



第七章 薄膜的物理性质

□ 7.2 薄膜的电学性质

7.2.1 金属薄膜的电学性质

7.2.2 介质薄膜的电学性质

7.2.3 半导体薄膜的电学性质

7.2.4 薄膜的超导电性

薄膜的电学性质，如电阻率、电阻温度系数、介电常数等及其与膜厚、外加电场、环境温度等的关系直接决定了薄膜在各种实际应用中的性能。

本节主要介绍金属薄膜、介质薄膜、半导体薄膜的电学性质。



1. 块状金属材料的导电性质

表征金属导电性质的基本物理量有电阻 R 、电阻率 ρ 和电阻温度系数 α 。对于长度为 L ，横截面积为 S 的金属丝，其电阻值可表示为：

$$R = \rho \cdot L / S$$

电阻率 ρ 仅与金属材料本性有关，而与导体的几何尺寸(L、S等)无关。电阻率 ρ 的倒数称为电导率，并用 σ 表示：

$$\sigma=1/\rho$$

金属在不发生相变的情况下，其电阻率 ρ 随温度的升高而增大：

$$\rho_T=\rho_0 (1+\alpha\bullet T)$$

式中 ρ_T 是温度为T时的电阻率；

ρ_0 是温度为0°C时的电阻率；

α 是电阻温度系数， $\alpha=(\rho_T-\rho_0)/(\rho_0\bullet T)$ 。



电阻温度系数

在讨论电阻温度系数 α 或 α_T 时，都假设金属材料的几何尺寸(如 L或S)与温度变化无关。

由0°C至温度T时的**平均**电阻温度系数为：

$$\alpha = (\rho_T - \rho_0) / (\rho_0 \cdot T)$$

对于温度T时的**真实**电阻温度系数为：

$$\alpha_T = (d\rho/dT) \cdot (1 / \rho_T)$$



根据量子理论推导出金属电阻率 ρ 的表达式为：

$$\rho = 2m / (n \cdot e^2 \cdot \tau)$$

式中 m 是电子质量；

e 是电子电荷；

n 是参与导电的有效电子浓度；

τ 是电子波受相邻两次散射的间隔时间，也常用散射几率 $P = 1 / \tau$ (单位时间的散射次数) 来表示电子波的散射。



散射对电阻率的贡献

在金属晶体中的散射机构有晶格散射 P_1 、电离杂质散射 P_2 、中性杂质散射 P_3 、位错散射 P_4 、载流子散射 P_5 和晶粒间界散射 P_6 。若上述散射同时存在时，则有：

散射几率：

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6$$

式中，只有晶格散射 P_1 与温度 T 有关，在不同温度下，由**晶格散射**对电阻率的贡献为：

高温时：

$$\rho_T = 2mP_1 / (ne^2) = C \cdot T / (4\theta_D)$$

低温时：

$$\rho_T = 124.4 \cdot C \cdot T^5 / \theta_D^5$$

式中 C 是常数， θ_D 是德拜温度 ($\theta/\omega = (h/2\pi)/k$)。

若除晶格散射的 ρ_T 之外，将其它散射机构对电阻率 ρ 的贡献归总为一项 ρ_i ，则电阻率 ρ 可表示为：

$$\rho = \rho_T + \rho_i$$

当温度 T 趋近于0K时， ρ_T 也趋近于零，电阻率 ρ 则趋近于 ρ_i 。

通常将 ρ_i 称为剩余电阻率，上式称为马布森(Matthiessen)定律。

一些有代表性的块状金属导电性能物理参数值在表7-1中给出。



表7-1块状金属导电性的物理参数值

表 7-1 块状金属导电性的物理参数值

金属	θ_D/K	电阻率 $\rho/(\mu\Omega \cdot \text{cm})$ $T=0^\circ\text{C}$	电阻温度系数 $\alpha/(10^{-3}/K)$ $T=\text{室温}$	电子浓度 $n/(10^{22}/\text{cm}^3)$	费米能级 E_F /eV
Ag	220	1.49	4.30	5.9	5.5
Al	400	2.50	4.60	18.5	11.8
Au	185	2.06	4.02	5.9	5.5
Bi	80	100	4.45	2.75×10^{-5}	0.0276
Cr	630	13.2	3.01	—	6.3
Cu	310	1.55	4.33	8.5	7.0
Fe	355	8.6	6.51	—	4.4
K	99	6.1	6.73	1.3	1.9
Na	160	4.28	5.46	2.6	2.5
Ni	320	6.14	6.92	—	4.7
Pt	225	9.81	3.96	—	—
Ti	278	42	5.46	6	5.6
W	315	4.89	5.10	—	—

一、连续金属膜的导电性质

(1)连续金属膜导电性质的特点

虽然连续金属膜在微观结构上比不连续薄膜要致密得多，但是与用块状金属压制的薄金属箔片相比，因它含有各种微观缺陷导致其在导电性质上与金属箔片有较大的差异，从而形成了自己固有的一些特点如下：

- (a)薄膜电阻率 ρ_F 始终大于块金属箔电阻率 ρ_B 。
- (b)薄膜电阻率 ρ_F 与薄膜厚度 d 有密切关系，随膜厚的增大电阻率逐渐减小并趋于稳定值。

(2) 连续金属膜的形状效应

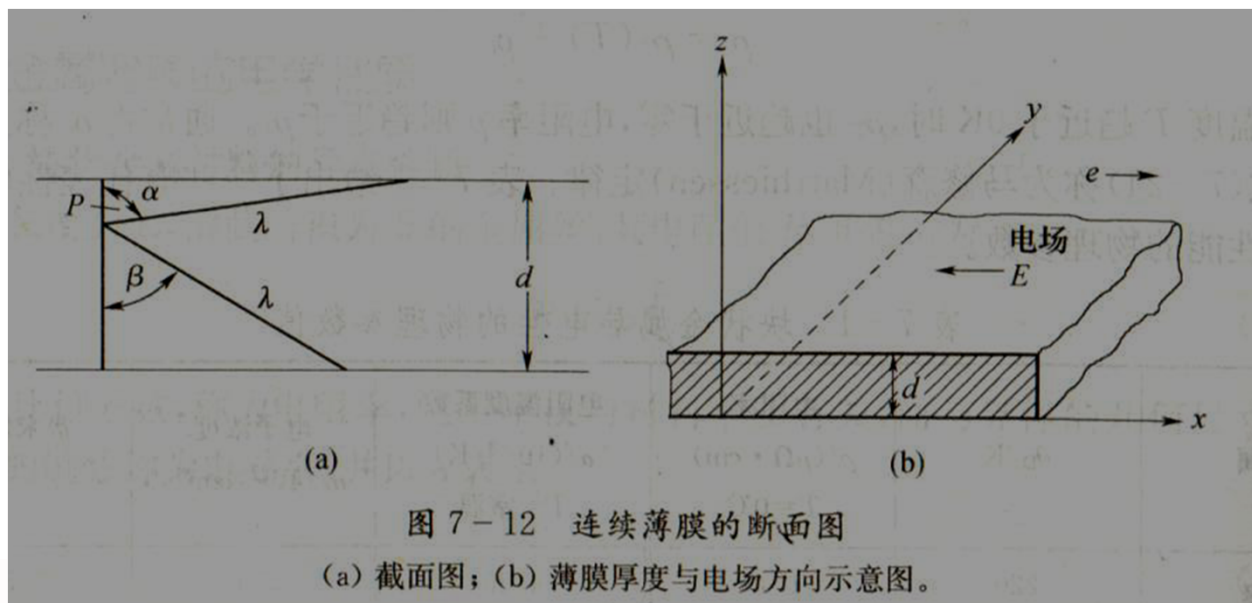
定义1：在连续金属膜中导电性质与薄膜厚度有关的现象称为形状效应。

这种效应说明当膜厚 d 的数值与导电电子平均自由程 λ 相近时，薄膜的上下表面对导电电子的运动施加了几何尺寸的限制。所以又有：

定义2：薄膜厚度对导电电子平均自由程的几何限制称为连续金属膜的形状效应。

研究形状效应的物理模型：

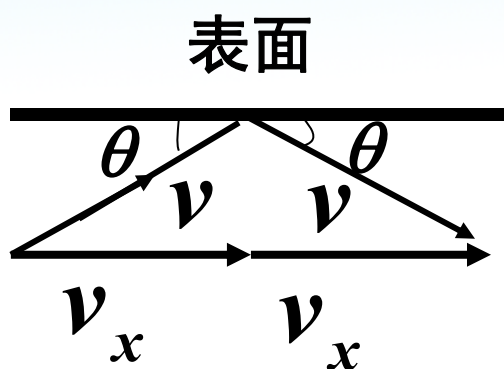
薄膜厚度 d 沿 z 轴方向，数值上与导电电子平均自由程 λ 相近($d \approx \lambda$)。长度沿 x 轴方向，宽度沿 y 轴方向。与厚度相比，将薄膜的长度和宽度可以看作近似于无限大。沿 $-x$ 方向施加电场 E ，在薄膜中导电电子将沿 x 方向运动。若这个电子的运动方向与 x 轴成一定角度 α 或 β ，它在 z 轴方向上就有一个速度分量 v_z 。故可能在 z 轴方向膜厚小于电子平均自由程 λ 处与薄膜表面相碰撞而改变运动方向，从而影响沿 x 轴方向的运动速度。当薄膜厚度越小时这种影响越大。



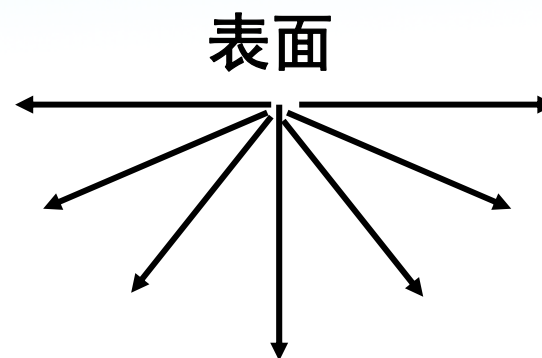
导电电子与薄膜表面相碰撞时可能产生两种反射：弹性反射（或镜面反射）和非弹性反射（或漫反射）。



