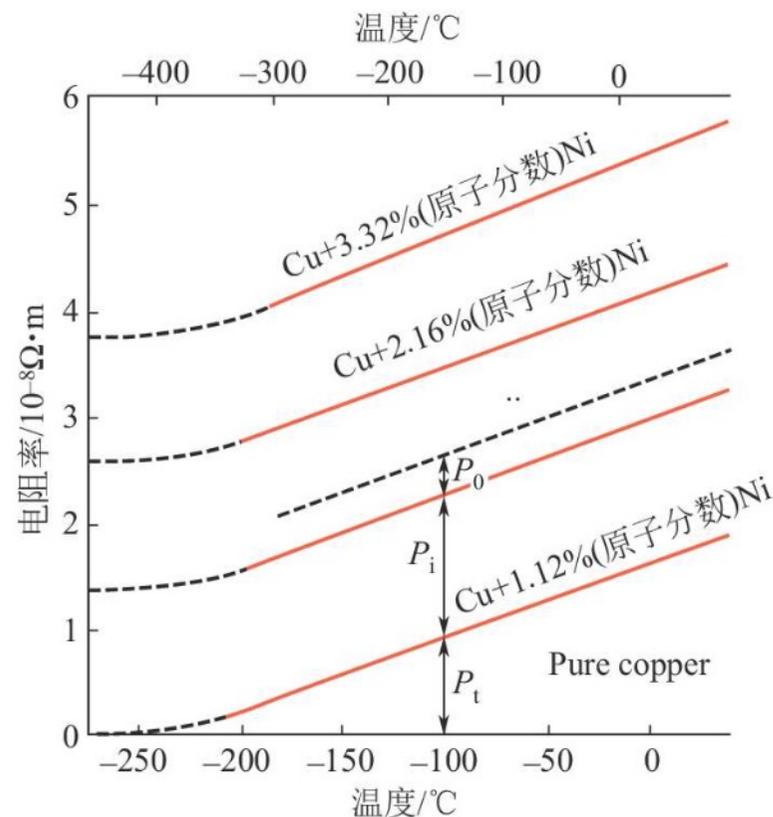


图4-69 铜及三种铜镍合金的电阻率与温度的关系

绝缘体电子结构与导电性

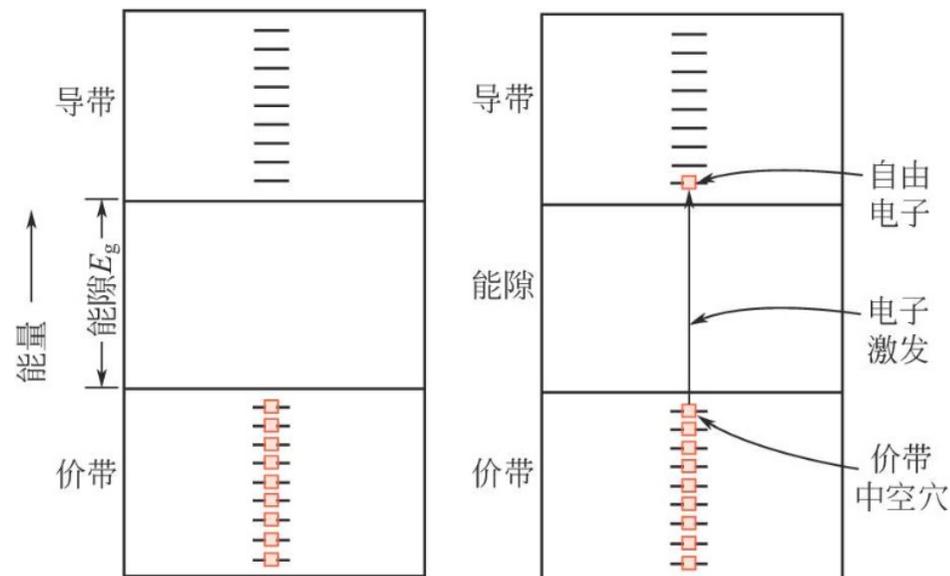
惰性气体由于原子各能级填满，故为绝缘体。

离子晶体：

强碱（ NaOH 、 KOH 、 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ）、活泼金属氧化物（ Na_2O 、 MgO 、 Na_2O_2 ）、大多数盐类（ BeCl_2 、 $\text{Pb}(\text{Ac})_2$ 等除外）。

绝缘体电子结构与导电性

惰性气体由于原子各能级填满，故为绝缘体。离子晶体中，正、负离子各外层轨道被电子充满，且晶体中的能带本身由两个相差较大的能级分裂而来，故离子晶体也是典型的绝缘体。



(a) 电子从价带激发至导带前 (b) 电子从价带激发至导带后

图4-70 绝缘体和半导体在电子从价带激发至导带前后的电子占有状态

绝缘体电子结构与导电性

惰性气体由于原子各能级填满，故为绝缘体。离子晶体中，正、负离子各外层轨道被电子充满，且晶体中的能带本身由两个相差较大的能级分裂而来，故离子晶体也是典型的绝缘体。

绝缘体的价带与导带之间的能级较宽。在适当条件下，提供足够的能量可使价电子进入导带，形成导体。此时导带中的自由电子、价带中的空穴成对出现，共同形成载流子。

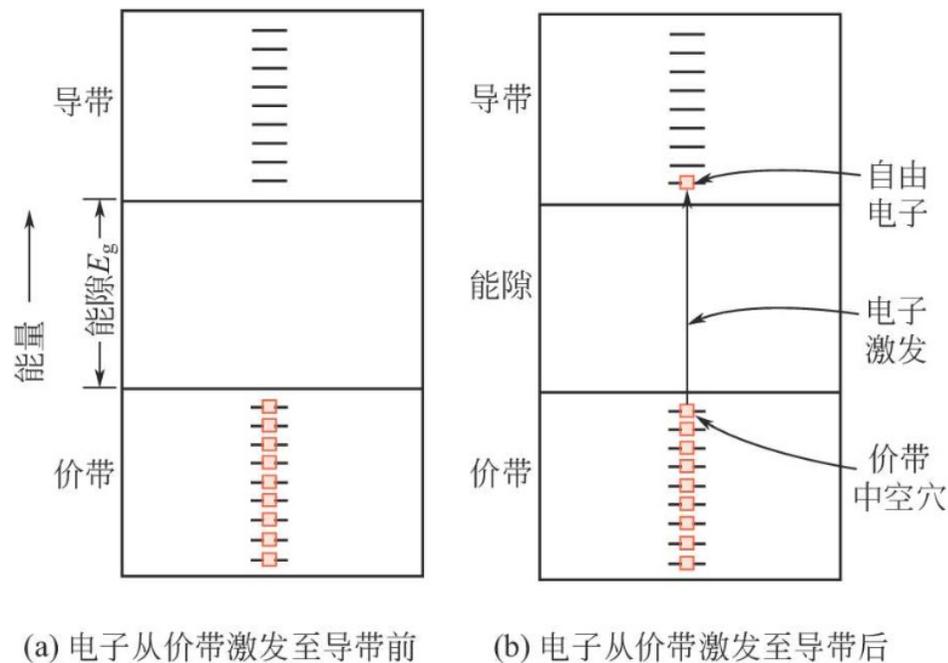


图4-70 绝缘体和半导体在电子从价带激发至导带前后的电子占有状态

绝缘体电子结构与导电性

离子晶体在特定条件下可形成离子电导。正、负离子在电场下迁移、扩散，在离子网络中形成电流。正、负离子的运动方向相反，但形成的电流方向一致。

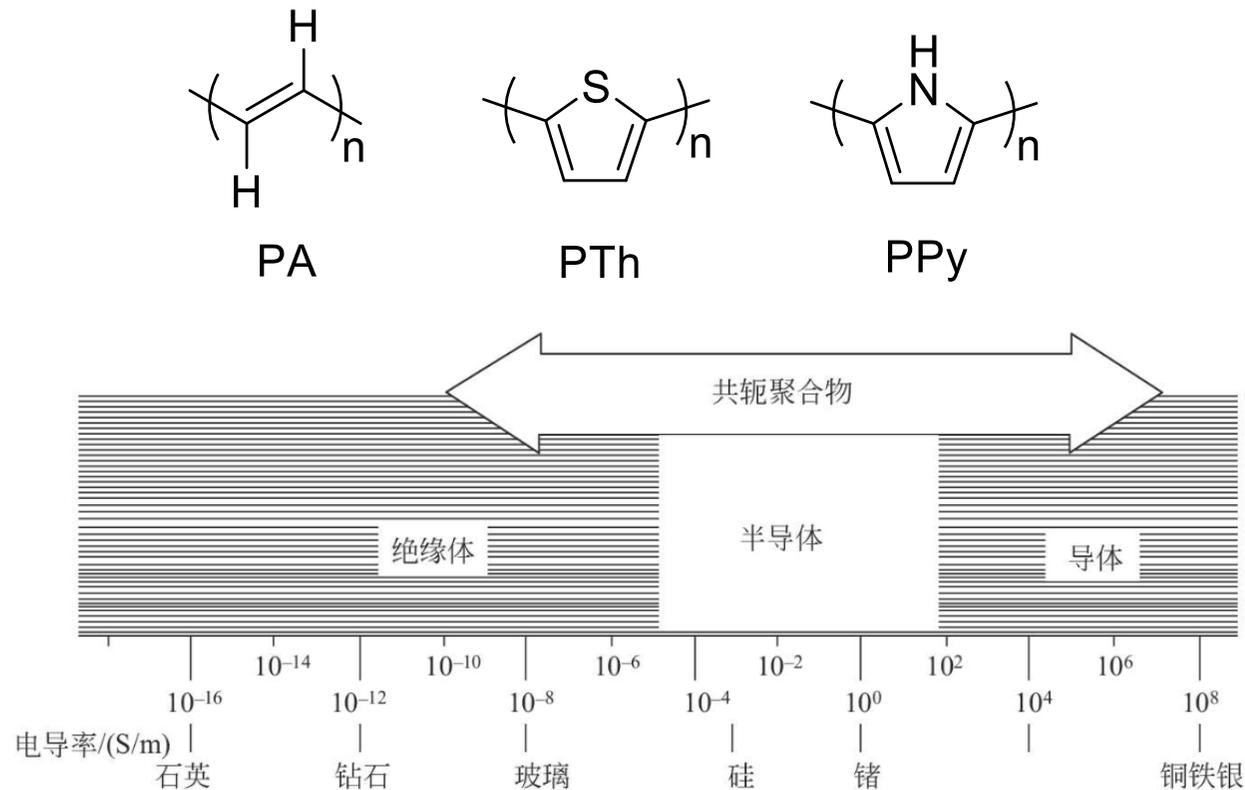
总的电导率是离子电导与电子电导的总和。

$$\sigma_{total} = \sigma_{electronic} + \sigma_{ionic}$$

离子固体的电导性取决于材料种类、纯度、温度，受离子性晶格缺陷的浓度、温度和晶体结构的影响。

导电高分子

有机聚合物通常是绝缘体，但导电高分子的合成使易加工、耐腐蚀、密度小的导体材料成为现实。导电高分子一类是通过掺杂制备，一类本身具有导电性。



白川英树 (1936-)

导电高分子

导电高分子的载流子可在单一共轭体系中跃迁，此运动阻力小或无，也可在共轭体系之间跃迁，该运动阻力较大。

掺杂可使共轭聚合物的导电率大幅提高，掺杂分为氧化掺杂（p型）和还原掺杂（n型），前者用卤素掺杂，后者用碱金属掺杂。

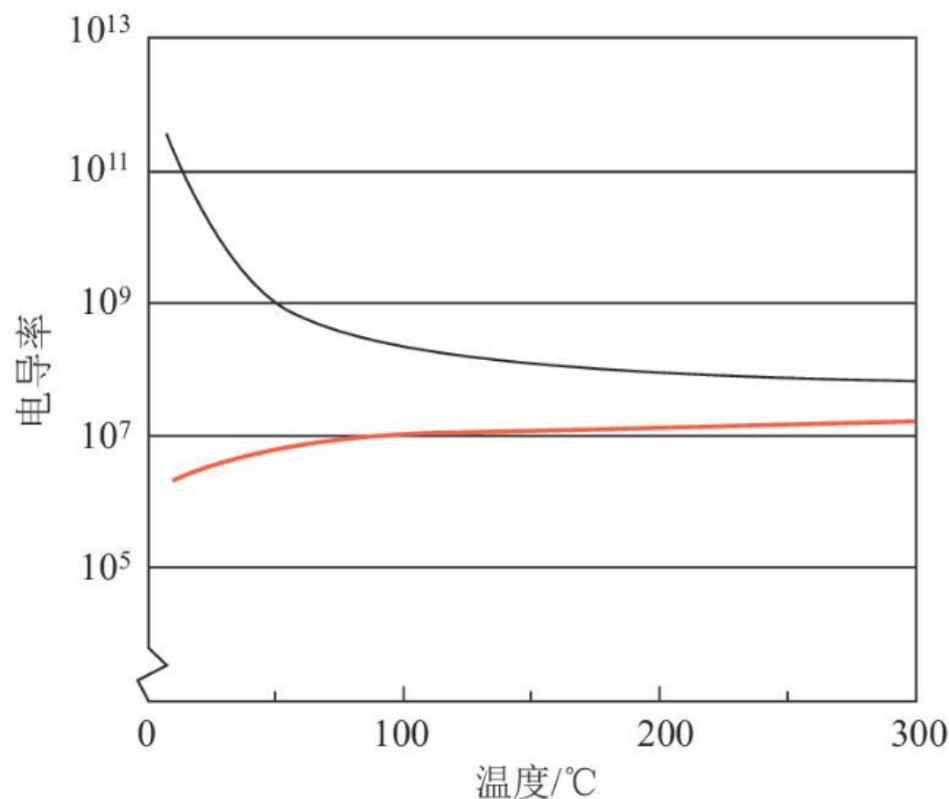
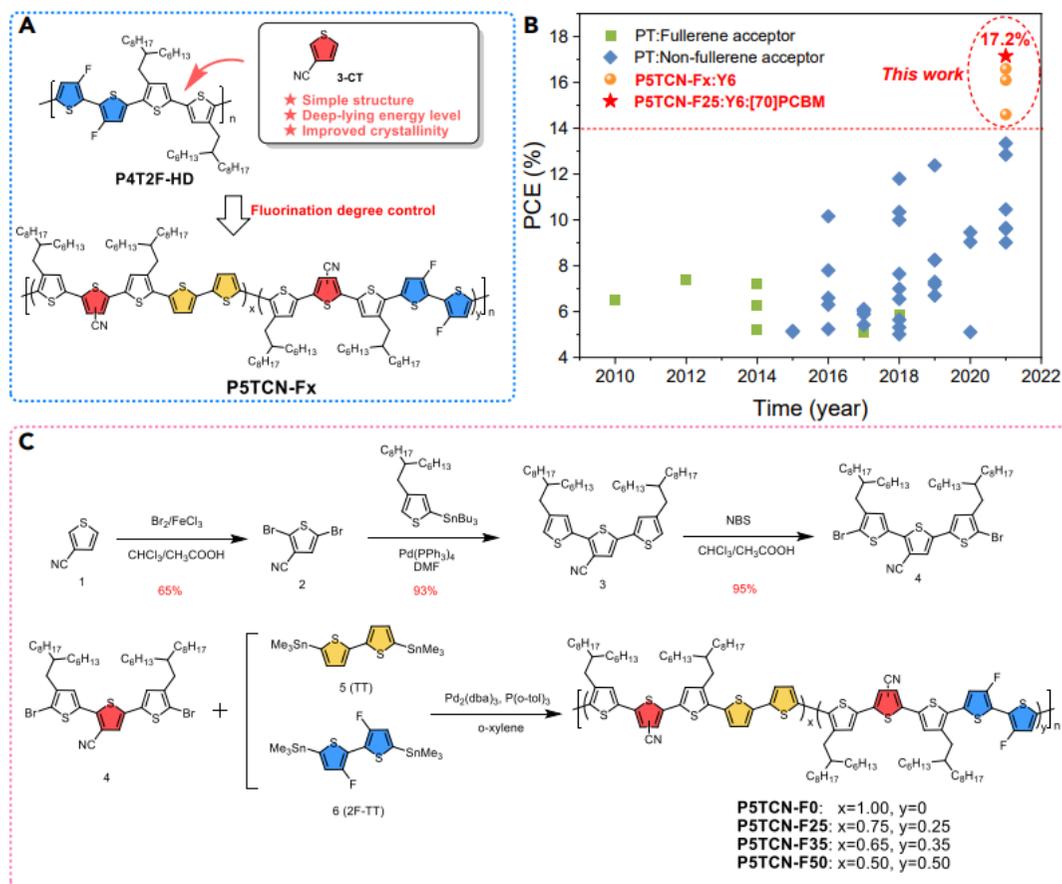
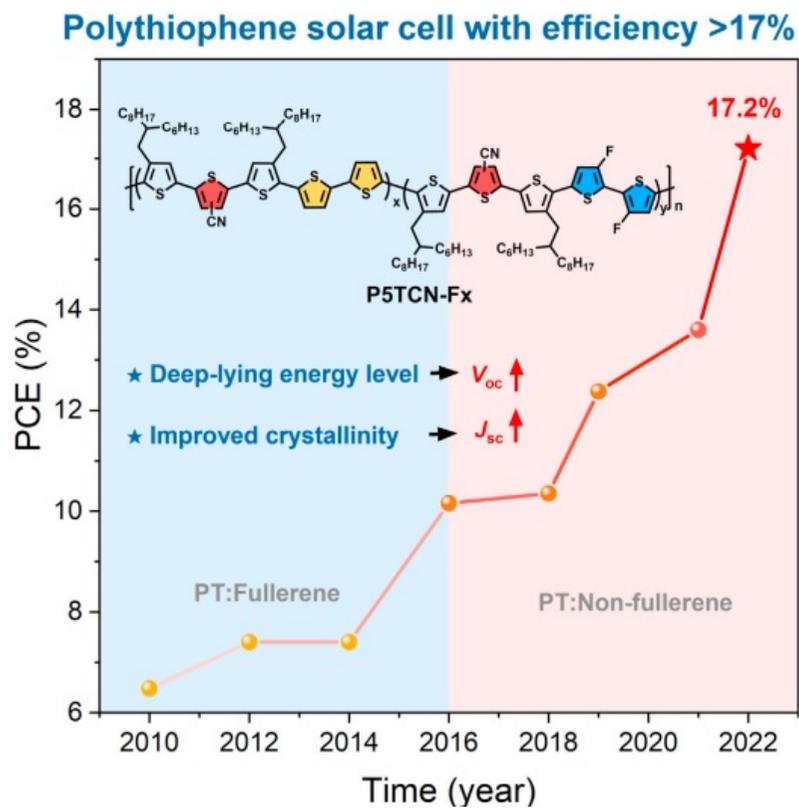