电子在薄膜表面有两种反射 (镜反射, 漫反射)



镜反射



漫反射

若表面为原子线度的光滑表面则→镜反射→不影响电阻率
若表面不够光滑, 则→漫反射→ $\lambda \downarrow$ →电阻率 $\rho \uparrow$

①表面粗糙→漫反射→ $P=0$

②表面光滑→部分漫反射

③原子级表面光滑→全镜反射→ $P=1$

P 镜面反射系数

(3) 连续金属膜的电阻率 ρ_F

根据这种物理模型,求解导电电子分布函数的波耳兹曼方程、便可得到连续金属膜电阻率 ρ_F 与块状金属电阻率 ρ_B 及薄膜厚度 d 之间的函数关系。

- 1) 假设电子在薄膜表面完全漫反射(镜面反射系数 $P=0$)，即不考虑弹性散射的情况下：

$$\rho_F = \rho_B (1 + 3\lambda/8d)$$

讨论：当 $d=\lambda$ 时， ρ_F 比 ρ_B 增加约40 % ；

$d=10\lambda$ 时， ρ_F 增加约4 % 。

对于Au膜， $\lambda \approx 40\text{nm}$ ，因此对于较薄的膜，薄膜表面散射对薄膜电导的影响不可低估。



2) 对于有一部分电子在表面产生镜面反射的情况，前式应修正为：

$$\rho_F = \rho_B [1 + 3\lambda (1-P) / 8d]$$

式中P为镜面反射系数。

实际薄膜的 $P \neq 0$ (考虑弹性散射)，则漫反射所占比例为 $(1-P)$ 。由上式可知：对于同样的薄膜，改善表面光滑度，即提高P值，可使薄膜的电阻率减小（电导率变大）。

通过理论分析可得到如下结论：

- a) 薄膜电阻率大于块金属电阻率。
- b) 薄膜电阻率与膜厚 d 有关系。
- c) 对于同样的薄膜，改善表面光滑度，即提高 P (镜面反射系数)值，可使薄膜的电阻率减小（电导率变大）。

二、不连续金属膜的导电性质

不连续金属膜一般厚度低于5 nm，完全由孤立小岛形成的薄膜，其电阻率比连续薄膜时要高得多。

- (1) 电阻率 ρ_F 非常大；
- (2) 电阻与温度的关系和连续薄膜完全不一样，电阻率温度系数 α_F 为负值；
- (3) 在低外加电场时呈现欧姆性质导电，在高电场时呈现非欧姆性质导电；在高电场下有电子发射和光发射现象。
- (4) 导电电子激活能较大，随膜厚的减小激活能上升；

非连续金属薄膜的电阻温度系数是负的（忽略小岛间隔随温度的变化）。

原因：非连续薄膜的导电与电子发射有关，所以温度升高时，**发射电子数增多**，电导率增大，电阻率下降，故电阻温度系数为负。

随温度上升金属中电子的动能不断增大。当电子速度 v 在垂直于金属表面的分量 v_x 增大到其动能大于金属材料功函数时，电子便脱离金属表面发射到真空中去。

当考虑小岛间隔随温度的变化：**原因：**非连续薄膜的电阻温度系数不一定总是负值，而可能从负到正。

小 结

1、金属薄膜的电学性质

(1) 连续薄膜

- a) 薄膜电阻率大于块金属电阻率。
- b) 薄膜电阻率与膜厚 d 有关系。
- c) 对于同样的薄膜，改善表面光滑度，即提高 P (镜面反射系数)值，可使薄膜的电阻率减小（电导率变大）。

(2) 不连续薄膜

- (1) 电阻率 ρ_F 非常大；
- (2) 电阻与温度的关系和连续薄膜完全不一样，电阻率温度系数 α_F 为负值；
- (3) 在低外加电场时呈现欧姆性质导电，在高电场时呈现非欧姆性质导电；在高电场下有电子发射和光发射现象。
- (4) 导电电子激活能较大，随膜厚的减小激活能上升；



7.2.2 介质薄膜的电学性质

电介质概述

室温下金属导体、半导体、电介质的电阻率分别为：

$$\rho \left\{ \begin{array}{ll} 10^{-8} \sim 10^{-6} \quad (\Omega \cdot \text{m}) & \text{导体} \\ 10^{-5} \sim 10^6 \quad (\Omega \cdot \text{m}) & \text{半导体} \\ 10^8 \sim 10^{18} \quad (\Omega \cdot \text{m}) & \text{电介质} \end{array} \right.$$

电介质是绝缘体，无自由电荷，只存在束缚电荷。



介质薄膜的电学性质包括介质薄膜的

- 电导性质
- 介电性质
- 热释电性质
- 铁电性质

1、介质薄膜的电导性质

在测量介质薄膜的电导时，需在介质膜的两面制作电极，形成金属—介质—金属(MIM)结构，以便加上电压，在介质膜中形成电场。因此测得的电导实际上是这种夹层结构的电导。在直流电压下，夹层结构的电阻是两个界面电阻和介质膜电阻之和。因此只有在电极与介质的接触是欧姆接触时，测出的电导才是介质膜的电导。

注：欧姆接触是指金属与半导体的接触，而其接触面的电阻值远小于半导体本身的电阻。

(1) 介质薄膜电导的分类

1)按载流子的性质：可分为离子型电导和电子型电导。通常两种同时存在。

2)按载流子的来源分，离子电导和电子电导都有两种来源：一种是来源于介质薄膜本身的，称本征电导；另一种是由膜中的杂质和缺陷引起的电导，称为杂质电导或非本征电导。

在介质薄膜中通常是离子电导与电子电导同时存在。

在介质薄膜中，**介质薄膜中的直流电导比块状介质材料大得多(缺陷和杂质比较多)。**

- 1) 强场作用下，介质中的电导包括电子电导和离子电导；
电子电导来源：导带中的传导电子、隧道效应引起的电导、杂质能级电子电导以及介质薄膜与金属电极界面处的空间电荷等。
- 2) 弱场作用下，电导主要来源于**杂质能级**电子电导和离子电导（介质导带中几乎没有自由电子，杂质能级电导占主要）。



- ◆ 在低场强($E < 10^5 \text{ V / cm}$)下, 离子电导符合欧姆定律; 例如当介质膜用于电子元器件中作为隔离层或保护层使用时的情况。
- ◆ 而在高场强($E > 10^6 \text{ V / cm}$)下, 电导为非欧姆性的; 例如介质膜用作电容器中的工作介质时的情况。
- ◆ 在一般电场条件下, 介质薄膜的电导率 σ 随温度升高而增加。

2. 介质薄膜的介电性能

在外电场作用下，不导电的物体，即电介质，在紧靠带电体的一端会出现异号的过剩电荷，另一端则出现同号的过剩电荷，这种现象称为**电介质的极化**。

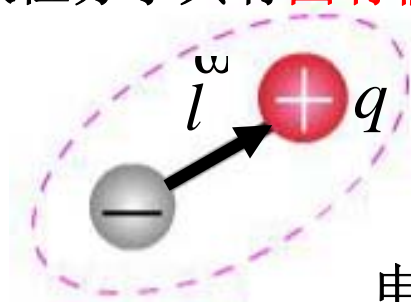
如果将某一均匀的电介质作为电容器的介质而置于其两极之间，则由于电介质的极化，将使电容器的电容量比真空为介质时的电容量增加若干倍。物体的这一性质称为介电性，其使电容量增加的倍数即为该物体的介电常数，用以表示物体介电性的大小。

2. 介质薄膜的介电性能

(1) 介质薄膜的极化：当垂直于介质薄膜加一电场，其表面就有感生束缚电荷出现。

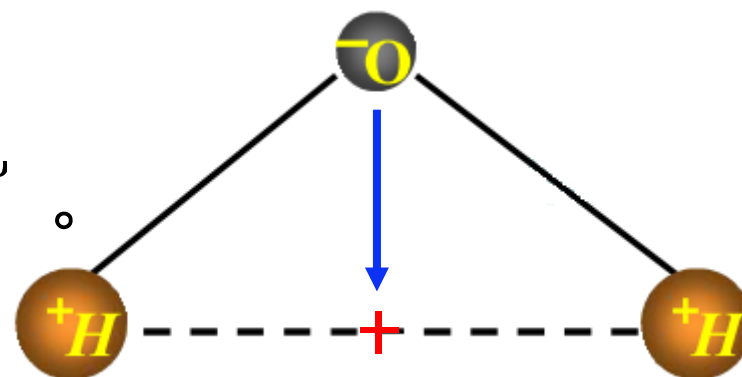
极性分子：分子的正负电荷重心不重合。

极性分子具有固有偶极矩，



电偶极矩： $\vec{\mu} = q\vec{l}$ 。

电偶极子



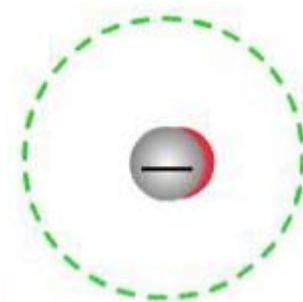
H₂O分子

例如，HCl、NH₃、CO、SO₂、H₂S、CH₃OH

非极性分子：分子的正负电荷重心重合。

非极性分子的偶极矩为零。

例如，CO₂、H₂、N₂、CH₄、He



- 感应宏观偶极矩的形成:

- **非极性介质** — 在电场作用下, 正负电荷在微观尺度作偏离平衡位置的相对位移, **正负电荷相对位移的方向相反**, 在相距一定距离之后, 产生感应偶极矩; 电介质整体来看, 就形成了感应宏观偶极矩。

- **极性介质** — 组成介质的分子具有极性或正负离子的中心不重合, 其本身就具有固有偶极矩; 在没有外电场时, **热运动使固有偶极矩混乱取向**, 偶极矩的矢量和为零; 有外电场时, **偶极子沿电场方向取向几率增加**, 偶极矩的矢量和不再为零, 电介质对外表现出感应宏观偶极矩。

电介质极化的类型： 电子位移极化、离子位移极化、偶极子转向极化、离子松弛极化、空间电荷极化、自发极化

1) 电子位移极化

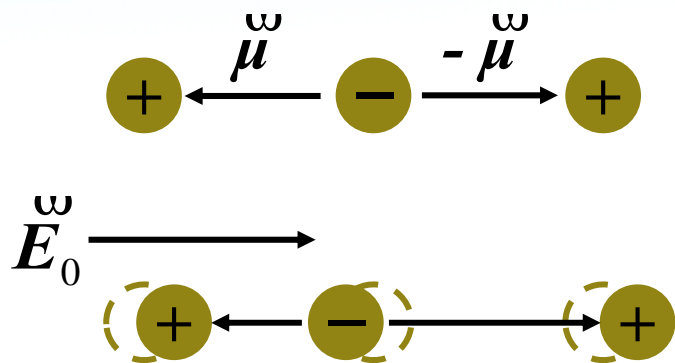
电介质中的原子、分子和离子等任何粒子，在电场的作用下，粒子中的**电子云**相对于**原子核**发生位移，而感生一个沿电场方向的感应偶极矩。



电子位移极化模型图

- 电子位移极化产生的感应偶极矩： $\vec{\mu}_e = \alpha_e \vec{E}_e$
- 电子位移极化率与温度无关：温度的高低不足以改变原子或离子的半径。
- 电子位移极化建立的时间很短，约在 $10^{-14} \sim 10^{-16}$ s范围；如果所加电场为交变电场，即使电场频率高达光频，电子位移极化也来得及响应。
- 电子位移极化存在于一切介质中。

2) 离子位移极化



偶极矩矢量和为零；

感应偶极矩： $\vec{\mu}_i = \alpha_i \vec{E}_e$

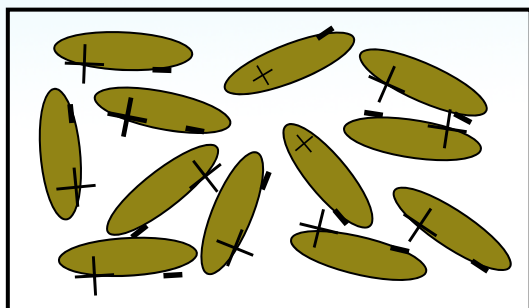
α_i 为离子位移极化率。

- 离子位移极化率随温度的升高而增大，但增加甚微；
- 离子位移极化对外场的响应时间也较短，约为 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s。

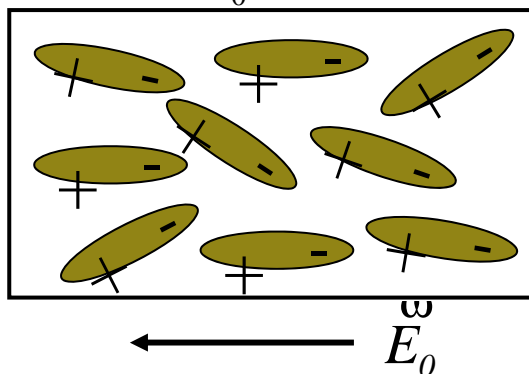


3) 偶极子转向极化

极性分子具有固有偶极矩 $\vec{\mu}_0$ ，可以把它们看成偶极子。



在没有外电场时，分子的热运动使偶极子作混乱排布，分子固有偶极矩在空间各个方向的取向几率相同，宏观偶极矩 $\sum \vec{\mu}_0$ 为零。



在电场作用下，极性分子沿电场方向取向几率大于其它方向，形成宏观偶极矩。

可以证明，偶极子转向极化率为： $\alpha_u = \frac{\mu_0^2}{3kT}$

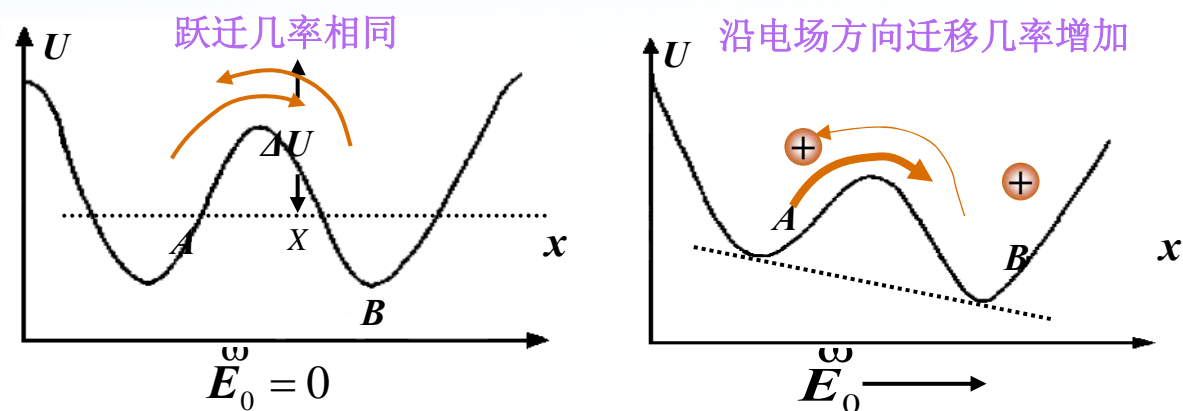
（偶极子转向极化率的数量级为 10^{-38} F.m^2 ）

- 偶极子转向极化率随温度的升高而下降：温度升高，热运动的抗取向作用加剧；
- 偶极子转向极化对外电场的响应时间较长，约为 $10^{-8} \sim 10^{-2} \text{ s}$ 。



4) 离子松弛极化

玻璃态物质、机构松散的离子晶体及晶体的杂质缺陷区域，离子本身能量较高，容易受热激活，越过势垒，在不同的平衡位置之间跃迁，称为**弱束缚离子**。

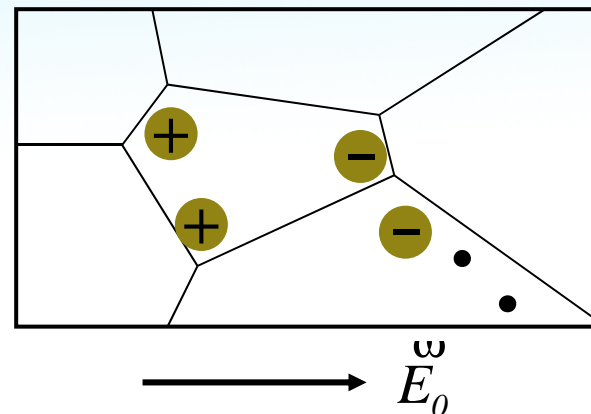
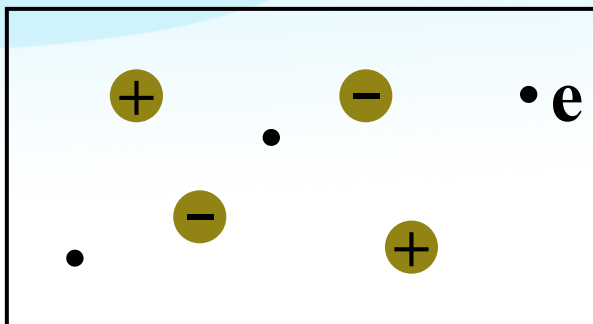


在电场作用下，沿电场方向产生过剩跃迁的离子，使电介质电荷分布不均，形成电偶极矩。

- 离子松弛极化率： $\alpha_t = \frac{q^2 X^2}{12kT}$ ，与温度成反比；
- 离子松弛极化**建立的时间较慢**，约为 10^{-2} s；
- 离子松弛极化是非可逆的过程，且离子跃迁的距离可与晶格常数相比拟。



5) 空间电荷极化



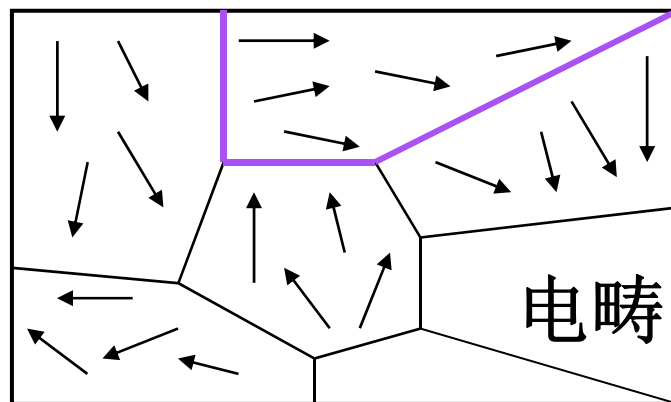
当介质中存在少量自由电荷载流子（正负离子和电子）时，在外电场作用下，载流子将移动，使介质有微小的漏导电流。

移动的载流子可能被阻止在晶界、相界等晶格缺陷处，形成空间电荷的局部积累，使介质中电荷分布不均，从而产生电偶极矩，发生极化。

- 空间电荷极化与介质的电导密切相关；
- 空间电荷极化建立的时间很长，在几分之一秒到几个小时范围内。

6) 自发式极化

- 某些晶体具有特殊的结构，其晶胞自身的正负电荷重心不重合，即晶胞具有极性。
- 由于晶体结构的周期性和重复性，当某一晶胞在某一方向出现偶极矩时，将逐级影响到相邻的晶胞，使它们的固有偶极矩朝向相同的方向。由于这种极化状态是在外电场为零时自发建立的，称为自发极化。



- 具有相同极化方向的自发极化区域，称为电畴。没有外电场时，电畴空间取向平均，介质不显极性；有外电场时，电畴沿电场方向转向，显示强烈的极化效应。
- 自发极化产生的介电常数非常高，且极化建立的时间很长。