图4-73 导电聚合物电导率与温度的关系

导电高分子用于太阳能电池



Joule, 2022, 6, 3, 647-661

半导体

性能介于绝缘体和导体之间的物质称为半导体。升温或掺杂可改变其电阻。根据杂质的有无，可将半导体分为本征半导体和杂质半导体。

本征半导体的电子从价带跃迁至导带后，形成空穴-电子对。其电导率由如下公式计算：

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

其中， n 为自由电子的数量， p 为空穴数量， μ_e 为电子迁移率， μ_h 为空穴迁移率。对于半导体， μ_h 总是小于 μ_e 。对于本征半导体， $n = p$ 。

半导体

例题:

本征硅室温下电导率为 4×10^{-4} (S/m)，电子和空穴的迁移率分别为 $0.14 \text{m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $0.048 \text{m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ，计算室温下电子和空穴浓度。

半导体

例题:

本征硅室温下电导率为 4×10^{-4} (S/m)，电子和空穴的迁移率分别为 $0.14 \text{m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $0.048 \text{m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ，计算室温下电子和空穴浓度。

解：材料是本征型，电子和空穴浓度相同，因此根据式（4-108）：

$$\begin{aligned} n=p &= \frac{\sigma}{|e|(\mu_e + \mu_h)} \\ &= \frac{4 \times 10^{-4}}{(1.6 \times 10^{-19} \text{C})(0.14 + 0.048)} \\ &= 1.33 \times 10^{16} \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