2. 介质薄膜的介电性能

(2) 介质薄膜的介电常数

根据极化性质不同，按照介质薄膜的介电常数的大小可将介质薄膜分为两种类型：

非极性介质薄膜（介电常数2~45）和极性介质薄膜（3~100或者更高）。

介质薄膜的介电常数：本征介电常数和非本征介电常数。

本征介电常数：来源于薄膜本身的电子状态，固有偶极矩及晶格结构等。

非本征介电常数：来源于薄膜的不均匀性、杂质、空位等等。

本征介电常数决定于薄膜内部的各种极化机构。



2. 介质薄膜的介电性能

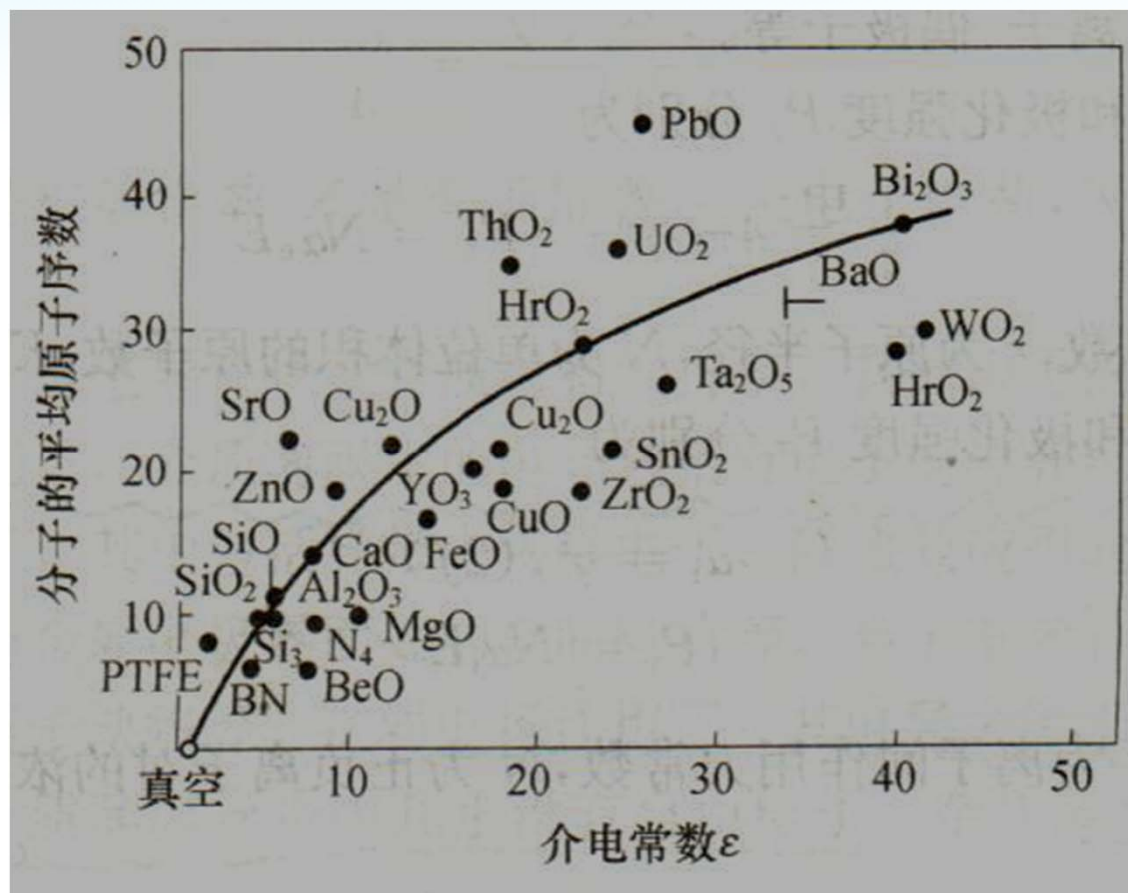


图7-15 介质薄膜中介电常数与平均原子序数的关系



2. 介质薄膜的介电性能

表 7-2 常用介质薄膜制备方法与介电常数的关系

介质薄膜	制造方法	介电常数	介质薄膜	制造方法	介电常数
BN	射频溅射	4.0	Ta ₂ O ₅	阳极氧化	45.0
AlN	反应蒸发	8.5	Ta ₂ O ₅	阳极氧化 Ta/N	27.0
Si ₃ N ₄	射频溅射	6.8	Bi ₂ O ₃	射频溅射	25.0
Al ₂ O ₃	阳极氧化	6.0	Bi ₂ O ₃	反应溅射	38.0
SiO ₂	气相生长	4.0	MnTiO ₃	反应溅射	20~120
TiO ₂	真空蒸发	100.0	BaTiO ₃	真空蒸发	130~820
ZrO ₂	反应溅射	20.0	PbTiO ₃	反应溅射	200~400

表7-2 常用介质薄膜制备方法与介电常数的关系

(3) 介质薄膜的交流损耗

介质薄膜在交变电场作用下，由于电导和极化，必然产生能量损耗。损耗值的大小与介质薄膜本身的晶体结构和各种缺陷有关。

介质薄膜的损耗包括两部分：

●电导损耗和极化损耗

电导损耗 漏导电流

- 任何介质都不是理想的绝缘体，在加上交变电场后，有漏导电流产生，电流做功并以热的形式散发出来。

直流或交流电场作用下都存在，直流电导损耗在低频下比较明显且不随频率变化。

●极化损耗

弛豫型损耗

与交变电场频率密切相关。

高频弛豫损耗时峰值频率在2 MHz以上。

低频弛豫损耗的峰值频率在100 Hz以下。

偶极子取向极化、离子松弛极化、空间电荷极化和自发极化

非弛豫型损耗

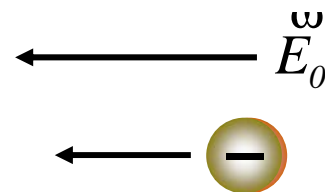
绝大多说介质膜在室温下就可以观测到非弛豫损耗。
这种损耗的特征是 $\tan \delta(\%)$ 几乎与频率无关。

电子位移极化和离子位移极化

介质损耗

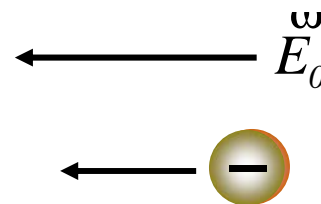
- 电子位移极化和离子位移极化建立的时间极短，可以与可见光的周期相比拟，在远低于光频的无线电频率范围，这两种极化可以看成是即时的，称为**瞬时极化**。

瞬时极化与交变电场完全同步，
其极化强度与电场间没有相位差。



偶极子取向极化、离子松弛极化、空间电荷极化和自发极化建立的时间较长，称为**缓慢极化**，也称弛豫极化。

缓慢极化需要经过一段时间才能达到
相应电场下的最大极化值；
缓慢极化强度与电场之间存在相位差。



- 随着交变电场频率的不同，介质的极化响应分3种情况：
 - 频率很低：各种极化的建立跟得上电场的变化，介质的极化响应同静电场情形；
 - 频率极高：弛豫极化完全来不及建立，不必考虑；瞬时极化仍同静电场情形；
 - 介于中间：出现极化损耗，介电常数随电场频率变化。

具有各类极化和电导的介质膜的介电常数和损耗角正切与频率关系为：

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2}$$
$$\tan \delta = \frac{\sigma + \varepsilon_0(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{\omega^2 \tau}{1 + (\omega\tau)^2}}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon}$$

式中， ε_{∞} 极高频率下的介质薄膜介电常数， ε_s 直流时介电常数， ε_0 真空介电常数， τ 介质薄膜的弛豫时间， ω 角频率。

- $\tan \delta$ 与频率的关系: $\tan \delta = \tan \delta_G + \tan \delta_p$

- 1) $\omega \rightarrow 0$: $\tan \delta_p \rightarrow 0$, 只有电导电流引起的损耗: $\tan \delta \approx \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_s} \Big|_{\omega \rightarrow 0} \rightarrow \infty$
- 2) 频率很低时: $\tan \delta_p$ 可忽略不计; 损耗主要由电导引起: $\tan \delta \approx \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_s} \propto \frac{1}{\omega}$
- 3) 随着频率的升高, 极化损耗开始起作用, 出现损耗峰值;
- 4) 频率极高时: $\tan \delta \approx \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{\epsilon_\infty \omega \tau} \propto \frac{1}{\omega}$

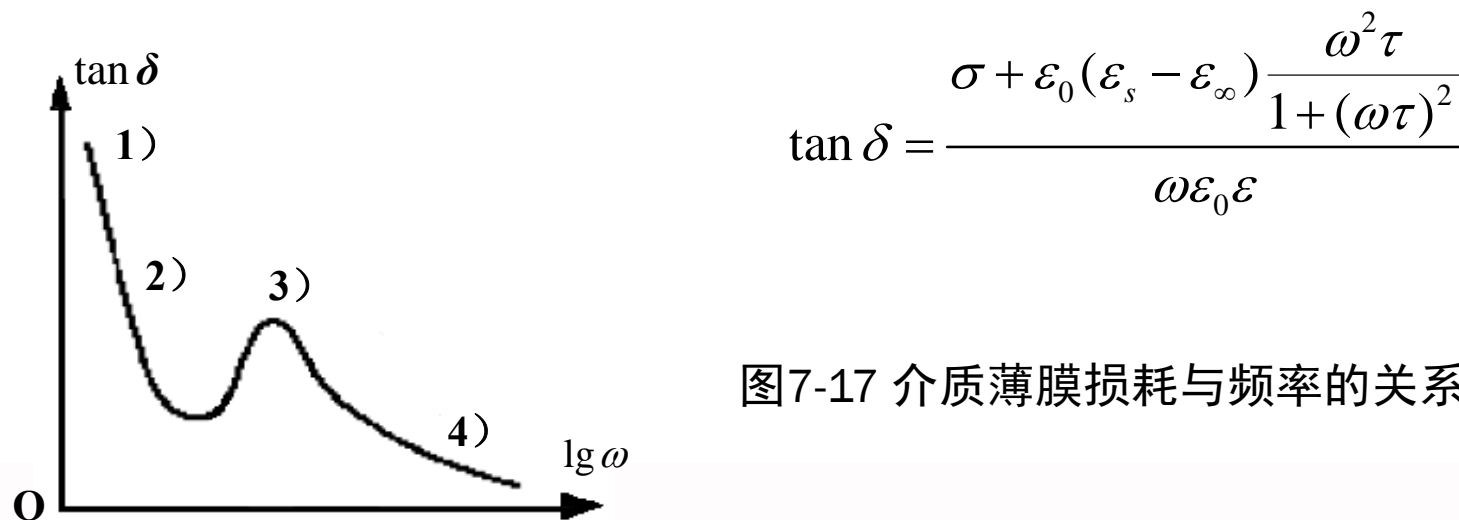


图7-17 介质薄膜损耗与频率的关系

3. 介质薄膜的压电性质

压电效应 { 正压电效应：应力作用使晶体表面产生电荷现象
逆压电效应：当晶体受到电场作用，晶体某个方向上发生应变现象

一些介质薄膜具有压电效应，如CdS、ZnS、AlN、ZnO、LiNbO₃、PZT等

薄膜。主要用于制造声表面波器件。

PZT 锆钛酸铅

压电薄膜在晶体结构上应为无对称中心，且为离子晶体组成的结构。

由正、负离子或正、负离子集团按一定比例组成的晶体称作离子晶体。离子晶体中正、负离子或离子集团在空间排列上具有交替相间的结构特征，离子间的相互作用以库仑静电作用为主导。



3. 介质薄膜的压电性质——压电薄膜的晶体结构 P212

表 7-4 典型压电薄膜的晶体结构

介质薄膜	基体	微晶晶型	[0001]方向的择优取向
ZnO	玻璃	六方晶	垂直膜面 倾斜膜面 平行膜面
CdS	云母、岩盐 云母、岩盐 玻璃 玻璃	六方晶 六方晶 六方晶 六方晶	—— 垂直膜面 垂直膜面 与膜面成 40°角
ZnS	玻璃	六方晶 六方晶	[111]方向垂直膜面 垂直膜面
AlN	玻璃	六方晶 六方晶	垂直膜面 平行膜面

表7-4 典型压电薄膜的晶体结构

压电性能参数：

1) 机电耦合系数 k ：用来描述机电能量转换过程，其定义为

或

$$k^2 = \frac{\text{通过正压电效应转换所得的电能}}{\text{输入总机械能}}$$
$$k^2 = \frac{\text{通过逆压电效应转换所得的机械能}}{\text{输入逆电能}}$$

2) 压电系数 d ：用来描述单位应力作用下产生的极化强度或单位电场作用下产生的应变。

正压电效应： $P = d\sigma$ σ 应力， P 极化强度， d 压电系数。

逆压电效应： $S = dE$ S 弹性应变， E 电场强度



3) 机械品质因数

机械品质因数描述压电材料在谐振时**机械性能损耗**的多少，用 Q_m 表示：

$$Q_m = 2\pi \frac{\text{谐振时压电振子储存的最大弹性能 } W_m}{\text{每个周期内损耗的机械能}}$$

4) 电学品质因数：通过压电材料的无功电流 I_e 和有功电流 I_R 之比或介质损耗正切值的倒数。

$$Q_e = \frac{I_e}{I_R} = \frac{1}{\tan \delta}$$

4. 介质薄膜的热电性质

热释电效应：具有自发极化的晶体因温度变化而引起自发极化强度发生而在晶体两端表面产生异号束缚电荷的现象。晶体材料的这种性能称为热释电性。

电生热效应：当给热释电晶体施加外电场，电场的改变会引起晶体温度变化的现象。

热释电系数：反映由于温度变化而引起电介质的极化强度变化的响应关系的比例系数。

某些晶体具有特殊的结构，其晶胞自身的正负电荷重心不重合，即晶胞具有极性。当热辐射照射到热释电晶体上时，晶体的自发极化强度 P_s 随温度 T 的变化 dP_s/dT 将引起晶体表面电荷密度的变化。在负载电阻 R_s 上产生电压信号。由于晶体结构的周期性和重复性，当某一晶胞在某一方出现偶极矩时，将逐级影响到相邻的晶胞，使它们的固有偶极矩朝向相同的方向。由于这种极化状态是在外

电场为零时自发建立的，称为自发极化。式中 S 是电极有效面积， R_s 是负载电阻， dP_s/dT 是热释电系数 ($C/cm^2 \cdot K$)， dT/dt 是温度变化速率。在回路中产生的热平衡电流即为

$$i_p = \frac{V_p}{R_s} = S \cdot \frac{dP_s}{dT} \cdot \frac{W}{L \cdot \rho \cdot j \cdot C_p}$$

式中， L 是晶体厚度， W 是热辐射功率， ρ 是晶体密度， j 是热功当量， C_p 是晶体比热。

热释电薄膜

铌

热释电材料中块体材料有单晶材料（ LiTaO_3 , LiNbO_3 等）、陶瓷材料（ PbTiO_3 , PZT, PLZT, BST等）和有机高分子材料（聚偏二氟乙烯PVDF）。其中 PbTiO_3 系和（ $\text{Ba}^{\text{锶}}\text{Sr}$ ） TiO_3 等材料制备的热释电薄膜最多。

PZT 锆钛酸铅

PLZT 锆钛酸铅镧陶瓷

BST 钛酸锶钡

热释电薄膜性质：

1、热容量要小；2、热释电系数要大，即要求由于温度引起的表面电荷变化量要大；3、介电常数要小，以提高输出电压值；4、材料的热扩散系数小。



7.2.2 介质薄膜的电学性质

表 7-5 热释电材料的物理性质

材料种类 \ 性质	居里温度 T_c / $^{\circ}\text{C}$	介电常数 ϵ	热释电系数 $p \times 10^{-8}$ /($\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}$)	热扩散系数 1×10^{-13} /(cm^2/s)	测量温度 / $^{\circ}\text{C}$
硫酸三甘肽(TGS)	49	50	3.5	2.6	25
掺丙氨酸的硫酸三甘肽(LATGS)	49.5	35	7.0	—	25
氟化硫酸三甘肽(DTGS)	62	20	2.7	~ 2.6	25
氟铍酸三甘肽(TGFB)	73.8	15	2.1	2.0	30
氟化氟铍酸三甘肽(DTGFB)	74.5	12	2.5	2.9 \sim 1.7	25
铌酸锶钡($\text{Sr}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{Nb}_2\text{O}_5$)	105	380	6.5	—	25
锆酸铅($\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$)	178	40	1.1	8	25
钛酸铅(PbTiO_3)	470	200	6	9.9	25
锆钛酸铅($\text{PbTi}_{0.07}\text{Zr}_{0.93}\text{O}_3$)	~ 240	300	2.6	—	25
钽酸锂(LiTaO_3)	618	43	1.7	13	25
聚二氟乙烯(PVF ₂)	120	11	0.3	0.53	25
钽酸铅($\text{PbSr}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$)	-10	1800	24	—	25
钛酸锶钡($\text{Ba}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{TiO}_3$)	21	5000	35	—	25

表7-5 热释电材料的物理性质

5. 介质薄膜的铁电性质

铁电性：晶体在一定温度范围内具有自发极化且自发极化方向可以随外加电场翻转而反向180度的性质。具有铁电性的晶体称为铁电体。

注：铁电体中不一定含铁。

铁电体：具有铁电性的晶体。

居里温度 T_c 是铁电相与顺电相的相转变温度，

当 $T > T_c$ 时，铁电现象消失，处于顺电相。

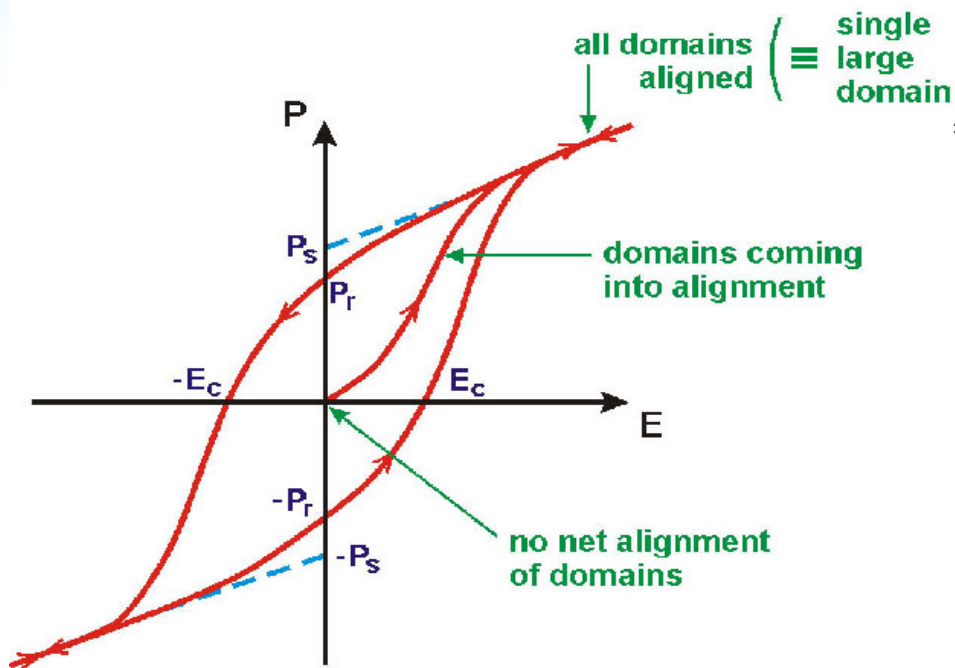
当 $T < T_c$ 时，铁电体处于铁电相，当 $T = T_c$ 时发生相变。

铁电相是极化有序状态，顺电相是极化无序状态， T_c 称居里点。



7.2.2 介质薄膜的电学性质

Ferroelectric hysteresis diagram



P_s - spontaneous polarisation
 P_r - remanent polarisation
 E_c - coercive field

(defined as +ve)

* 电滞曲线是极化强度 P 滞后于电场强度 E 的曲线。

* 即当施加电场 E ，极化强度 P 随 E 增加沿曲线上升，至某点后 P 随 E 的变化呈线性。 E 下降时， P 不随原曲线下降。当 E 为0时，极化强度不为0。为 P_r ，称剩余极化强度。只有加上反电场 E_c 时 P 为0。 E_c 为矫顽电场强度。