答：室温下本征硅的电子和空穴浓度均为 $1.33 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ 。

半导体

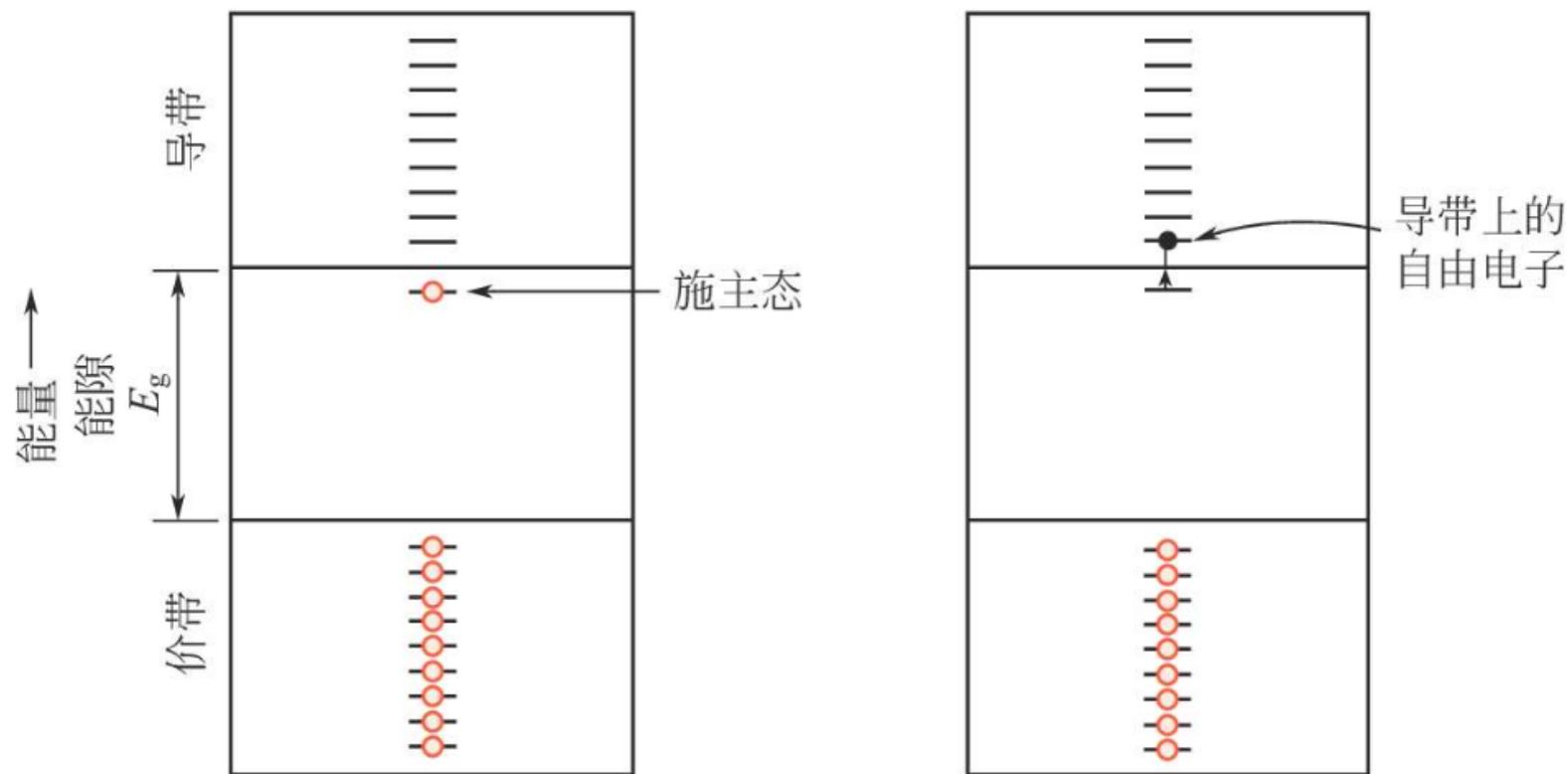
半导体的电阻对杂质十分敏感，杂质半导体也可分为n型半导体和p型半导体。

在Ge、Si等四价元素中掺入少量五价元素P、Sb、Bi、As等施主杂质。杂质能级位于导带底部的能隙中，由于杂质能级与导带之间的能隙很窄，可在室温跃迁至导带。

n型半导体的电导率由下式给出：

$$\sigma \approx n|e|\mu_e$$

半导体



(a) 掺入施主杂质的电子能带结构

(b) 从施主态激发，导致导带中产生一个自由电子

图4-74 n型半导体电子从施主态激发前后的电子占有状态

半导体性能的影响因素

掺杂量和温度对半导体性能影响很大。

温度对本征半导体的影响
可由下式给出：

$$\ln \sigma = C \cdot \frac{-E_g}{2kT}$$

等价地，

$$E_g = -2k \left(\frac{\Delta \ln p}{\Delta(1/T)} \right)$$

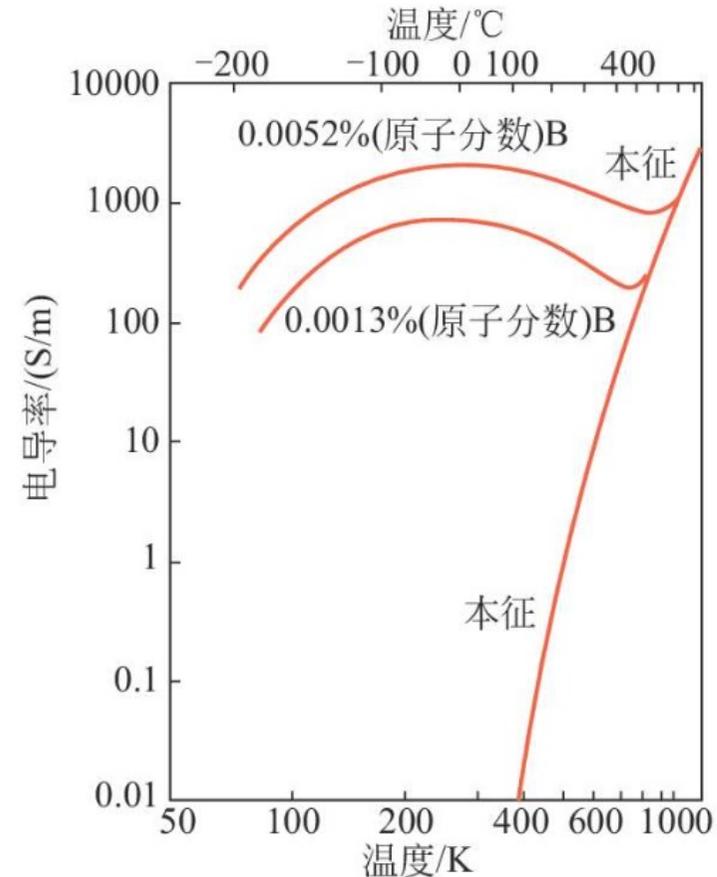


图4-76 本征硅和两种不同掺杂量的硼掺杂硅的温度和电导率关系图

半导体性能的影响因素

对于p型半导体，当所有掺杂原子均从价带接受电子，杂质半导体呈现饱和状态。

在饱和区内，空穴数量呈定值，而空穴迁移率与温度有关。

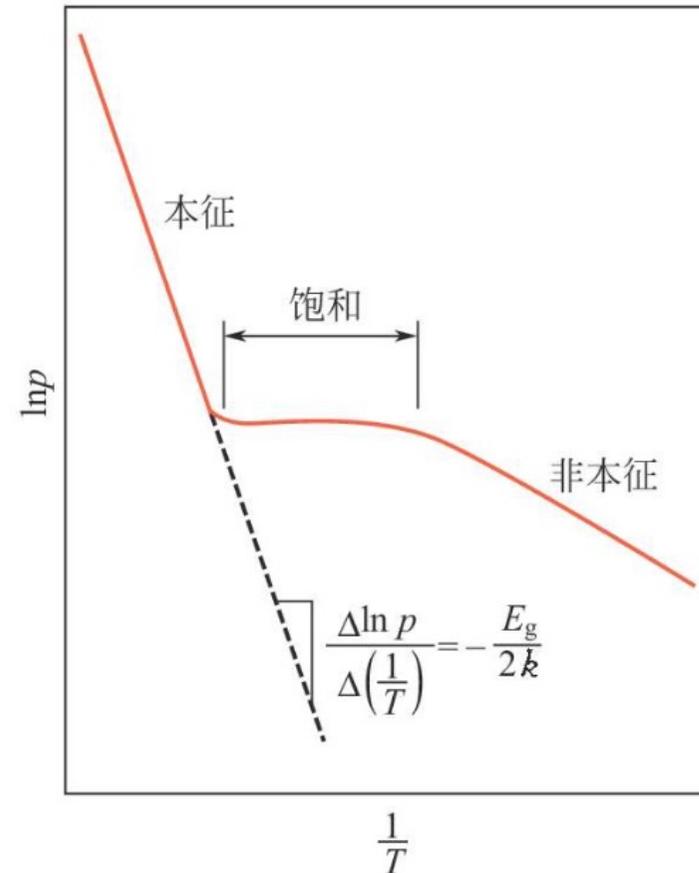


图4-77 具有非本征、饱和和本征行为的p型半导体的空穴浓度与温度的关系

半导体性能的影响因素

对于半导体，载流子浓度受温度影响幅度较大，而载流子迁移率相对稳定，因此可粗略认为：

$$\ln n = \ln p \approx C' \cdot \frac{-E_g}{2kT}$$

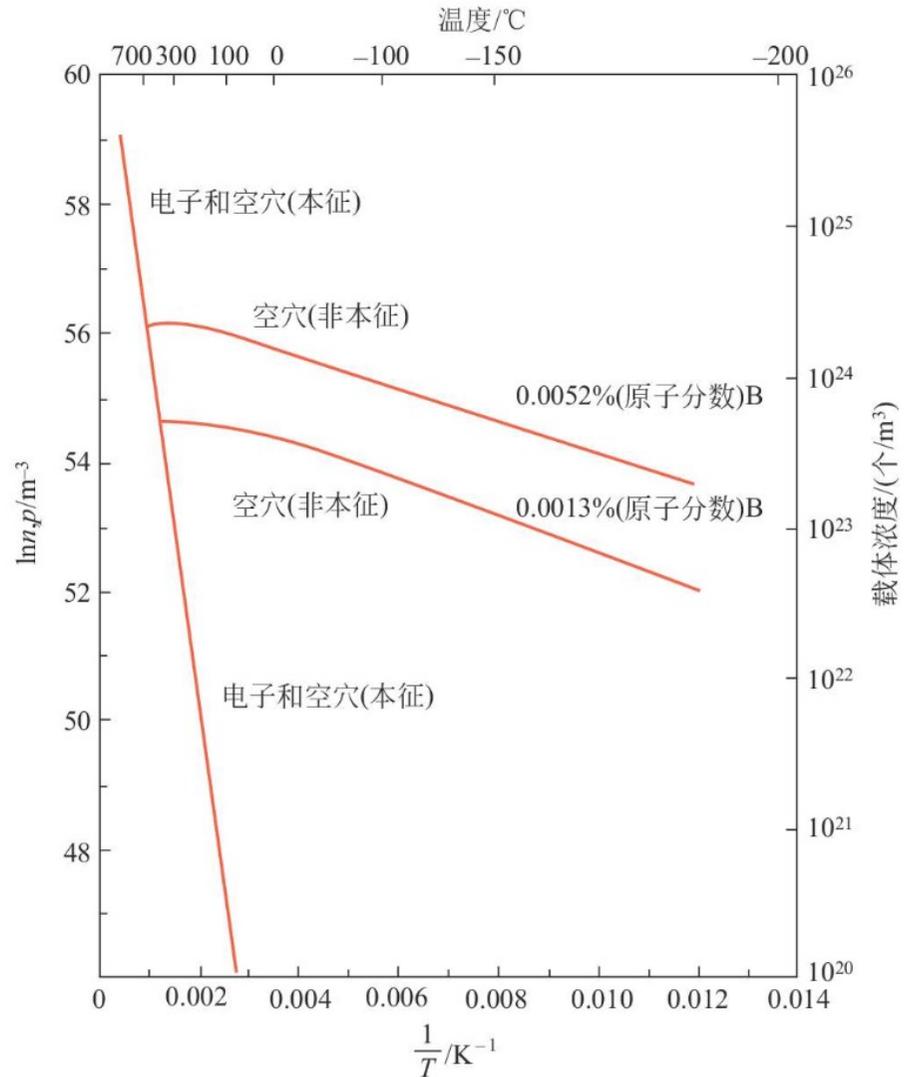
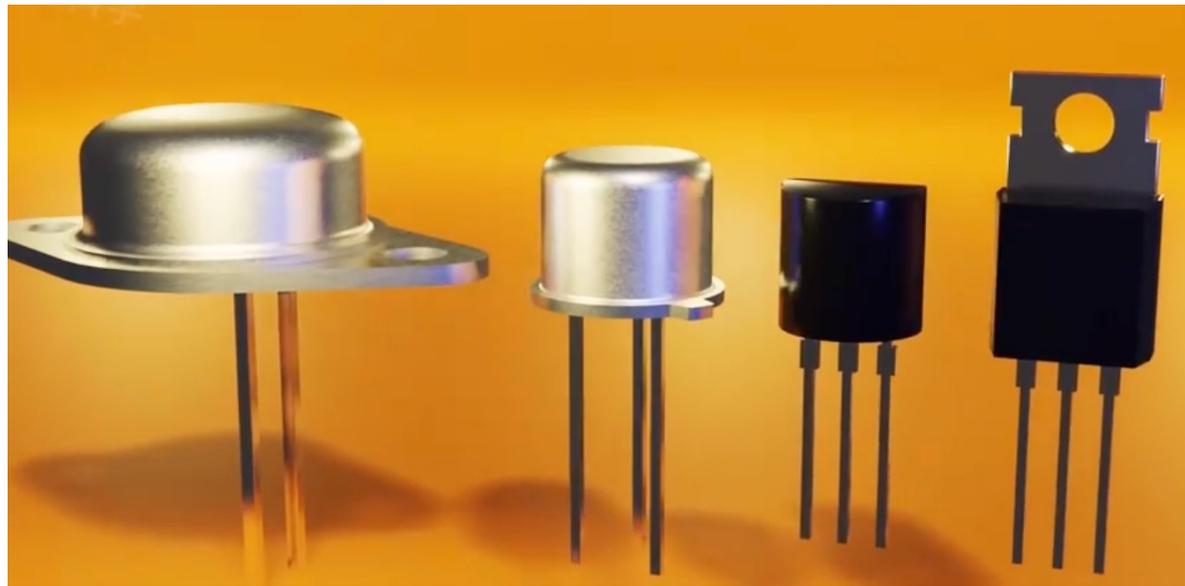


图4-78 本征硅和两种硼掺杂硅的载流子（电子和空穴）浓度与温度的关系

晶体管工作原理

晶体管泛指一切以半导体材料为基础的单一元件，晶体管具有检波、整流、放大、开关、稳压、信号调制等多种功能，晶体管可用于各种各样的数字和模拟功能。



晶体管工作原理：

https://www.bilibili.com/video/BV1rj411Z7iT/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=1fc635e06bdf3882a28f190f43270f7f

材料电子结构与光导性

热运动可使满带中的电子跃迁至导带，光照也可实现相同的效果。这种现象称为**光电导效应**。光电导实质是对电子电导具有贡献的载流子浓度受光激发而增大。

并非所有波长的光均能实现光电导效应，应当满足如下条件：

$$\Delta E = E_j - E_i = h\nu$$

物质受光激发，通常呈现三种状态：

(π, π^*) 、 (n, π^*) 、 CT

不同条件下可表现出荧光、磷光等现象。

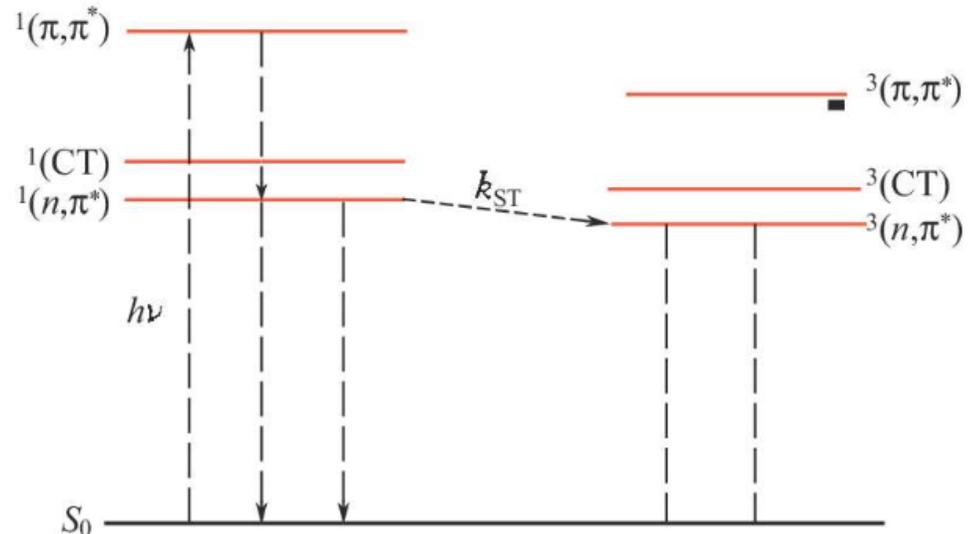


图4-79 分子晶体中受激态

材料的超导电性

材料在一定低温条件下突然失去电阻的现象称为**超导电性**。在临界温度 T_c 以下，材料中的电子形成库珀对，表现出零电阻，可抵御磁场穿过。



Heike Kamerlingh Onnes
(1853-1926)

材料的超导电性

超导电材料具有完全导电性。

在室温下将超导体材料做成圆环，放于磁场中。将材料冷却至超导态，由于磁感作用，圆环中出现感生电流。此电流永不衰减，形成永久电流和冻结磁通。

超导材料还具有完全抗磁性，处于超导状态的材料，无论其经历如何，其磁感应强度 B 始终为零。也称Meissner效应。

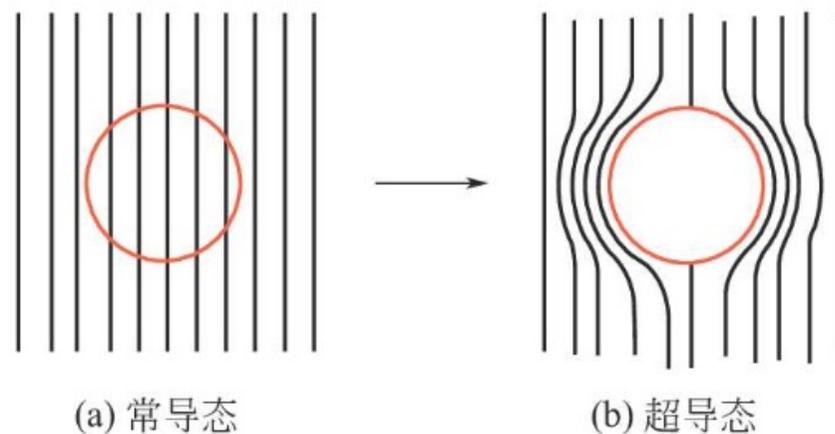


图4-81 超导态对磁通的排斥

材料的超导电性

超导电材料具有三个重要指标。

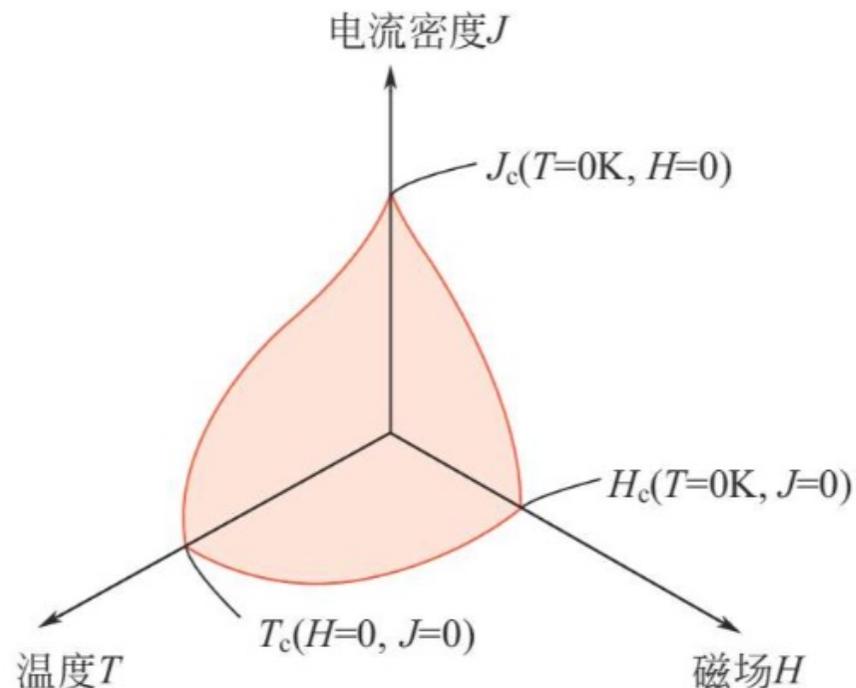
一是超导转变温度 T_c 。

热运动使得电子对被打乱不能成对。

$$T_c \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$$

M 为平均原子质量。

理论上讲 T_c 不超过40K，但通过激发子代替声子作用，用电子质量代替原子质量，可使 T_c 大幅提高。



材料的超导电性

超导电材料具有三个重要指标。

二是存在临界磁场 H_C 。

即使超导材料处于 T_C 以下，强度过高的磁场仍会穿过材料，超导状态因此被破坏。

临界磁场与临界温度有如下关系：

$$\frac{H_c}{H_{c,0}} = 1 - \left(\frac{T}{T_C}\right)^2$$

三是存在临界电流密度

J_c 。

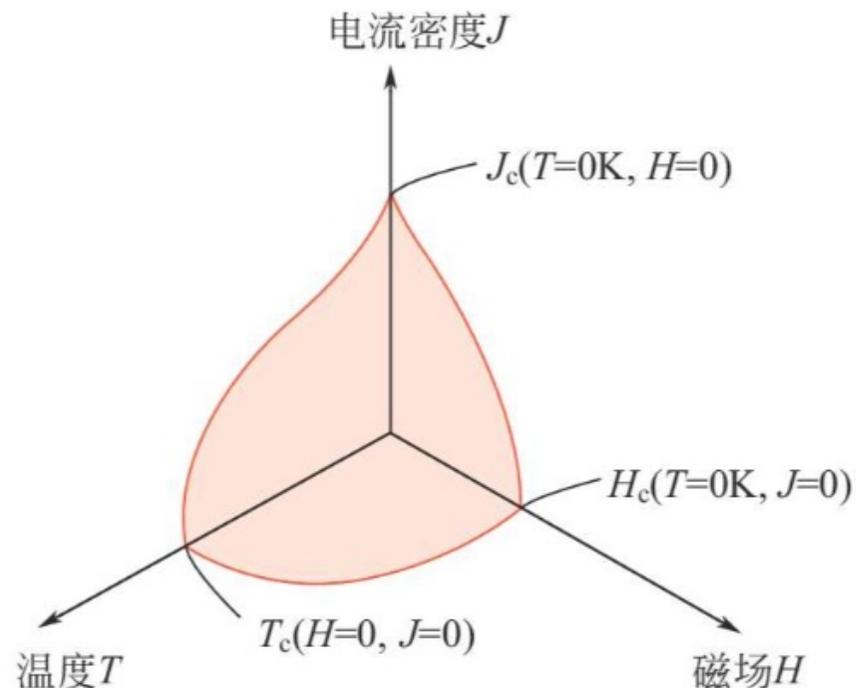


图4-82 区分正常导电状态与超导态转变温度、临界电流密度和临界磁场的边界图

材料的超导电性

超导电材料具有三个重要指标。

三是存在临界电流密度 J_c 。外加电流产生的磁场与外磁场之和高于临界磁场 H_c 时，超导态被破坏，材料回到常导态。

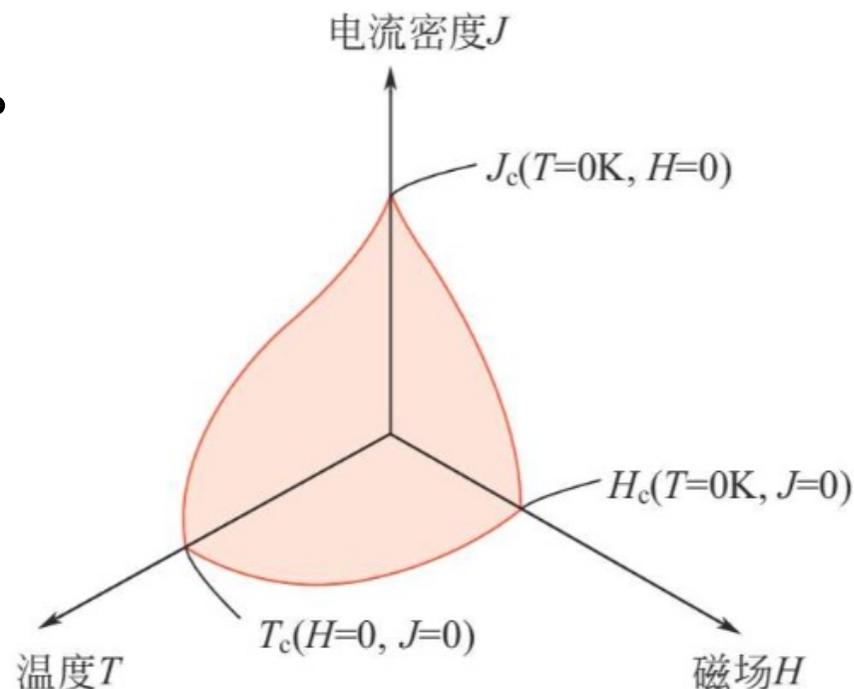


图4-82 区分正常导电状态与超导态转变温度、临界电流密度和临界磁场的边界图

材料的超导电性

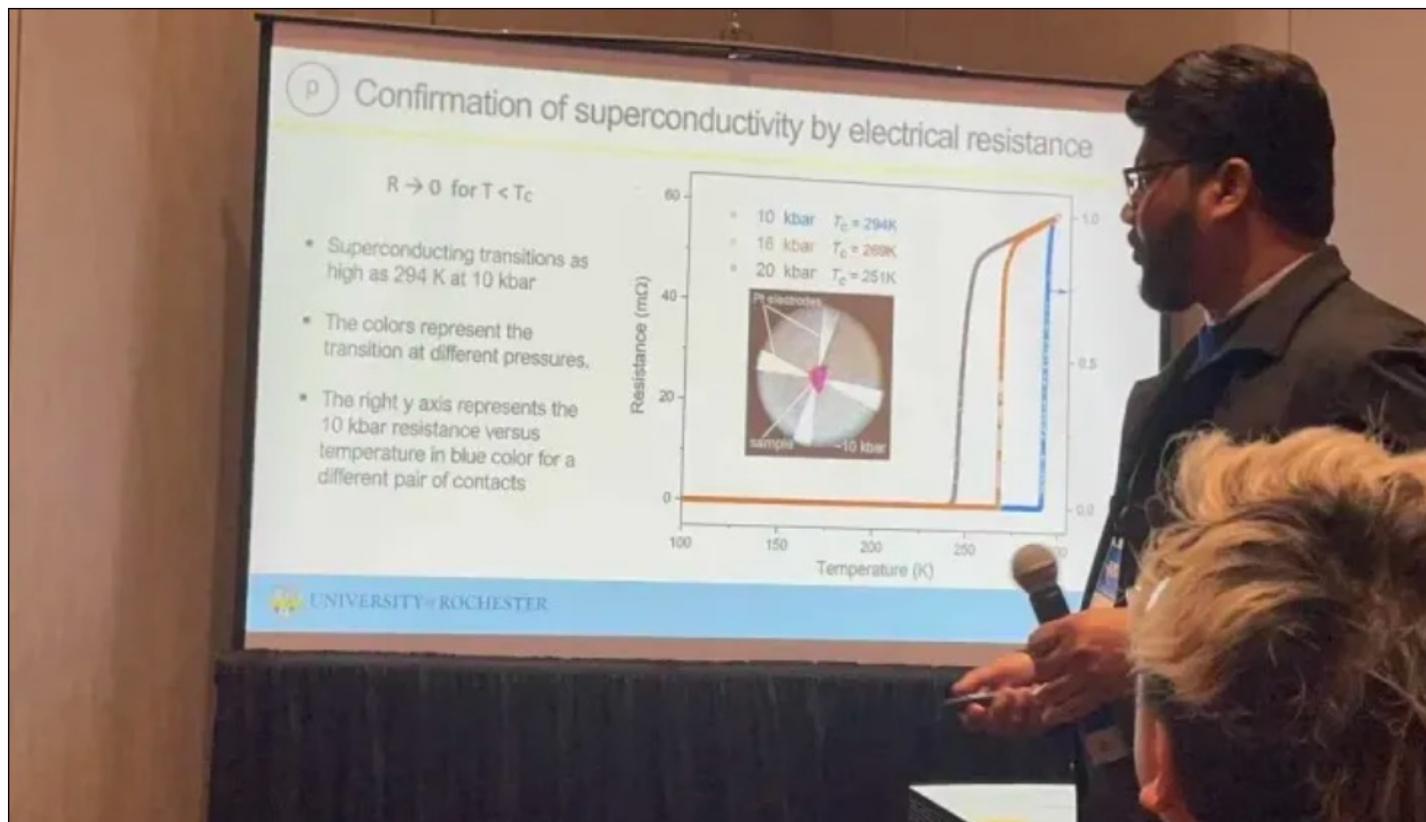
■ 表 4-23 部分超导材料的临界温度和临界磁感应强度

材 料	临界温度 T_c/K	临界磁感应强度 B_c/T	材 料	临界温度 T_c/K	临界磁感应强度 B_c/T
元素			化合物和合金		
钨	0.02	0.0001	V_3Ga	16.5	22
钛	0.40	0.0056	Nb_3Sn	18.3	22
铝	1.18	1.0105	$NbAl$	18.9	32
锡	3.72	0.0305	Nb_3Ge	23.0	40
汞 (α)	4.15	0.0411	陶瓷化合物		
铅	7.19	0.0803	$YBa_2Cu_3O_7$	92	
化合物和合金			$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110	
Nb-Ti	10.2	12	$Ti_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125	
Nb-Nr	10.8	11	$HgBa_2Ca_2Cu_2O_8$	153	
$PbMO_6S_8$	14.0	45			

超导概念解释：

https://www.bilibili.com/video/BV1dk4y147vM/?spm_id_from=pageDriver&vd_source=1fc635e06bdf3882a28f190f43270f7f

室温超导风波：勇于证伪的中国科学家



2023年3月，在美国物理学会三月会上，罗彻斯特大学的 Ranga Dias 及其团队声称Lu-H-N三元化合物在 21 摄氏度、约 1 万标准大气压的条件下实现超导。

室温超导风波：勇于证伪的中国科学家

Article | [Published: 14 October 2020](#)

Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride

[Elliot Snider](#), [Nathan Dasenbrock-Gammon](#), [Raymond McBride](#), [Mathew Debessai](#), [Hiranya Vindana](#), [Kevin Vencatasamy](#), [Keith V. Lawler](#), [Ashkan Salamat](#) & [Ranga P. Dias](#) 

[Nature](#) **586**, 373–377 (2020) | [Cite this article](#)

105k Accesses | 363 Citations | 2932 Altmetric | [Metrics](#)

 This article was [retracted](#) on 26 September 2022

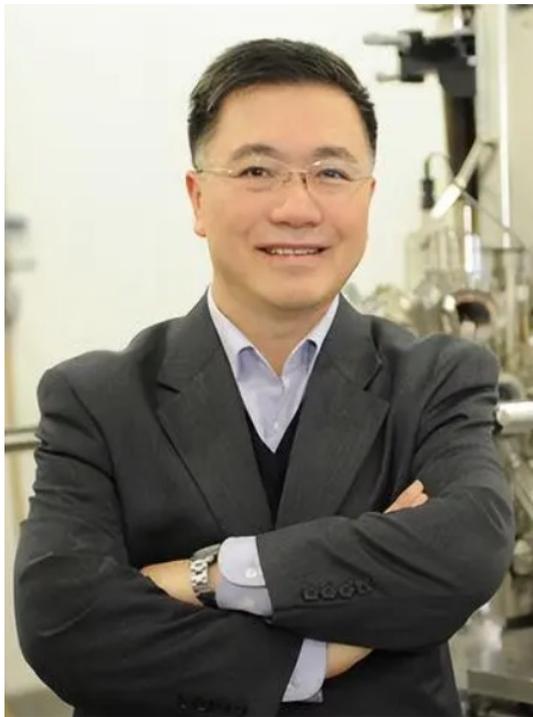
 **15 February 2022** Editor's Note: The editors of Nature have been alerted to concerns regarding the manner in which the data in this paper have been processed and interpreted. Nature is working with the authors to investigate these concerns and establish what (if any) impact they will have on the paper's results and conclusions. In the meantime, readers are advised to use caution when using results reported therein.

 **31 January 2022** Editor's Note: The authors have made available raw data pertaining to the magnetic susceptibility measurements in the paper. These can be accessed at <https://arxiv.org/abs/2111.15017>.

这位 Dias 曾参与制备后来失踪的金属氢，曾发表约 15 摄氏度下超高压超导的论文并被撤稿。许多学者质疑他的可信程度。

同月 9 日，Dias 及其团队的论文发表于《自然》。文中给出了可能的材料结构、附带号称是原始数据的东西，但避而不谈具体制备方法。

室温超导风波：勇于证伪的中国科学家



闻海虎

nature

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06162-w>

Accelerated Article Preview

Absence of near-ambient superconductivity in $\text{LuH}_{2\pm x}\text{N}_y$

Received: 16 March 2023

Accepted: 3 May 2023

Accelerated Article Preview

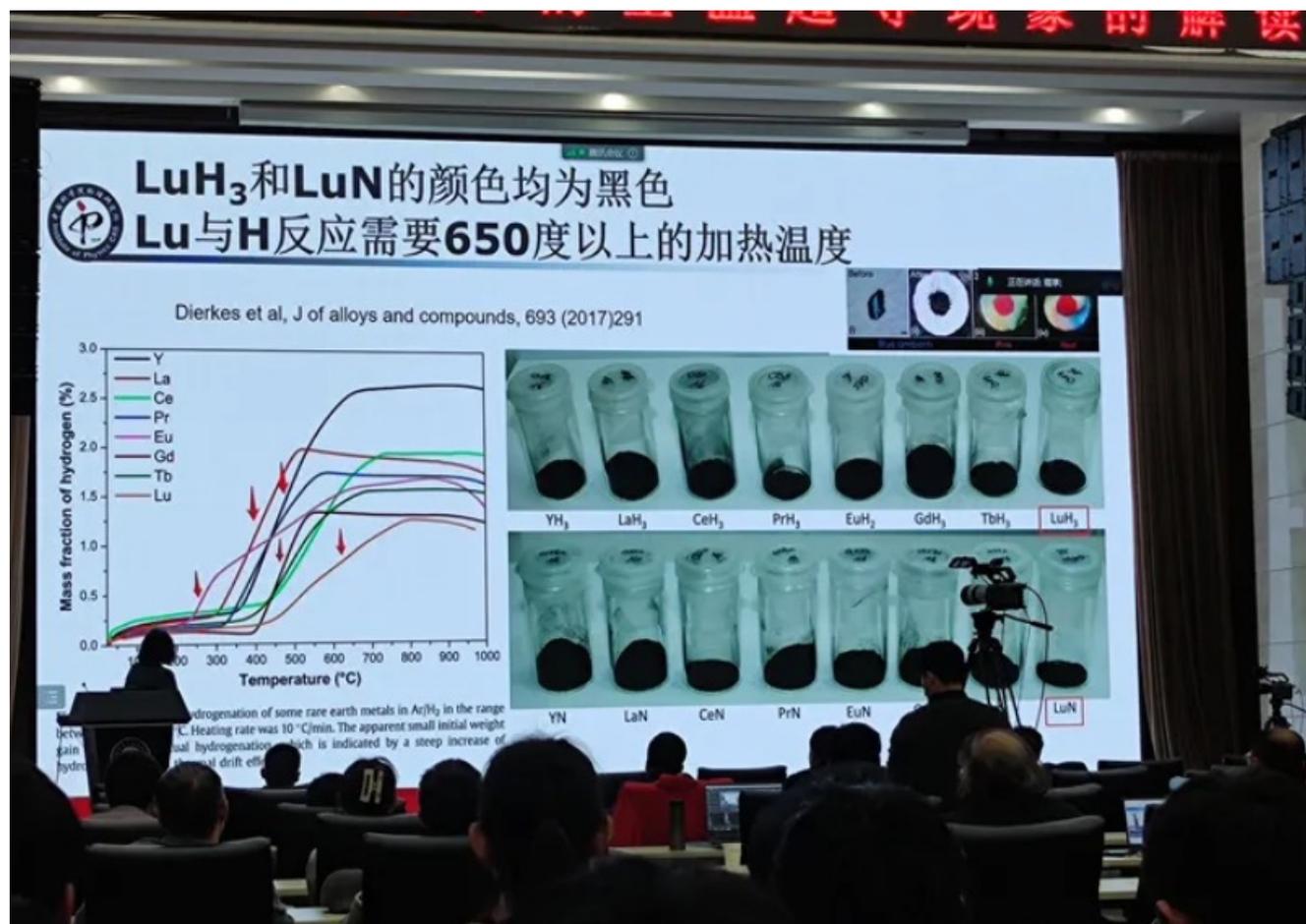
Cite this article as: Ming, X. et al. Absence of near-ambient superconductivity in $\text{LuH}_{2\pm x}\text{N}_y$. *Nature* <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06162-w> (2023)

Xue Ming, Ying-Jie Zhang, Xiyu Zhu, Qing Li, Chengping He, Yuecong Liu, Tianheng Huang, Gan Liu, Bo Zheng, Huan Yang, Jian Sun, Xiaoxiang Xi & Hai-Hu Wen

This is a PDF file of a peer-reviewed paper that has been accepted for publication. Although unedited, the content has been subjected to preliminary formatting. Nature is providing this early version of the typeset paper as a service to our authors and readers. The text and figures will undergo copyediting and a proof review before the paper is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers apply.

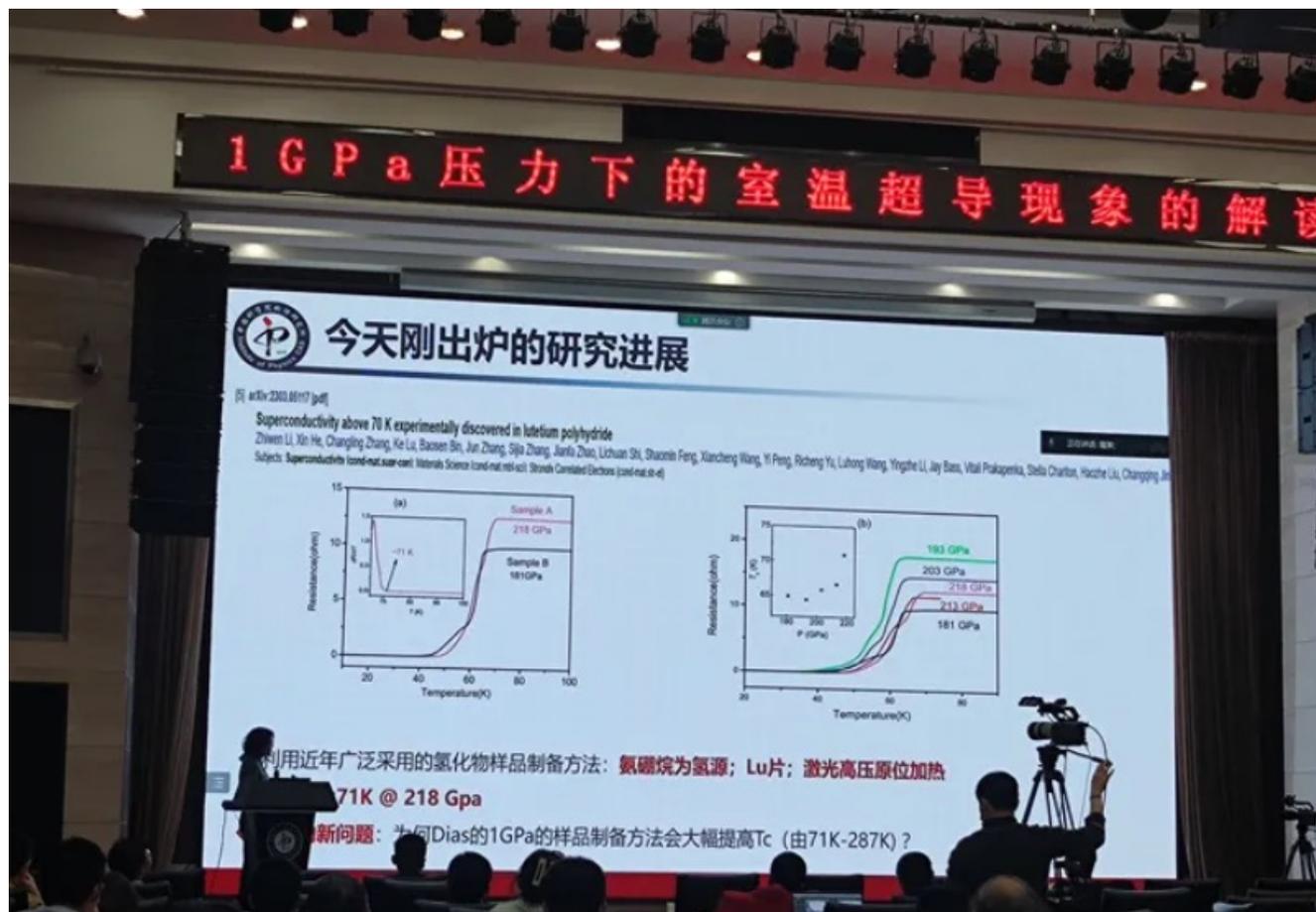
南京大学闻海虎团队发现 LuH_2 掺N的化合物与Dias团队报道的晶体结构一样，但没有观察到超导。在1 GPa左右，电阻在室温附近有一些异常，可能是结构相变，在高压下就没有这个现象。 LuH_2 掺N的化合物再加压过程中也没有观察到由蓝色变为粉色，再变为红色的颜色变化。