* P_s 为饱和极化强度



5. 介质薄膜的铁电性质

铁电体

- (1) 具有
- (2) 有电
- (3) 铁电

铁电体
判定晶

铁电体
必然具



相与铁
质、热
象。

存在是

个亚族，



表7-6 典型铁电材料的性能

表 7-6 典型铁电材料的性能

材 料	$T_c/^\circ\text{C}$	$P_s(\mu\text{C}/\text{cm}^2)$ [$T(^{\circ}\text{C})$]	材 料	$T_c/^\circ\text{C}$	$P_s(\mu\text{C}/\text{cm}^2)$ [$T(^{\circ}\text{C})$]
KH_2PO_4	-150	4.8(-177)	PbTiO_3	490	>50(23)
硫酸甘氨酸	49	2.8(20)	KNbO_3	435	30(250)
SbSI	≈ 20	25(0)	LiNbO_3	1210	71(23)
BaTiO_3	135	26(23)	LiTaO_3	665	23(450)

* P_s 为饱和极化强度



6. 介质薄膜的击穿

表 7-7 介质薄膜的击穿场强(10^6 V/cm)

介质薄膜	制造方法	击穿场强	介质薄膜	制造方法	击穿场强
Si_3N_4	射频溅射	1	ZrO_2	阳极氧化	4
Al_2O_3	阳极氧化	6~8	ZrO_2	反应溅射	4
Al_2O_3	射频溅射	1	Ta_2O_5	阳极氧化	6
SiO_2	真空蒸发	2	Ta_2O_5	反应溅射	1
SiO_2	反应溅射	1.5	Bi_2O_3	反应溅射	0.7
SiO_2	热生长	10	BaTiO_3	内光蒸发	0.35
TiO_2	阳极氧化	1	PbTiO_3	反应溅射	2.3

表7-7 介质薄膜的击穿场强。

同一种介质薄膜，因制造方法不同其击穿场强有较大差异。产生差异原因：不同制备方法在介质薄膜中产生的针孔、微裂纹、纤维丝和杂物等微结构不同。

击穿机理分类:

本征击穿: 当外电场超过**介质薄膜本身绝缘强度**而产生的击穿;

非本征击穿: 因薄膜**缺陷**引起的击穿。

本征击穿起因: **电击穿和热击穿共同作用。**

电击穿: 介质薄膜中载流子 (大部分为电子) 在某临界电场 E_c 作用下产生电子倍增过程中使介质薄膜绝缘性急剧下降而形成的电子雪崩击穿, 极短时间内发生。

热击穿: 电子从电场中得到的能量主要用于碰撞电离过程。在电击穿时电流雪崩式增加, 产生大量焦耳热, 介质薄膜温度迅速上升就转为热击穿。介质薄膜电导随温度上升呈指数规律急剧增大, 随后电流又增大, 焦耳热增大, 介质薄膜温度进一步增高。在很短时间内由于介质薄膜温度高, 造成局部地方产生热分解、挥发或熔化, 则进一步促成热击穿的产生。



小 结

* 介质薄膜的电学性质

(1) 介质薄膜的电导性质

- 在介质薄膜中，缺陷和杂质比较多，介质薄膜中的直流电导比块状介质材料大得多。
- * 强场作用下，介质中的电导包括电子电导和离子电导：**导带中**的传导电子、隧道效应引起的电导；**杂质能级**电子电导以及介质薄膜与金属电极界面处的空间电荷等
- 弱场作用下，电导主要来源于杂质能级电子电导和离子电导（介质导带中几乎没有自由电子，杂质能级电导占主要）。

小 结

(2) 介质薄膜的介电性质

1) 介质薄膜的极化

在外电场作用下，不导电的物体，即电介质，在紧靠带电体的一端会出现异号的过剩电荷，另一端则出现同号的过剩电荷，这种现象称为**电介质的极化**。

在介质材料中参与极化的机构主要：

电子位移极化和离子位移极化

偶极子取向极化、离子松弛极化、空间电荷极化和自发极化



小 结

2) 介质薄膜的交流损耗

介质薄膜在交变电场作用下，由于电导和极化，必然产生能量损耗。损耗值的大小与介质薄膜本身的晶体结构和各种缺陷有关。介质薄膜的损耗是表征介质薄膜质量和性能的重要参数。用损耗角的正切值表示。

电导损耗 漏导电流

非弛豫型损耗

电子位移极化和离子位移极化

极化损耗

弛豫型损耗：

偶极子取向极化、离子松弛极化、空间电荷极化和自发极化

小 结

- 随着交变电场频率的不同，介质的极化响应分3种情况：

➤ **频率很低**：各种极化的建立跟得上电场的变化，介质的极化响应同静电场情形；损耗主要由电导引起。

➤ **频率极高**：弛豫极化完全来不及建立，不必考虑；瞬时极化仍同静电场情形；损耗主要由电导引起。

➤ **介于中间**：**出现极化损耗**，介电常数随电场频率变化。

$$\tan \delta = \frac{\sigma + \varepsilon_0 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{\omega^2 \tau}{1 + (\omega \tau)^2}}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon} \quad \begin{array}{l} \text{损耗:} \\ \text{电导+极化} \end{array} = \tan \delta_G + \tan \delta_P$$



小 结

3. 介质薄膜的压电性质

一些介质薄膜具有压电效应，如CdS、ZnS、AlN、ZnO、LiNbO₃、PZT等薄膜。主要用于制造声表面波器件。

压电效应

正压电效应：应力作用使晶体表面产生电荷现象

逆压电效应：当晶体受到电场作用，晶体的某个方向上发生应变的现象

4. 介质薄膜的热电性质

热释电效应：具有自发极化的晶体因温度变化而引起自发极化强度发生变化而在晶体两端表面产生异号束缚电荷的现象。晶体材料的这种性能称为热释电性。

电生热效应：当给热释电晶体施加外电场，电场的改变会引起晶体温度的变化。

小 结

5. 介质薄膜的铁电性质

铁电体：晶体在一定温度范围内具有自发极化且自发极化方向可以随外加电场翻转而反向180度的性质。具有铁电性的晶体称为铁电体。

铁电体的三个重要特征：

- (1) 具有电滞回线；
- (2) 存在一个临界温度（居里温度 T_c ），它是顺电相与铁电相的转变温度；
- (3) 铁电晶体具有临界特征，它的介电性质、弹性性质、热学性质和光学性质等在临界温度附近出现反常现象。

6. 介质薄膜的击穿

击穿：当施加到介质薄膜上的电场强度达到某一数值时，介质薄膜便立刻失去绝缘性能，这种现象称为击穿。

本征击穿：当外电场超过介质薄膜本身绝缘强度而产生的击穿；

非本征击穿：因薄膜缺陷引起的击穿。

7.2.3 半导体薄膜的电学性质

半导体：电阻率介于导体和绝缘体之间的一类物质，电阻率一般为 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot cm$ 。

半导体对杂质和缺陷非常敏感。由于杂质和缺陷会在禁带中引入能级，将会对半导体的物理和化学性质产生较大影响。因此，在光、电、热、磁等外场作用下半导体的电学性质会发生很大变化。

(1) 半导体电导率与光电导

电导率：电阻率的倒数，单位西门子/米，记为S/m。

迁移率 μ 反映半导体中载流子导电能力，它表示单位场强下电子的平均漂移速度。半导体的电导率和迁移率之间的关系：

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

式中， n ， p 分别代表电子和空穴的浓度， μ_n 和 μ_p 分别代表电子和空穴的迁移率， q 为电子电量。

(1) 半导体电导率与光电导

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

- 1) 同样掺杂浓度，载流子迁移率越大，材料电导率越大；
- 2) 不同半导体中，电子和空穴两种载流子的迁移率不同；
- 3) 同种材料，载流子的迁移率受到掺杂物质种类和浓度的影响，掺杂不同，迁移率的大小也不同。
- 4) 载流子的迁移率也随温度而变。
掺杂半导体的载流子浓度在器件的使用温度范围内基本不变，电导率随温度的变化主要来自迁移率。

光电导：由光照引起半导体电导率增加的现象，即光照使半导体中形成非平衡附加载流子，而且载流子浓度的增大必然使材料电导率增大。

无光照时，半导体材料的电导率（也称暗电导率）为：

$$\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \text{ 式中, } n_0 \text{ 和 } p_0 \text{ 为平衡载流子浓度。}$$

有光照时，半导体电导率为

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

式中， $n = n_0 + \Delta n$, $p = p_0 + \Delta p$ ，其中 Δn 和 Δp 分别为光注入的附加载流子浓度。

于是附加光电导（简称**光电导**）为

$$\Delta\sigma = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p)$$

可得出本征光电导的相对值为

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = \frac{(1+a)\Delta n}{an_0 + p_0}, \quad \text{式中 } a = \mu_n / \mu_p$$