室温超导风波：勇于证伪的中国科学家



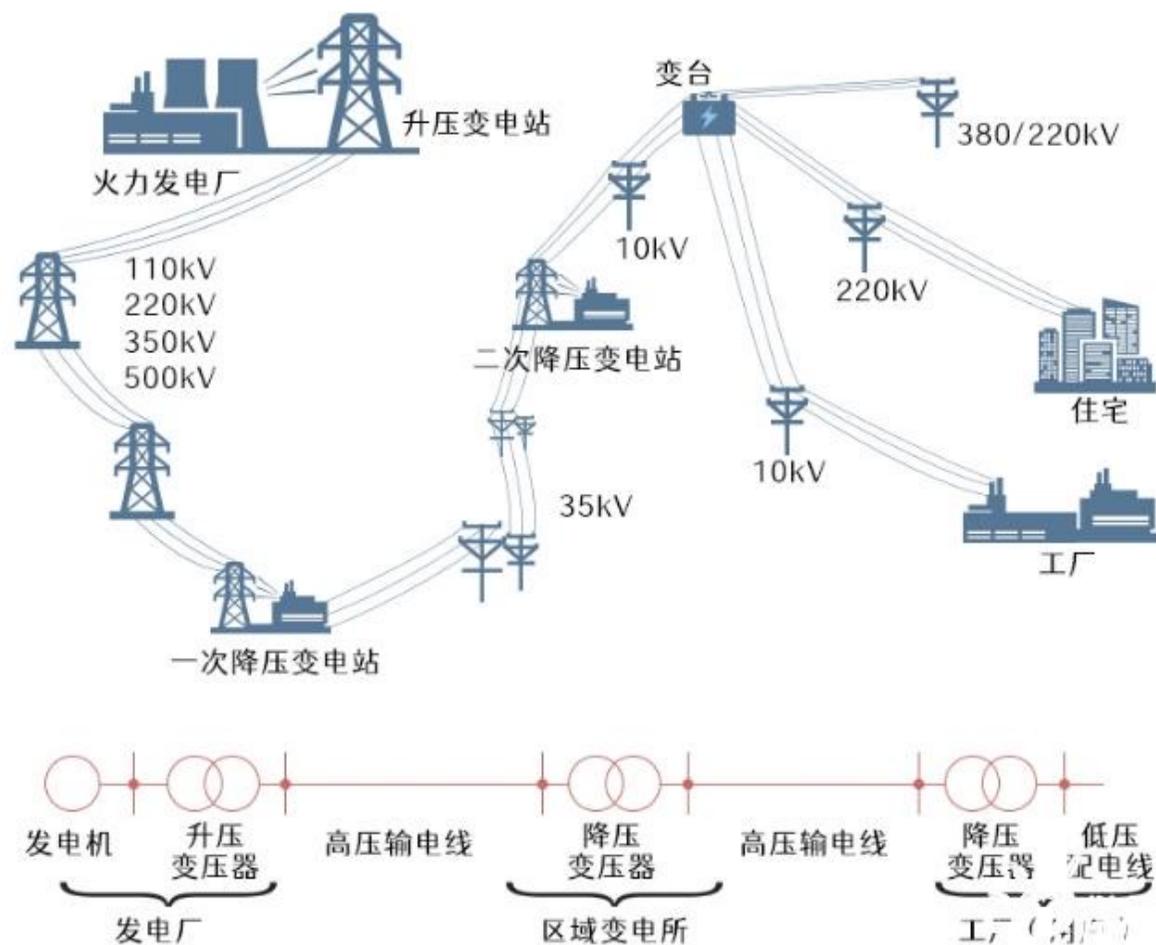
物理所报告会上，孙力玲研究员分析了这篇工作的主要疑点：Lu元素与H元素结合成LuH₃一般需要650 °C以上的高温，而Dias团队却在65 °C下成功制备了Lu-H-N。

室温超导风波：勇于证伪的中国科学家



物理所报告会上靳常青研究员用 $\text{NH}_3 \cdot \text{BH}_3$ 作为氢源重复了Lu-H体系的高压实验，只能在218 GPa下得到71 K的超导转变温度。

有了室温超导 我们能干什么？



有了室温超导 我们能干什么？



磁悬浮列车

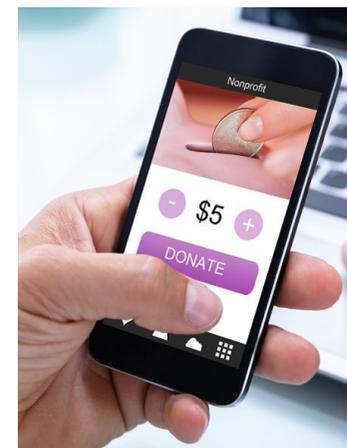
https://www.bilibili.com/video/BV1sP4y1X7gX/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=1fc635e06bdf3882a28f190f43270f7f

有了室温超导 我们能干什么？



可控核聚变普遍需要使用低温超导材料制作线圈，通电后，利用电流磁效应产生强磁场，可以约束聚变反应中温度高达上亿度的等离子体。

有了室温超导 我们能干什么？



量子计算

6.2.2 材料的介电性

电容与介电常数

在交变电场下，电阻无法单独表征材料的电学性能，因此必须引入**电容**。

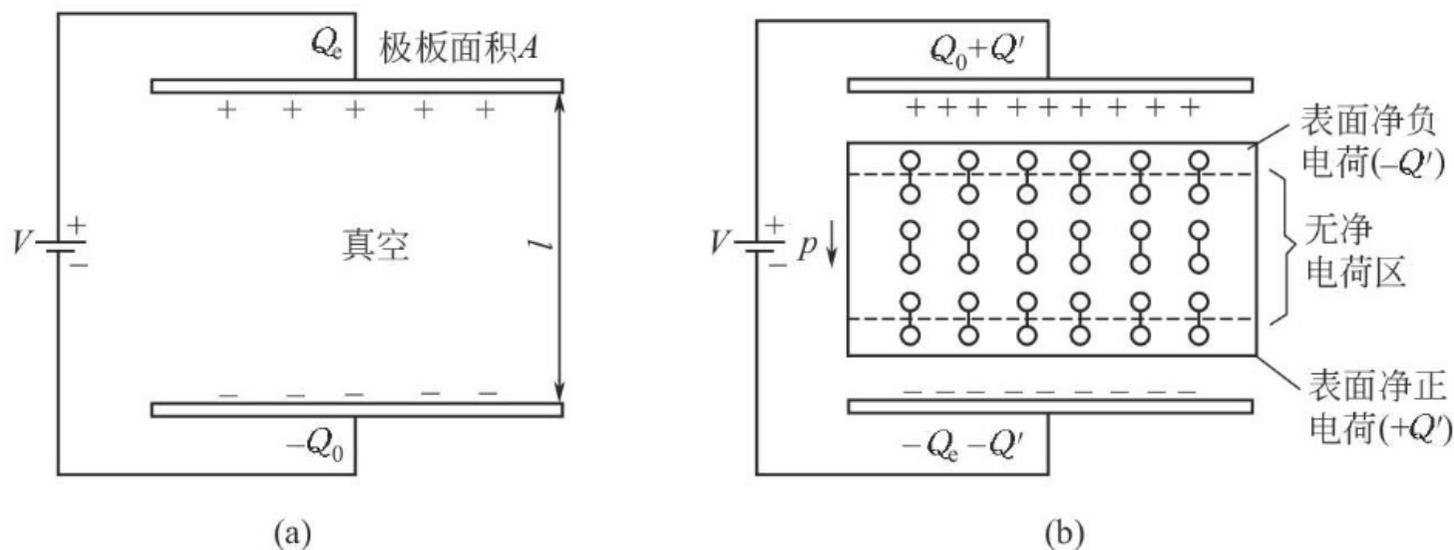


图4-83 电容器 (a) 和介质电容器 (b) 表面电荷密度的变化

电容工作原理

https://www.bilibili.com/video/BV17E41177hW/?spm_id_from=333.788.recommend_more_video.-1&vd_source=1fc635e06bdf3882a28f190f43270f7f

电容与介电常数

对于真空平行板电容： $C_0 = \frac{Q_0}{V} = \epsilon_0 \frac{A}{l}$ ；

对于介质中的平行板电容： $C = \frac{Q}{V} = \frac{Q_0 + Q'}{V} = \epsilon \frac{A}{l}$ ；

令 $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ ，即得相对介电常数，它表征了介质储存电荷的能力。