$$\{\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p)\}$$

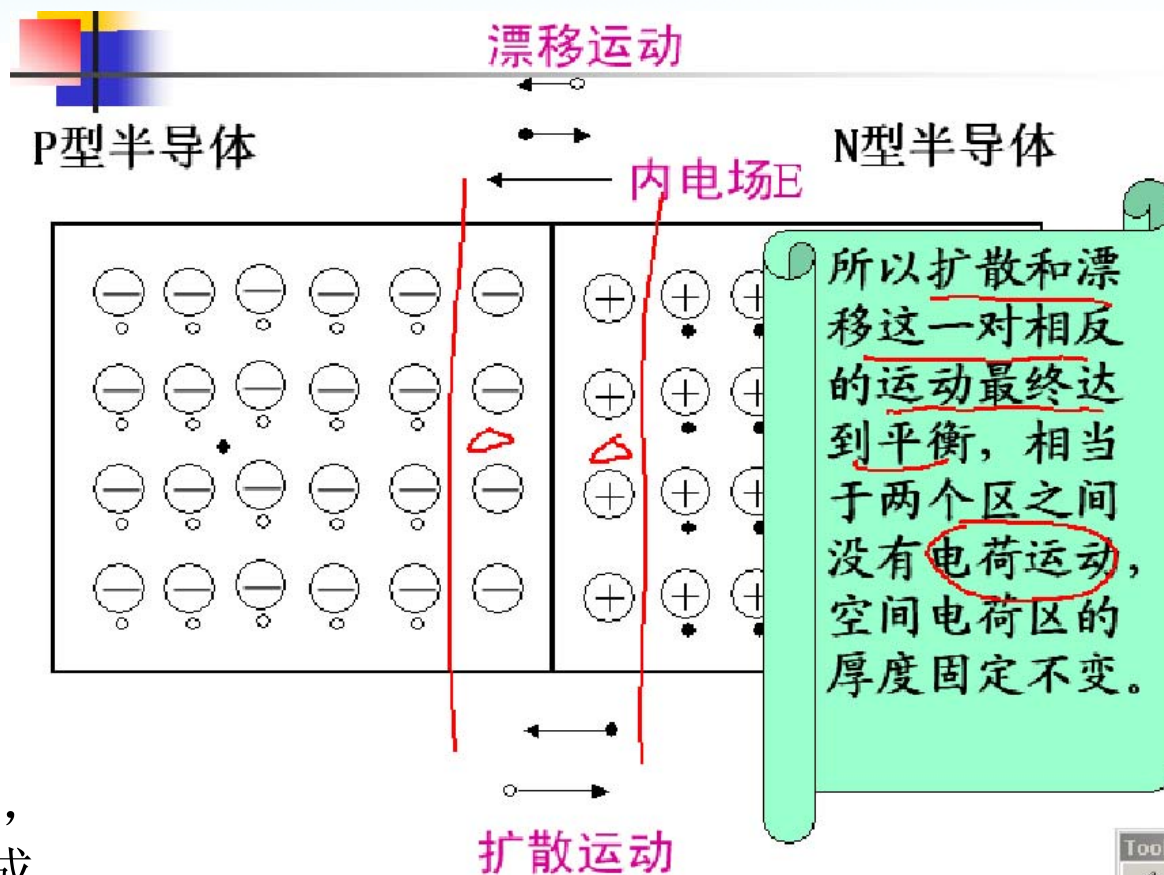
可见：若要制成高灵敏的光敏电阻，应使 n_0 和 p_0 较小。因此，光敏电阻一般由高阻材料制成。

(2) 光生伏特效应

PN结：采用不同的掺杂工艺，通过扩散作用，将P型半导体与N型半导体制作在同一块半导体基片上。

一部分掺有**受主杂质**是P型半导体，另一部分掺有**施主杂质**是N型半导体时，P型半导体和N型半导体的交界面附近的过渡区称为PN结。

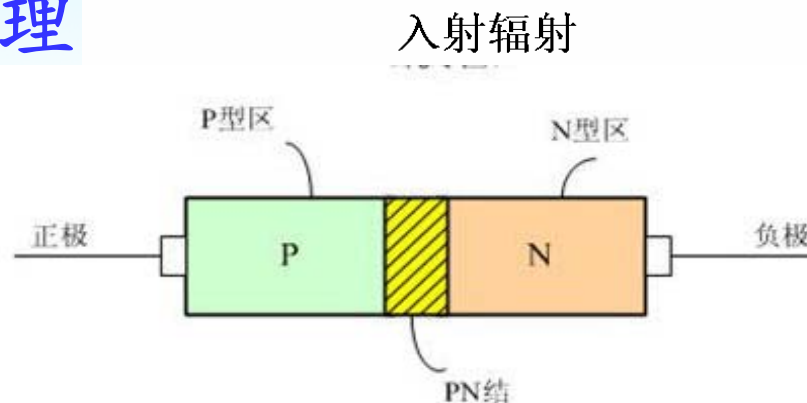
由于杂质的激活能量 ΔE 很小，在室温下杂质差不多都电离成受主离子 NA^- 和施主离子 ND^+ 。



N区的电子为多子，在P区的空穴为多子

光伏器件的基本工作原理

p-n结光电效应



当光照射p-n结，只要入射光子能量大于材料禁带宽度，就会在结区激发电子-空穴对。这些非平衡载流子在内建电场的作用下，空穴顺着电场运动，电子逆着电场运动，在开路状态，最后在n区边界积累光生电子，在p区边界积累光生空穴，产生一个与内建电场方向相反的光生电场，即在p区和n区之间产生了光生电压 U_{oc} ，这就是p-n结的光生伏特效应。只要光照不停止，这个光生电压将永远存在。

(2) 光生伏特效应

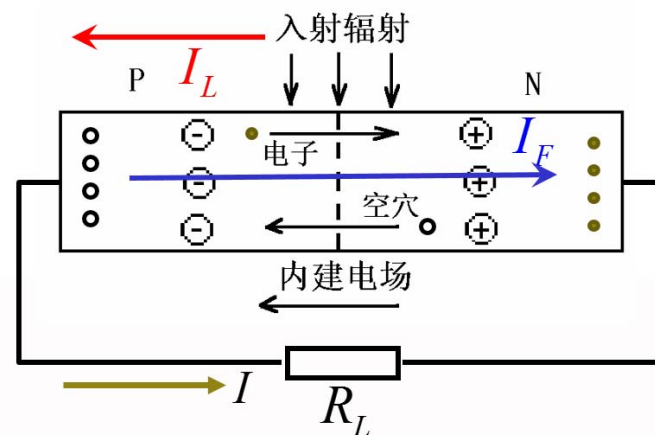
光生电压：当用适当波长的光照射非均匀半导体（如PN结）时，半导体内部会产生电动势。如将PN结短路，则在外电路中会出现电流，称为光生电流。这种效应称为**光生伏特效应**。-----光电池的理论基础。

光电池工作的三种电流：光生电流 I_L ，在光生电压V作用下的PN结正向电流 I_F ，流经外电路的电流 I ， I_L 和 I_F 都流经PN结内部，但方向相反。

根据PN结整流方程，在正向偏压V作用下，通过结的正向电流为：

$$I_F = I_S (e^{qV/kT} - 1)$$

式中，V是光生电压， I_S 是反向饱和电流，k是波尔兹曼常数，T是热力学温度。



由前面讨论可得 $I = I_L - I_F = I_L - I_S (e^{qV/kT} - 1)$

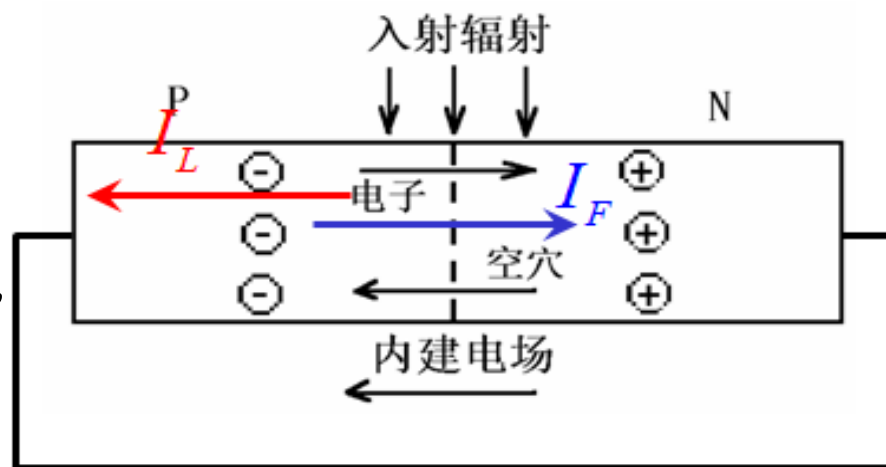
$$V = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_S} + 1\right)$$

在PN结开路情况 ($R = \infty$)，开路电压 V_{oc} 。这时流经R的电流 $I=0$ ，即 $I_L = I_F$ 。可得开路电压

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_S} + 1\right)$$

如果将PN结短路 ($V=0$)，则 $I_F = 0$ ，这时可得短路电流 I_{sc} 。

短路电流应等于光生^{sc}电流，即 $I_{sc} = I_L$ 。



V_{oc} 和 I_{sc} 是光电池的两个重要参数，其值可由图7-20曲线2在V和I轴上的截距求得。

(3) 半导体薄膜电学特性的测量

常用的测量方法有电阻测量方法、电容测量方法、电压测量法以及其他分析方法。

1. 电阻测量方法-----四探针法 P217
2. 电容-电压法

小 结

* 3. 半导体薄膜的电学性质

(1) 半导体的电导率和光电导

迁移率：反映半导体中载流子导电能力，它表示单位场强下电子的平均漂移速度。半导体的电导率和迁移率之间的关系：

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

光电导：由光照引起半导体电导率增加的现象，即光照使半导体中形成非平衡附加载流子，而且载流子浓度的增大必然使样品电导率增大。

小 结

* 3. 半导体薄膜的电学性质

光生电压：当用适当波长的光照射非均匀半导体（如PN结）时，半导体内部会产生电动势。如将PN结短路，则在外电路中会出现电流，称为光生电流。这种效应称为**光生伏特效应**。-----光电池的理论基础。

光电池工作的三种电流：光生电流 I_L ，在光生电压V作用下的PN结正向电流 I_F ，流经外电路的电流 I_o ， I_L 和 I_F 都流经PN结内部，但方向相反。

在PN结开路情况（ $R = \infty$ ），开路电压 V_{oc} 。这时流经R的电流 $I=0$ ，即 $I_L = I_F$ 。可得开路电压

如果将PN结短路（ $V=0$ ），则 $I_F = 0$ ，这时可得短路电流 I_{sc} 。短路电流应等于光生电流，即 $I_{sc} = I_L$ 。

(4) 薄膜的超导电性

1911年，荷兰莱顿大学的卡末林-昂内斯意外地发现，将汞冷却到-268.98℃时，汞的电阻突然消失；后来他又发现许多金属和合金都具有与上述汞相类似的低温下失去电阻的特性，由于它的特殊导电性能，卡末林—昂内斯称之为超导态。卡末林由于他的这一发现获得了1913年诺贝尔奖。