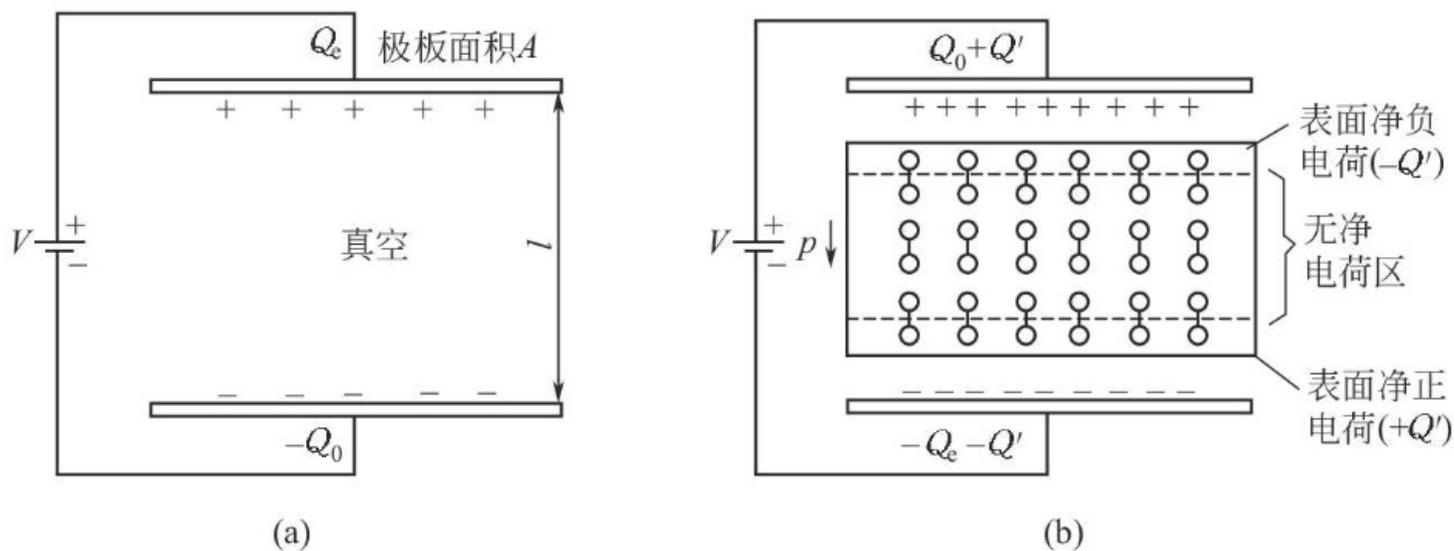


图4-83 电容器 (a) 和介质电容器 (b) 表面电荷密度的变化

电容与介电常数

电介质因电荷重新分布在宏观上产生极化现象，引起电容器表面电荷密度增加，这一效应用极化强度表征：

$$p = \frac{Q'}{A} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)E$$

电介质因电荷重新分布在宏观上产生极化现象，引起电容器表面电荷密度增加，这一效应用极化强度表征：

$$p = \frac{Q'}{A} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)E$$

电容与介电常数

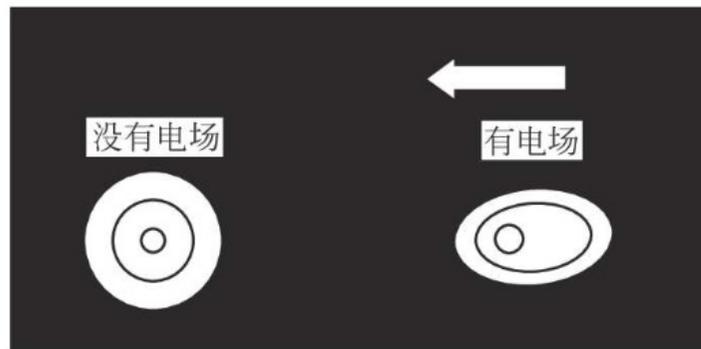
电介质的极化可来源于三方面：

- 1) 电子极化；
- 2) 离子极化；
- 3) 取向极化；

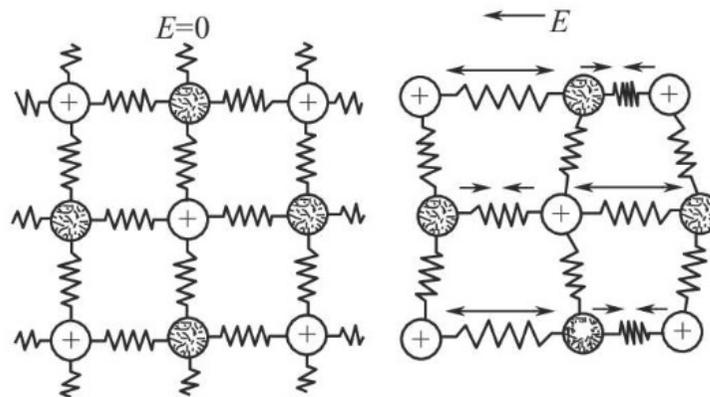
在均匀材质的内部，总极化率可认为是三者贡献之和：

$$\alpha_T = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_o$$

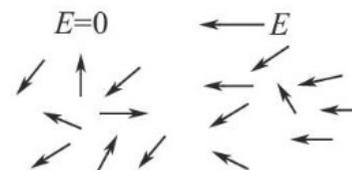
电子极化与离子极化不具有温度依赖性。



(a) 电子极化



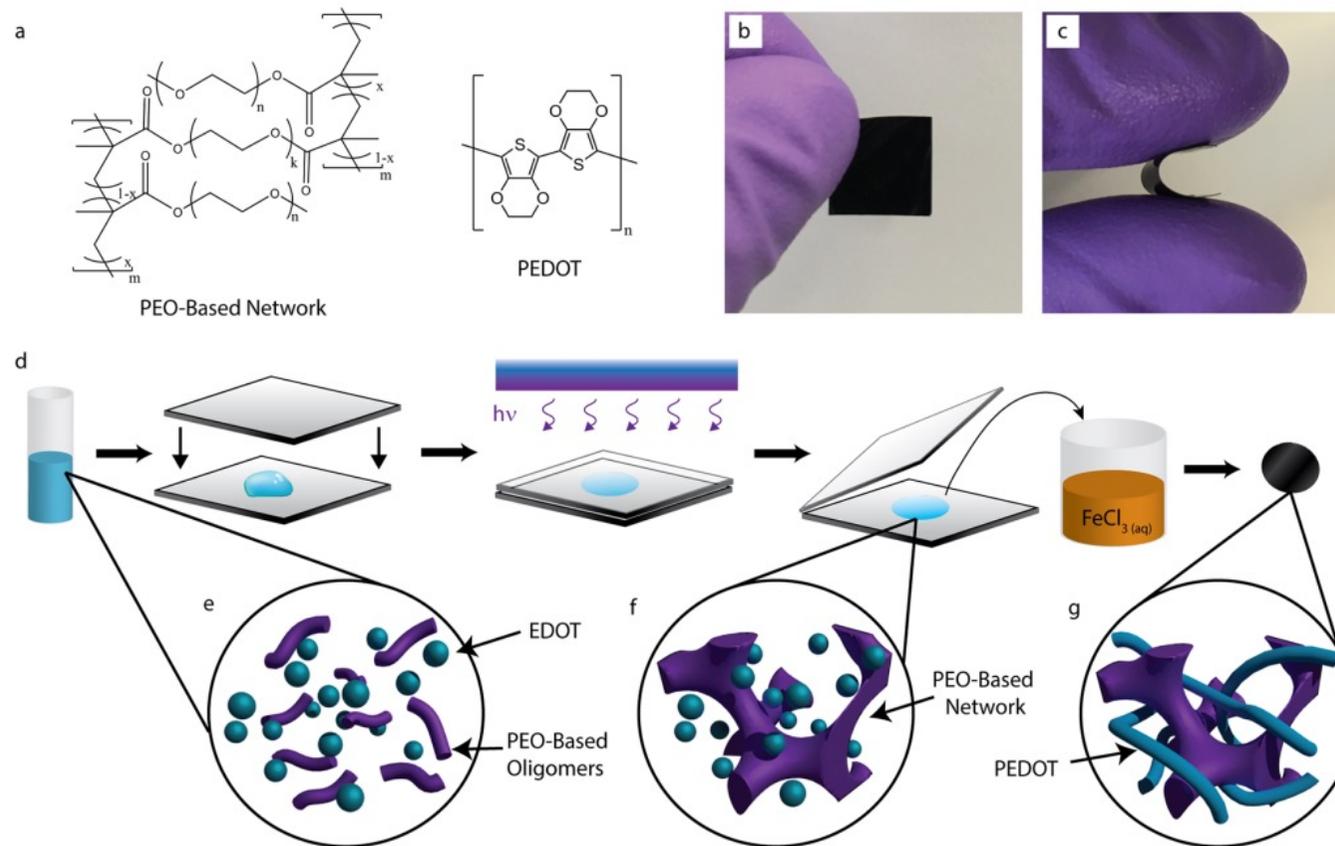
(b) 离子极化



(c) 取向极化

图4-84 极化的类型

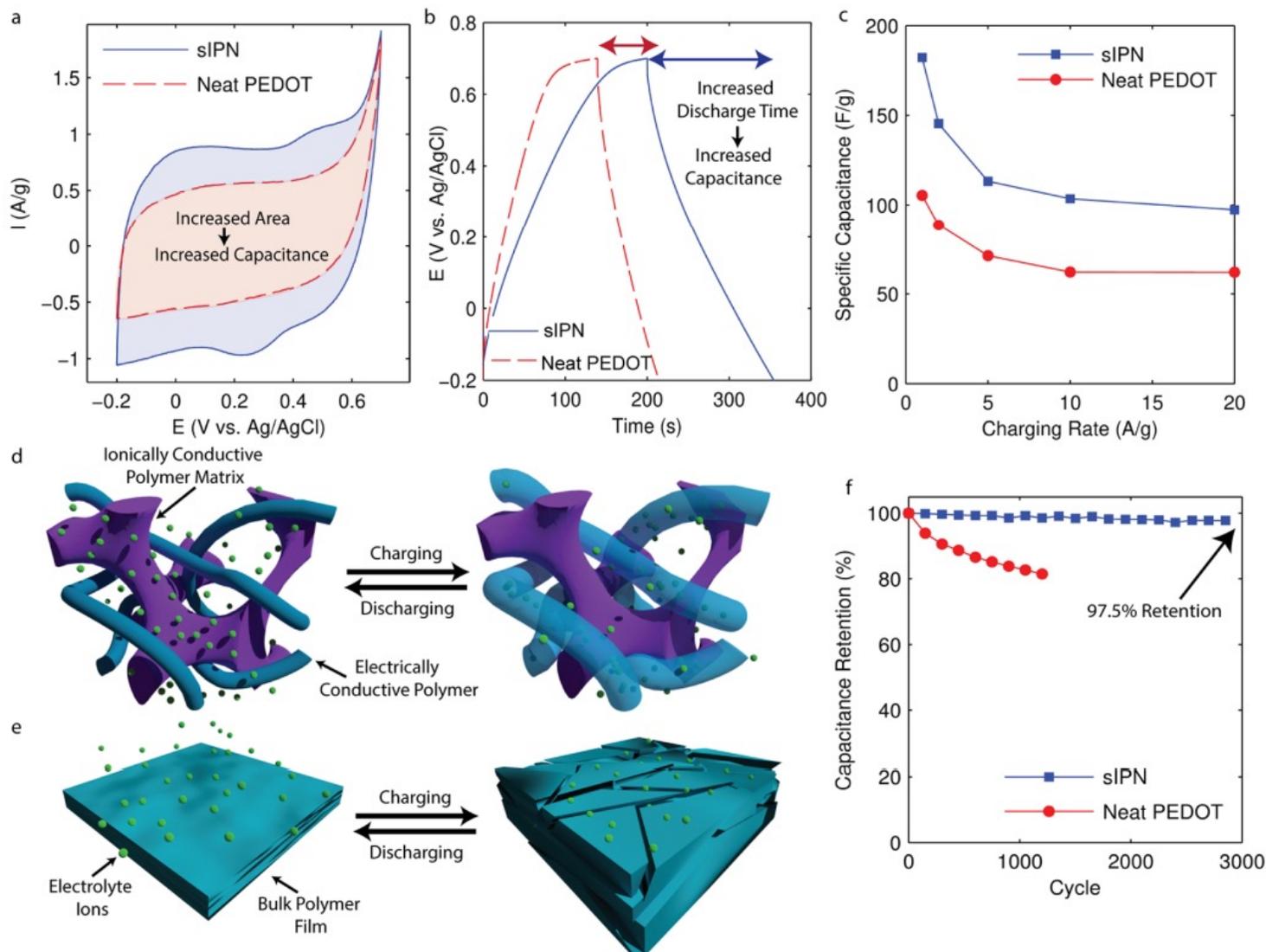
聚合物与超级电容器



使用互穿网络聚合物制备超级电容器

ACS Energy Lett. 2017, 2, 9, 2014–2020

聚合物与超级电容器



ACS Energy Lett. 2017, 2, 9, 2014–2020

介电损耗

材料的介电常数与外加电场的频率有关。

频率过高，介质极化速度跟不上频率，因此表现出小介电常数。频率很低时，介电常数最大。中等频率时，材料表现出相位滞后，并伴随有介电损耗。

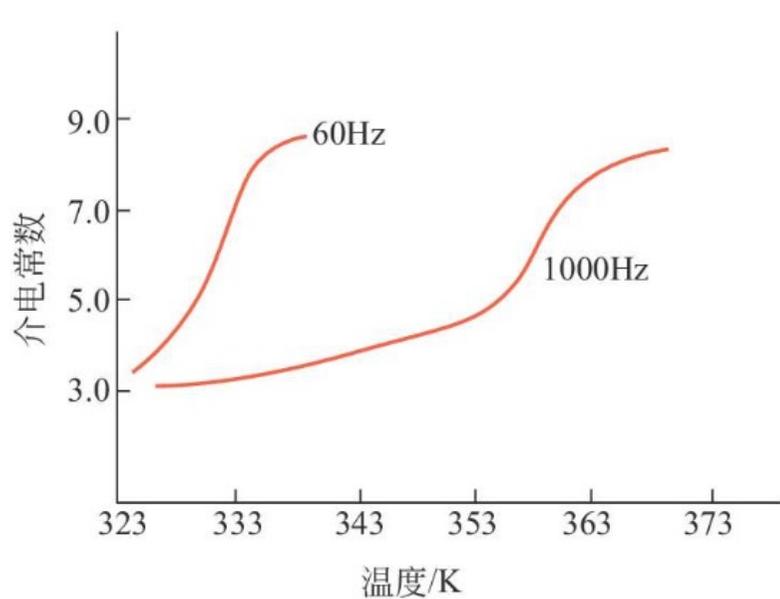


图4-85 乙酸乙烯酯的介电常数-温度曲线

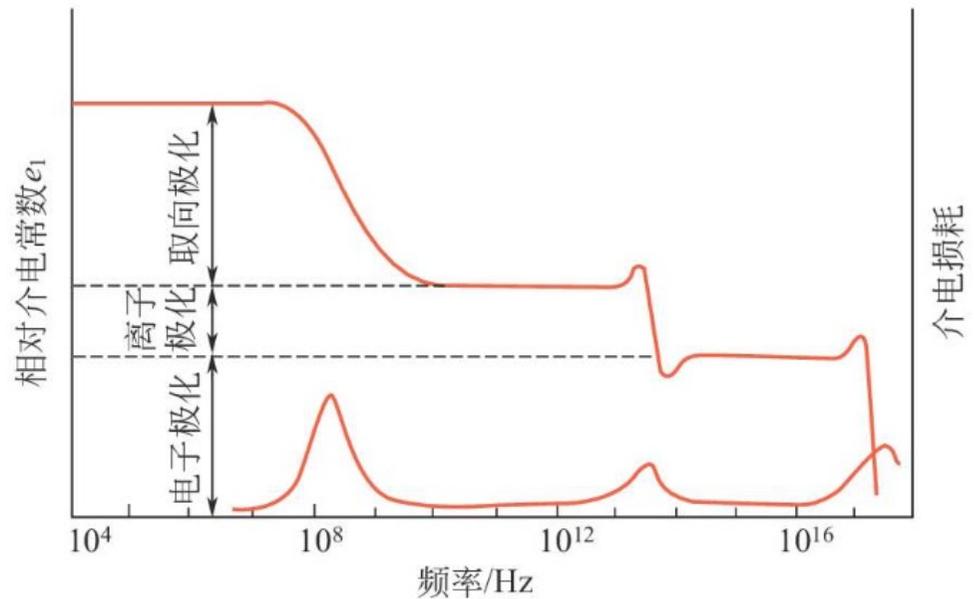


图4-86 频率对介电常数和介电损耗的影响

介电损耗

在交变电场下，由于纯电容作用，会产生与电压相位相差 90° 的电流 I_C ，也会产生与电压同相位的漏电流 I_R 。后者会产生电功率损耗，故定义损耗因子：

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C}$$

若使用复数介电常数：

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

则损耗因子可表示为：

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

介电损耗与力学松弛原则上是相似的。

介电损耗

介电损耗来源于两个方面。漏电流 I_R 一方面可来源于介质中的杂质，即漏电流 I_R ；一方面也来源于极化取向与外加电场的相位差而产生的极化电流损耗。

对于非极性材料，极性杂质的存在往往是介电损耗的主要原因。在可见光频率范围内，非极性或弱极性聚合物的介电常数与光折射率之间存在一定关系：

$$\varepsilon' = n^2$$

介电损耗在不同频率范围内可形成不同的吸收谱图。

击穿强度

电场强度超过某一值时，电介质的绝缘性能消失，此为介电击穿。击穿电压与介质厚度之比即为击穿强度。

$$E_b = \frac{V_b}{d}$$

击穿可分为特征击穿、热击穿、电机械击穿、放电击穿。通常使材料表面平滑、减少内部微细孔隙浓度可提高其击穿强度。对于聚合物，提高相对分子量、结晶度、交联密度、玻璃化温度均可提升聚合物的抗击穿性。

6.2.3 物质的磁性

磁学基本量

1) **磁矩**。磁矩取决于物质本身，表现为闭合回路中电流强度与面积之积。

$$m = I \cdot S$$

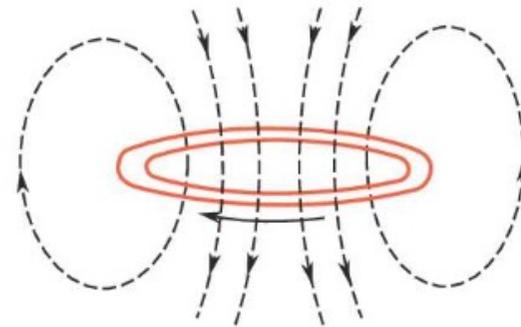


图4-87 磁矩

2) **磁化强度**。在外加磁场作用下，磁介质发生取向，宏观上呈现磁性，即被磁化。磁化强度为单位体积中所有原子的磁矩之和。

$$M = \frac{\sum m}{\Delta V}$$

磁学基本量

3) **磁感应强度**。在真空中，物质的磁感应强度与磁场强度有如下关系：

$$B_0 = \mu_0 H$$

在磁介质中，

$$B = \mu H$$

μ 为磁导率，定义：

$$B \equiv \mu_0(H + M) = \mu H$$

将磁矩放入磁场中，会产生相应的力矩：

$$J = mB$$

磁学基本量

3) 磁化率。由 $B \equiv \mu_0(H + M) = \mu H$ 可得：

$$\left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1\right)H = M$$

定义 $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ ，为相对磁导率。

定义 $\chi = \mu_r - 1$ ，可得；

$$M = \chi H$$

χ 即为磁化率，衡量物质磁化的难易程度。

磁性

电子磁矩由轨道磁矩和自旋磁矩组成，实验证明后者数值上更大，起主要作用。每个电子的自旋磁矩值约为一个玻尔磁子 $\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} A \cdot m^2$ 。