一、超导电性

导体的电阻主要是由电子与晶格的碰撞而引起的。当温度降低使晶格热振动减小时，电阻也就减小。但由于晶格缺陷等原因，即使在绝对零度，导体也会有剩余电阻。

已经发现不少金属或合金等在液氦温度范围，会出现电阻为0的现象，称为超导现象。

在金属晶体中的散射机构有晶格散射、电离杂质散射、中性杂质散射、位错散射、载流子散射和晶粒间界散射。

(4) 薄膜的超导电性

- 把处于超导状态的导体称之为“超导体”。
- 超导体的直流电阻率在一定的低温下突然消失，被称作零电阻效应。
- 导体没有了电阻，电流流经超导体时就不发生热损耗，电流可以毫无阻力地在导线中形成强大的电流，从而产生超强磁场。

超导性质：指某些物质在一定温度条件下（一般为较低温度）电阻降为零的性质。

临界温度：从通常的导电状态转变为超导状态的温度为材料的临界温度或转变温度，用 T_c 表示。每一种超导体都有一个特定的临界温度。

从1911年至1986年，超导温度由水银的4.2K提高到23.22K。

1986年1月发现钡镧铜氧化物超导温度是30K，12月30日，又将这一纪录刷新为40.2K；1987年1月升至43K，不久又升至46K和53K，2月15日发现了98K超导体。目前，最高的超导临界转变温度为156K。

高温超导体取得了巨大突破，使超导技术走向大规模应用。

表 7-8 某些超导物质的 T_c 和 H_c 值

元素	T_c/K	H_c/Oe	合金或化合物	T_c/K	H_c/Oc^{**}
Al	1.19	98.8	V_3Ga	14.8	25×10^4
In	3.41	285	V_3Si	16.9	24×10^4
La(β)	5.9	1000	Nb_3Sn	18.3	28×10^4
Nb	9.2	2,000*, 3,000**	Nb_3Ga	20.2	34×10^4
Pb	7.18	800	Nb_3Ge	22.5	38×10^4
Re	1.70	200	$PbMo_3S_6$	14.4	60×10^4
Sn	3.72	308	NbN	15.7	15×10^4
Ta	4.48	825	$YBa_2Co_3O_7$	93	—
Tc	8.22	—	$BiSrCaBCuO$	107	—
Th	1.37	161	$TlBaCaCuO$	120	—
Tl	2.39	170			
V	5.13	1290*, 7000**			

* H_{c1} , ** H_{c2}

图7-8 某些超导材料的 T_c 和 H_c 值



某些超导材料（如In和Al等软超导材料）的临界温度随其薄膜厚度 d 的减小而增高，如图7-26。现已发现**超导体薄膜的临界温度 T_{cf} 比同种材料的块状的超导体的临界温度 T_c 高得多。**

如金属Al， $T_c=1.2\text{K}$ ；薄膜 $T_{cf}=4.2\text{K}$ 。

Bi，在块状下不呈现超导状态，但在薄膜状态下 $T_{cf}=15\text{K}$ 。

表 7-9 某些金属薄膜的超导特性

材 料	T_d/T_c	$D/\mu\text{m}$	TK	沉积方法
Al	2.6	100	370~400	V
Mo	5	10~400	375	CS,EB
W	400	10~400	315	CS,EB
Sn	1.26	50	110~210	Y
In	1.22		100~150	V
Be	800		925	V
Bi	600		111	V

材料的超导态可由**磁场破坏**，这个磁场有一定的界限值，使超导材料的超导态破坏而转变到正常态所需的磁场强度，称为临界磁场，以 H_c 表示。

临界磁场与温度有关，用 $H_c(T)$ 表示。材料临界温度 T_c 时， $H_c(T) = 0$ 。

超导元素的 H_c 与温度之间的关系为

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad \text{式中，} H_0 \text{ 是 } T=0 \text{ K 时的磁场临界值。}$$

超导体的磁学性质如图7-25所示。把超导体置于磁场中，

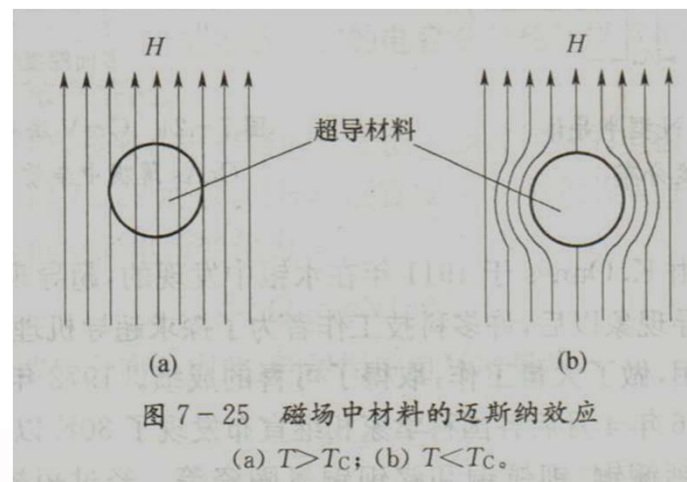
温度 $T > T_c$ 时，超导材料处于常导状态，磁通（a）图；

温度 $T < T_c$ 时，成为超导状态，磁通（b）图，

几乎完全排斥在材料外。

这一现象称为“**迈斯纳效应**”。

迈斯纳效应有着重要的意义，它可以用来判别物质是否具有超导性。





薄膜厚度与临界磁场强度 H_{cf} 关系:

在磁场方向与薄膜表面平行的情况下, H_{cf} 随膜后 d 的增加而下降。

当 $d \ll \lambda_L$ (薄膜很薄),

$$H_{cf} = 2\sqrt{6H_c} \frac{\lambda_L}{d}$$

当 $d \gg \lambda_L$ (薄膜较厚),

$$H_{cf} = H_c \left(1 + \frac{\lambda_L}{d}\right)$$

当磁场方向垂直膜表面时,

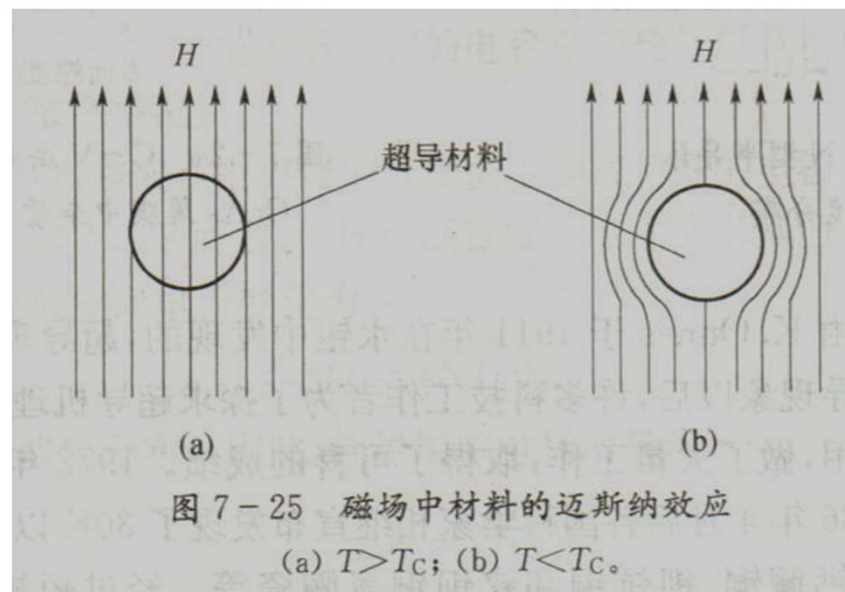
$$H_{cf} = \sqrt{2x}H_c$$

式中 $x = \frac{\sqrt{2}qH_c\lambda_L^2}{hc}$, q 电子电量, h 普朗克常量, c 光速

实际上，磁通并不是完全被排除到超导体之外。研究表明，磁通可以进入超导体表层的一定深度，即穿透深度 λ_s 。超导电性的轮廓理论给出 λ_s 的表达式：

$$\lambda_s(T) = \frac{\lambda_s(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4}}$$

式中， $\lambda_s(0)$ 为 $T=0\text{K}$ 时的穿透深度，一般为 $50\text{--}100\text{ nm}$ 。



磁通穿透深度 λ_L 约为 10^{-6} cm 。因此，超导体在膜状态下可不表现出迈斯纳效应，当薄膜厚度 d 比 λ_L 小时，磁通几乎均匀地通过薄膜。

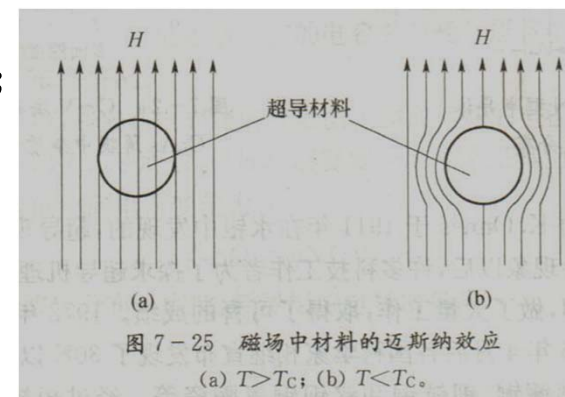
小 结

薄膜的超导电性

超导是指某些物质在一定温度条件下（一般为较低温度）电阻降为零的性质。

温度 $T > T_c$ 时，超导材料处于常导状态，磁通（a）图；
温度 $T < T_c$ 时成为超导状态，磁通（b）图，
完全排斥在材料外。这一现象称为“迈斯纳效应”。

$T=0K$ 时的穿透深度，一般为50-100 nm。



薄膜与块体材料差异

1. 由于不能忽视薄膜状态的表面能的影响，超导薄膜的临界磁场 H_{cf} 与块状超导体的 H_{c0} 不同。
2. 超导体薄膜的临界温度 T_{cf} 比同种材料的块状的超导体的临界温度 T_c 高得多
3. 超导体在膜状态下可不表现出迈斯纳效应，当薄膜厚度 d 比 λ_L 小时，磁通几乎均匀地通过薄膜。