电子壳层未被填满的原子具有永久磁矩。

处于不同原子间的、未被填满的壳层上的电子有时会发生“交换”作用，使物质呈现铁磁性。这种“交换”作用，类似于电子被“公有化”。

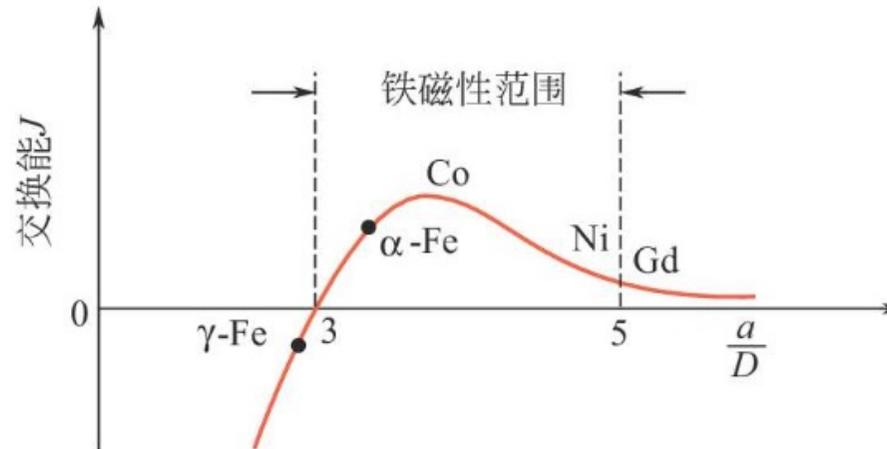


图4-88 交换能与铁磁性的关系

磁性的分类

当磁化强度为负值时，物质表现出抗磁性。Bi、Cu、Au、Ag等金属是典例。

抗磁性物质本身不具有永久磁矩，在外磁场作用下，可感生出方向相反的磁场，但通常强度很小，接近零。

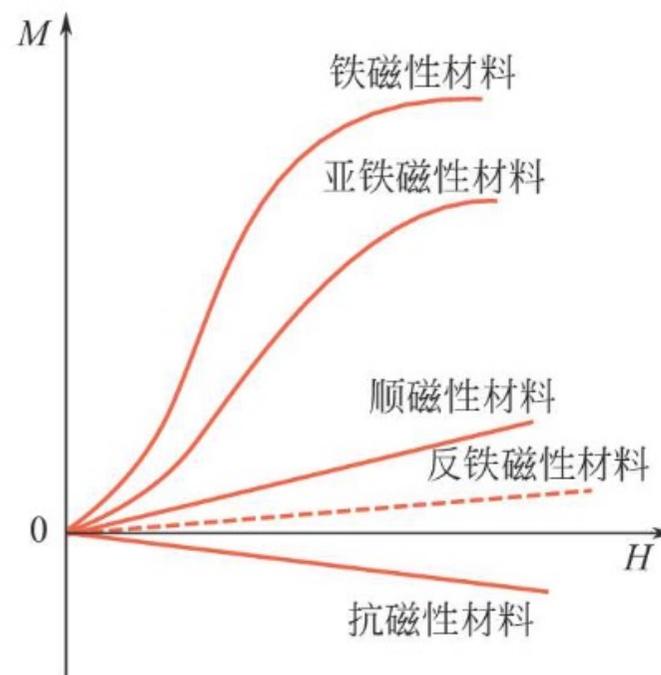


图4-89 五类磁体的磁化曲线

磁性的分类

顺磁性物质本身具有永久磁矩，但无外场作用时，其磁性被热运动平均化，表现为无磁性。在外磁场作用下，物质呈现极弱磁性。

顺磁性物质的磁化率与温度成反比：

$$\chi = \frac{C}{T}$$

C 为居里常数。

顺磁物质包括过渡元素、稀土元素、Al、Pt等。

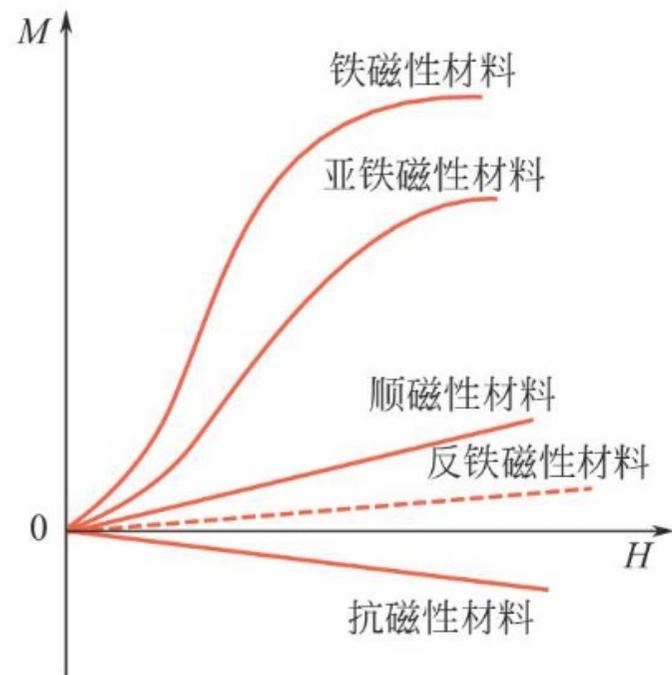


图4-89 五类磁体的磁化曲线

磁性的分类

相邻原子呈磁矩呈同向排列时，物质表现出**铁磁性**。在很小的磁场强度下，即可感生出较高的极化强度。外场移去后，磁性能够保持。

铁磁体的铁磁性来源于极强的内部交换场，相邻原子的磁矩呈现平行取向，产生**自发磁化**。

在居里温度 T_c 以上，铁磁性被热运动破坏，物质呈现强顺磁性。其磁化率服从居里-韦斯定律：

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}$$

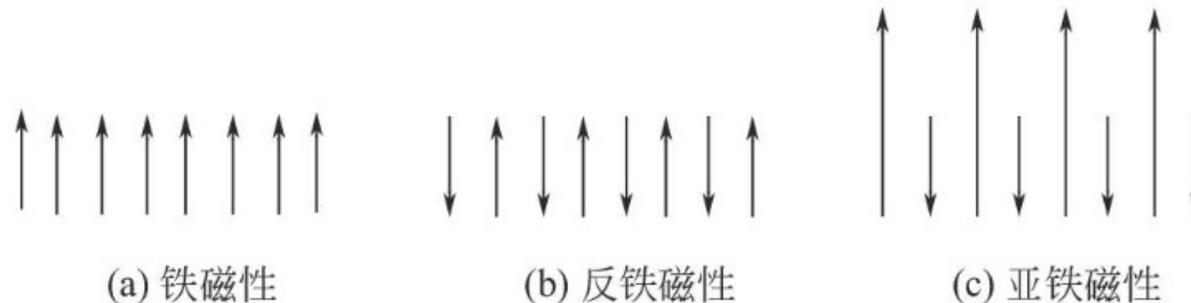


图4-90 铁磁性、反铁磁性、亚铁磁性的自旋排列

磁性的分类

相邻原子呈磁矩呈反向排列时，物质表现出反铁磁性。低温时，相邻原子的磁矩相互抵消，总磁矩为零，磁化强度也为零。 MnO 是典型反铁磁性体。

温度升高时，热运动使得自旋方向作用减弱， χ 逐渐增大，直到达到奈尔温度 T_n 。

在奈尔温度 T_n 以上，热运动占据主导作用， χ 逐渐减小直至一个定制。在 T_n 以上转变为顺磁性的物质，其磁化率仍服从居里-韦斯定律。

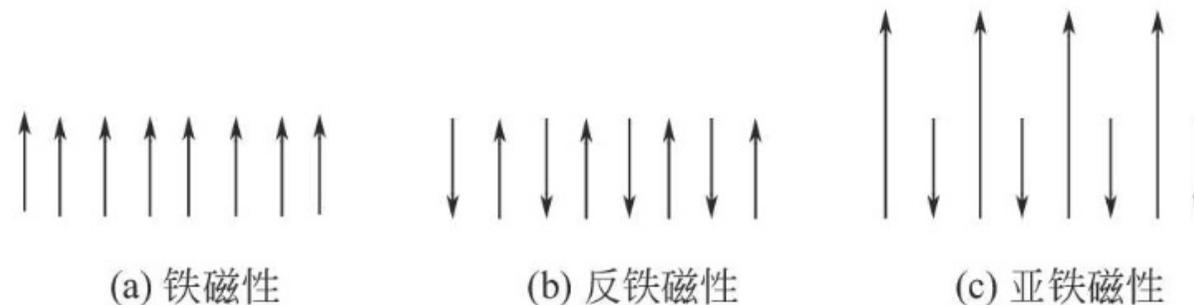


图4-90 铁磁性、反铁磁性、亚铁磁性的自旋排列

磁性的分类

相邻原子呈磁矩呈反向排列时，但响铃磁矩大小不等，物质表现出亚铁磁性。

亚铁磁性的物质，整体上磁性规律与铁磁体相似，在居里温度 T_c 以下呈现铁磁性，在居里温度 T_c 以上转变为顺磁性。但整体磁化强度、磁化率不如铁磁体。

磁铁矿（ Fe_3O_4 ）是典型的亚铁磁体。

相邻原子呈磁矩呈反向排列时，但响铃磁矩大小不等，物质表现出亚铁磁性。

亚铁磁性的物质，整体上磁性规律与铁磁体相似，在居里温度 T_c 以下呈现铁磁性，在居里温度 T_c 以上转变为顺磁性。但整体磁化强度、磁化率不如铁磁体。

磁铁矿（ Fe_3O_4 ）是典型的亚铁磁体。



磁畴

铁磁体在极小磁场强度下，即可表现出磁性，这是由于其内部存在自发磁化的小区域——磁畴。

磁畴结构存在，是因为体系能量总是要保持最小。单一取向的磁体分裂成空间上约 $10^{-9}cm^3$ 的小区域，区域内部保持单一自旋取向。但磁畴之间相互抵消，即“闭合”。

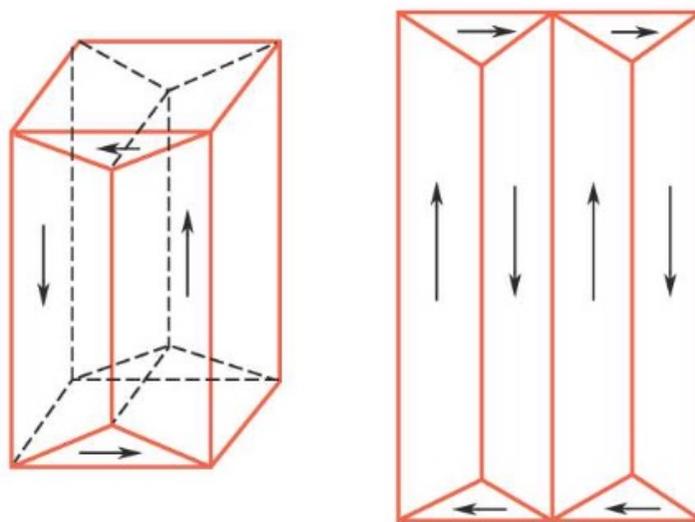


图4-91 闭合磁畴示意图

磁滞回线

将未经磁化的顺磁体或铁磁体放入磁场，其磁感应强度与外部场强并非线性变化。这源于磁畴壁的移动和磁畴的转向。

交变磁场下，呈现磁滞回线。

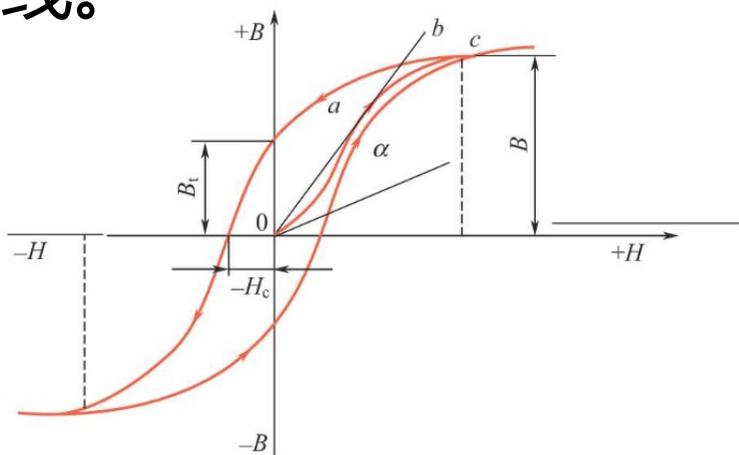


图4-93 磁滞回线

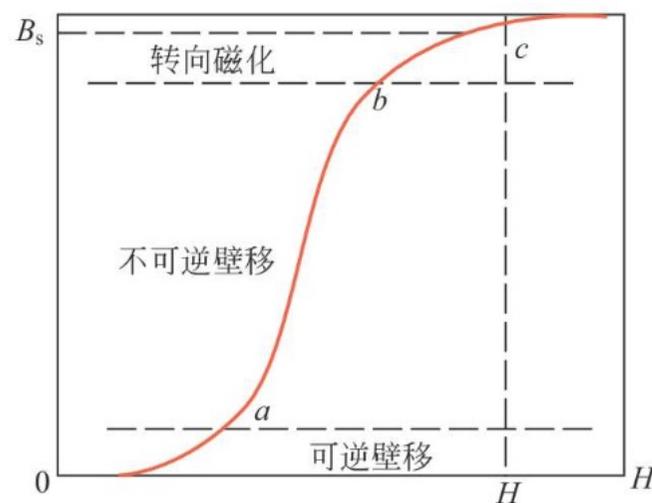
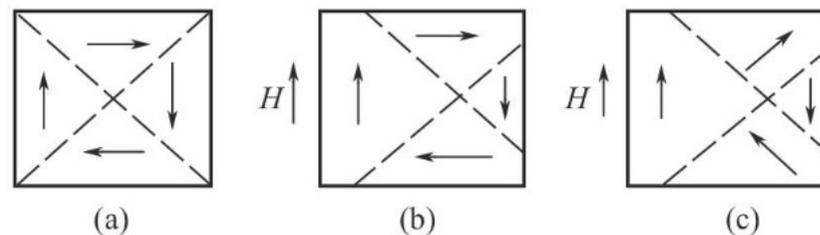


图4-92 磁化过程及磁化曲线

(a) 退磁状态下的磁畴分布；(b) 磁畴扩大；
(c) 磁化矢量转向

6.2.4 材料的磁学性能

材料的磁学性能

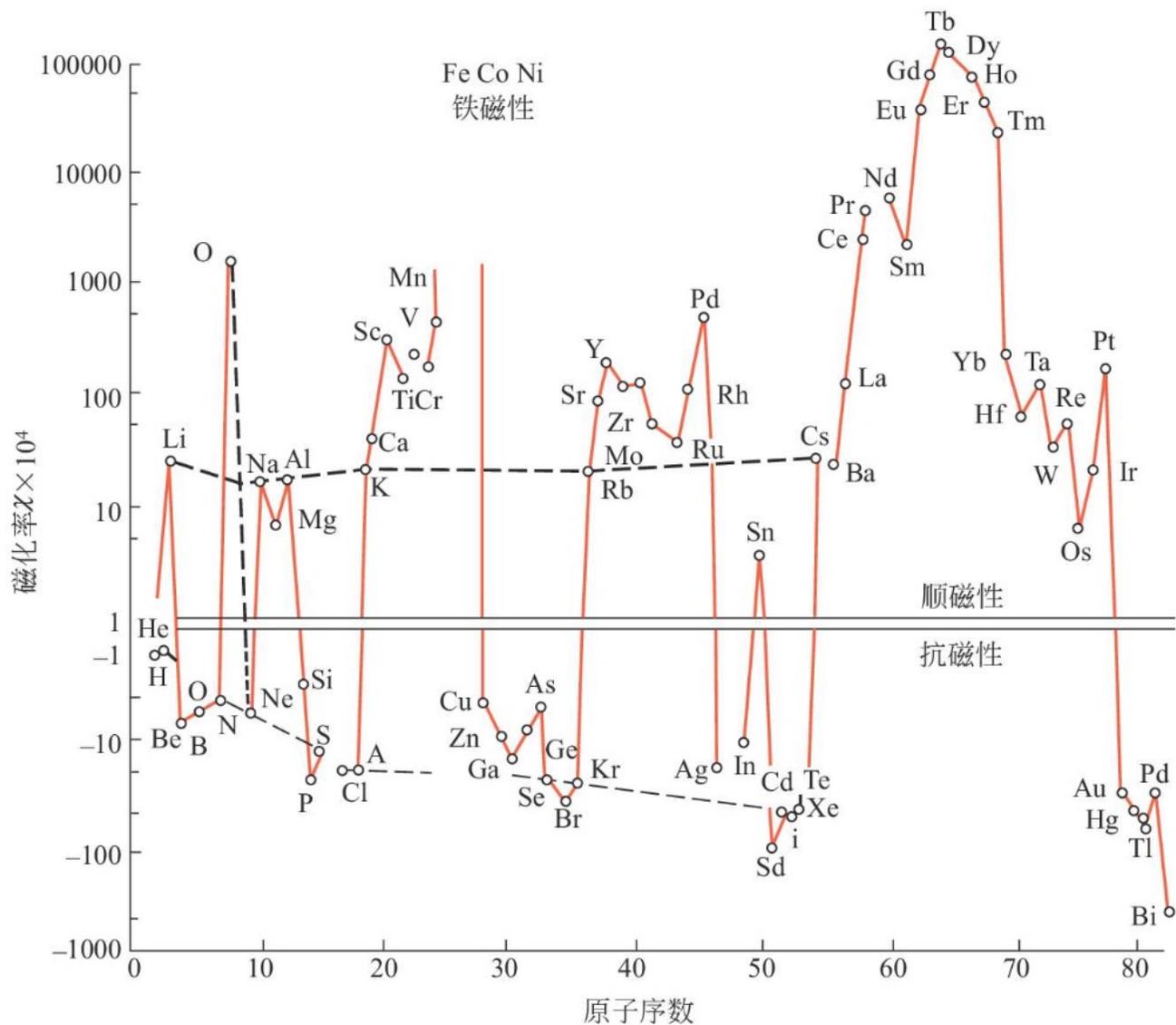


图4-94 周期表中元素的磁化率

金属的抗磁性与顺磁性

金属材料通常呈现顺磁性，但Fe、Co、Ni及其合金可表现出铁磁性。

表 4-32 某些元素族的磁性分析

磁性 \ 元素	碱金属与碱土金属	过渡稀土金属	Cu、Ag、Au、Zn	惰性气体
离子 χ 抗	✓	✓	✓ _{主要}	✓ _{主要}
χ 顺	×	✓ _{主要}	×	×
自由电子 χ 抗			✓	×
χ 顺	✓ _{主要}	✓		
结论	顺磁性	顺→铁磁性	抗磁性	

铁氧体与高分子

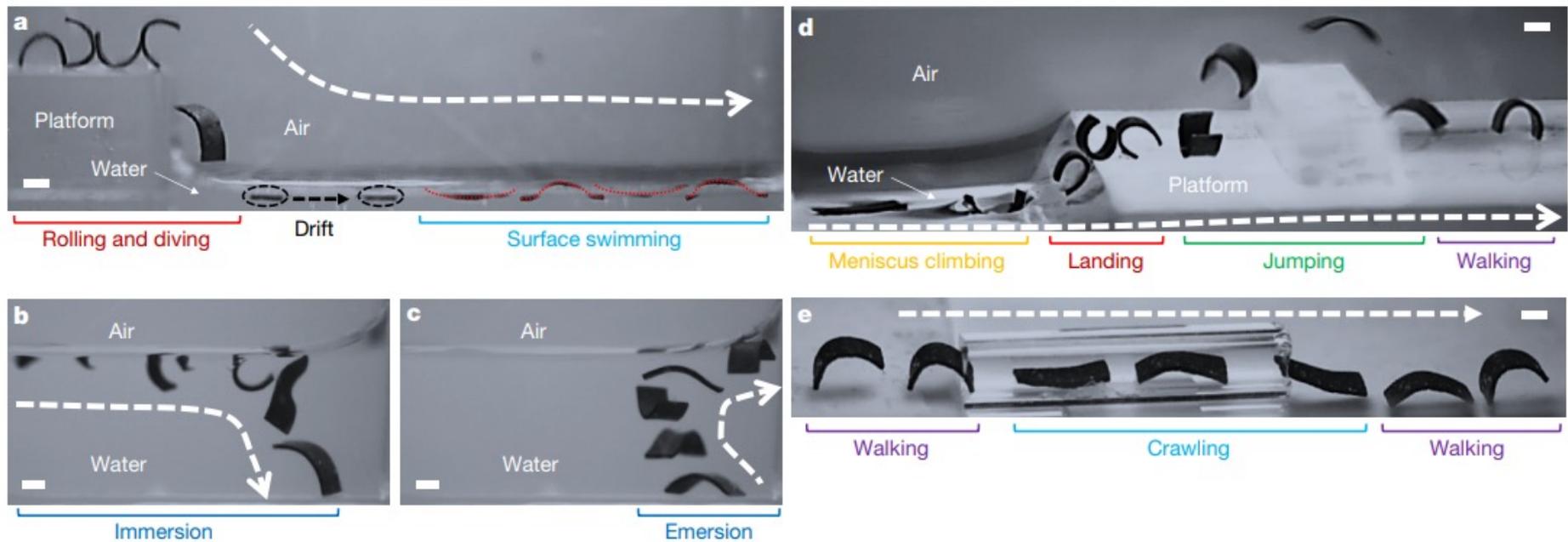
无机非金属材料中有一类重要的亚铁磁性材料，称为**铁氧体**。铁氧体可分为尖晶石型、石榴石型、磁铅石型等。铁氧体的电阻率在 $10\sim 10^6 \Omega \cdot m$ ，属于半导体范畴。

铁氧体的通式为 $MO \cdot Fe_2O_3$ ，通过氧离子发生的超交换作用是铁氧体亚铁磁性的主要来源。

高分子材料通常呈现抗磁性。

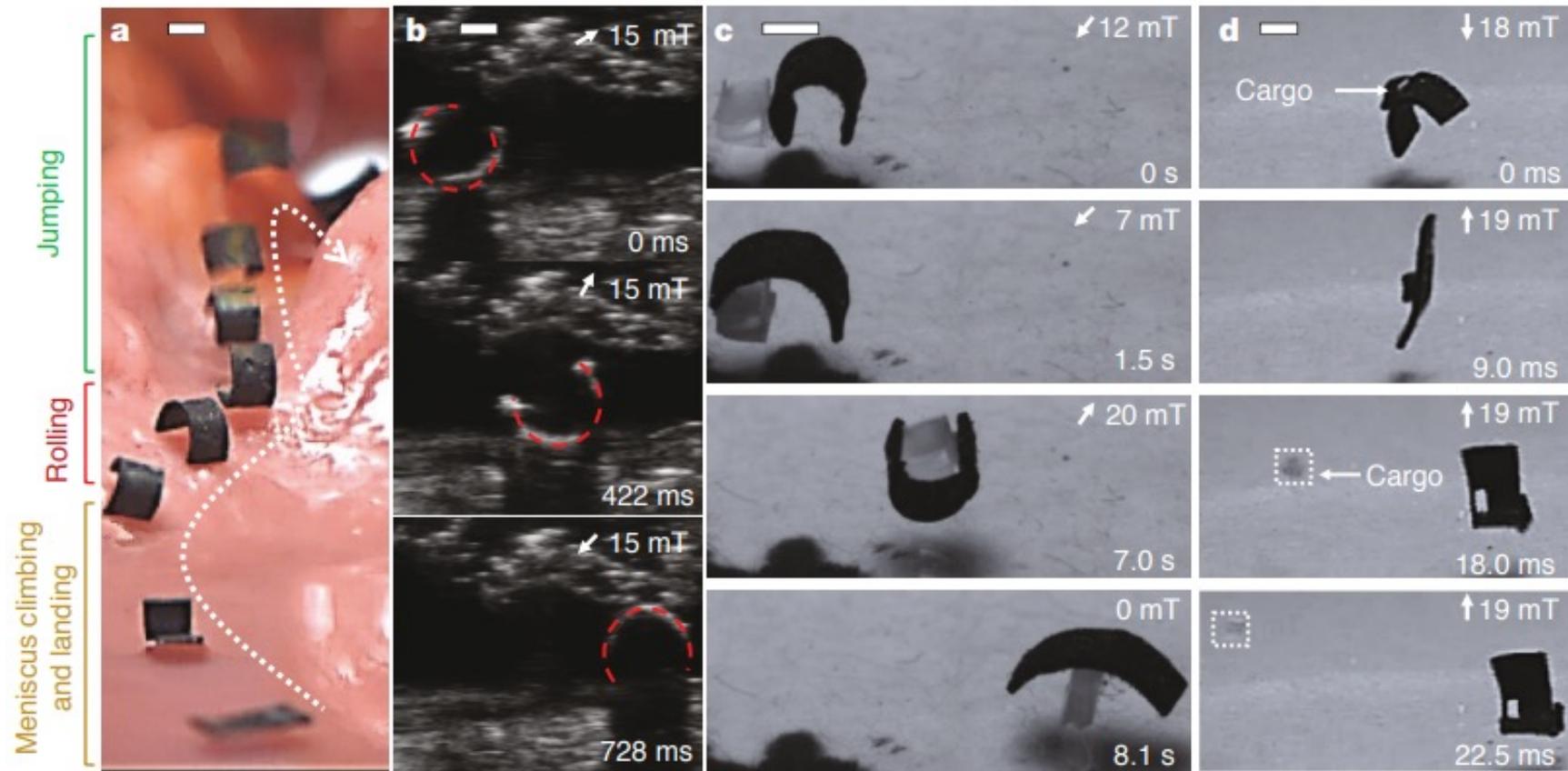


磁响应智能机器人材料



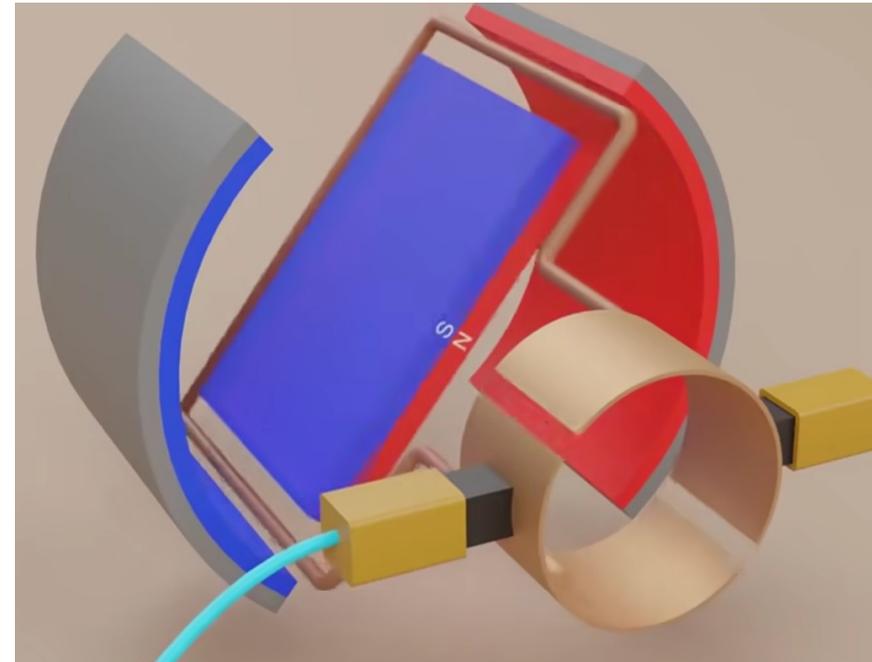
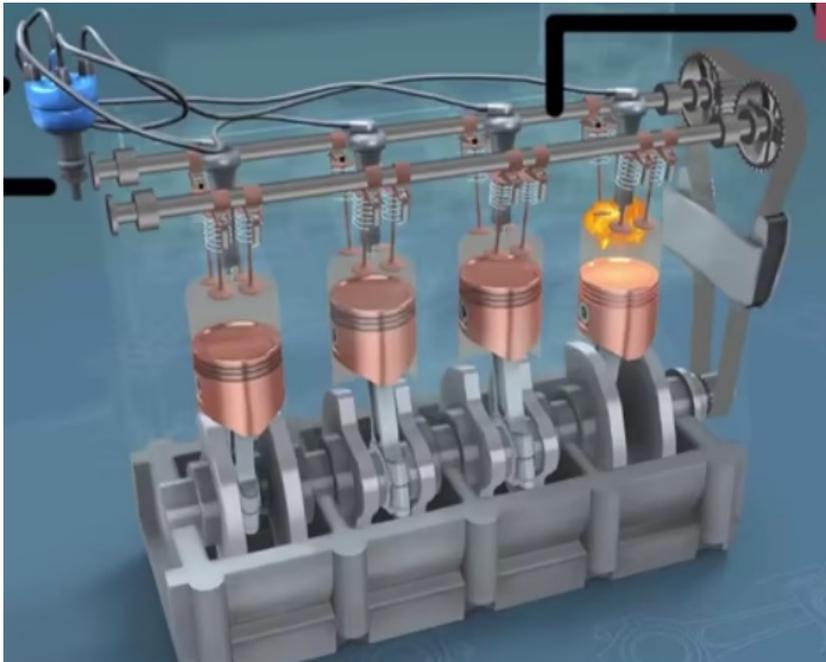
Nature, 2018, 554, 81–85

磁响应智能机器人材料



Nature, 2018, 554, 81–85

电机 vs 内燃机



内燃机工作原理

https://www.bilibili.com/video/BV1HM411C7hT/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=1fc635e06bdf3882a28f190f43270f7f

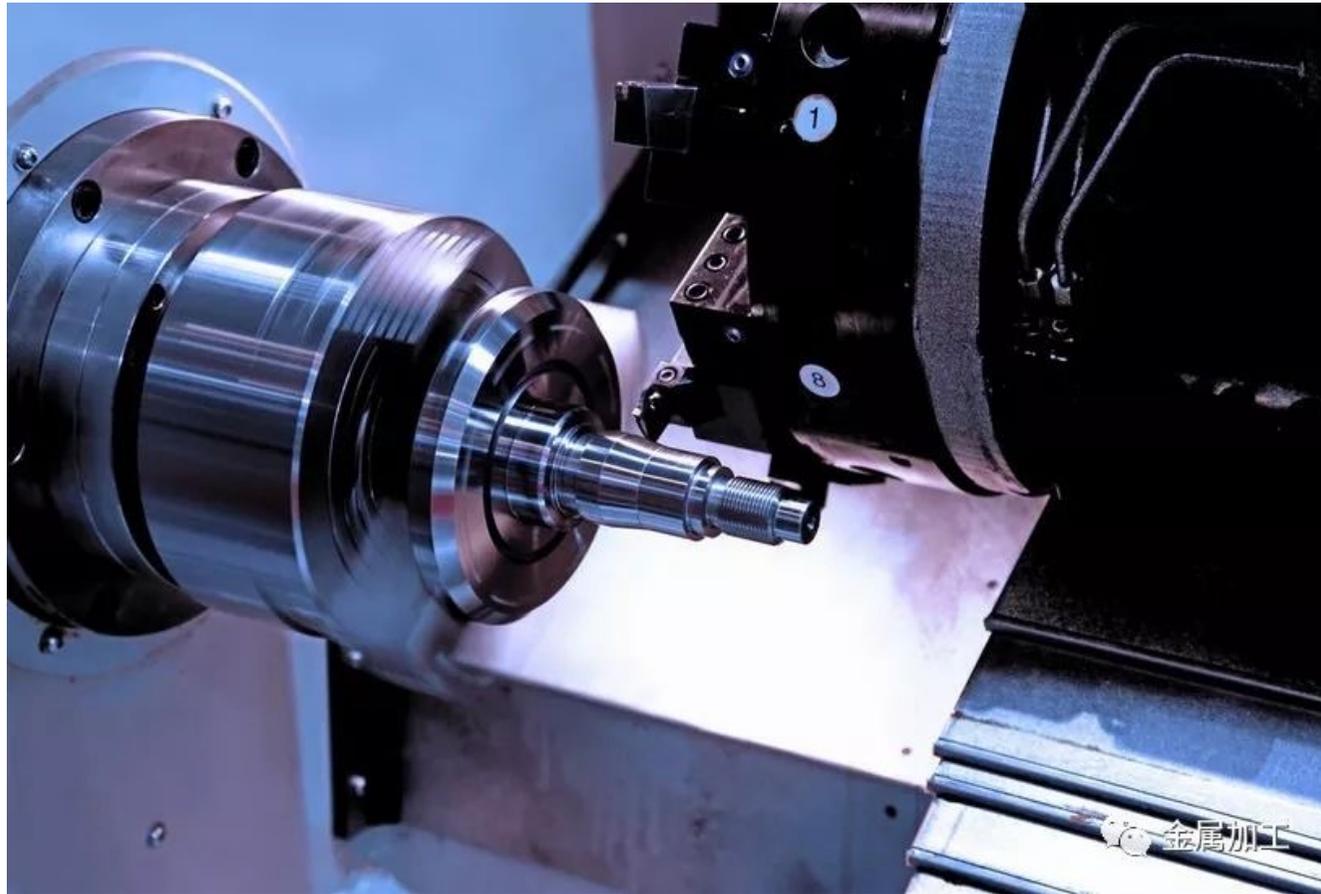
电机 vs 内燃机

金属铸造



电机 vs 内燃机

机械加工



电机 vs 内燃机

装配工艺



电机 vs 内燃机

橡胶



电机 vs 内燃机

机械零部件



总结

