

电子材料工学复习提纲

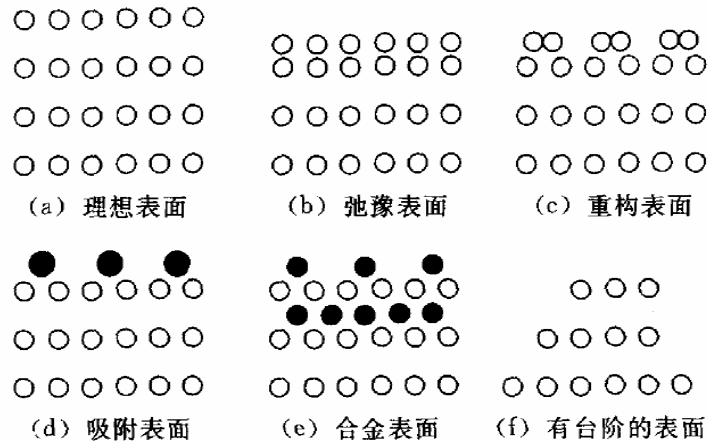
1. 电子材料、功能材料、结构材料的基本含义。

电子材料：电子工业所使用的具有功能特性、结构特性以及物理、化学性能等特定要求的材料。广泛应用于国民经济和国防建设两大领域。

功能材料：具有优良的电学、磁学、光学、声学、力学、化学和生物等功能及其相互转化的功能，被用于非结构目的之高技术材料。

结构材料：用于制造机械动力或结构件的材料。以材料的强度、刚度、韧性等力学性能为基础。

2. 电子材料表面与界面类型，以及电子材料对环境的要求。



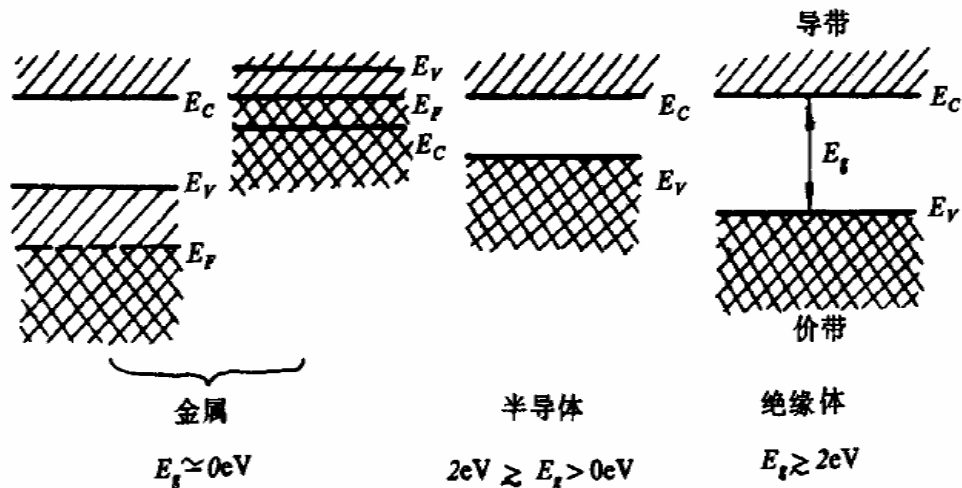
表面：理想、弛豫、重构、吸附、合金、有台阶

弛豫结构：表面区晶格结构保持不变，只是晶格常数变化 Δa 。

重构：表面区原子晶格常数与结构都发生变化。

环境：温度、压力、湿度、环境中的化学颗粒及尘埃、霉菌和昆虫、辐射、机械因素。

3. 导带、价带、禁带、禁带、禁带宽度基本概念；金属、半导体、绝缘体的能带结构。



4. 本征半导体、n型半导体、p型半导体的基本概念。

本征半导体：在一定温度下，总有一些电子获得足够的能量，从价带跃迁到导带，成为导带的自由电子，同时价带出现等数量的空穴，这种激发称为本征激发。载流子主要来源于本征激发的半导体称之为本征半导体。

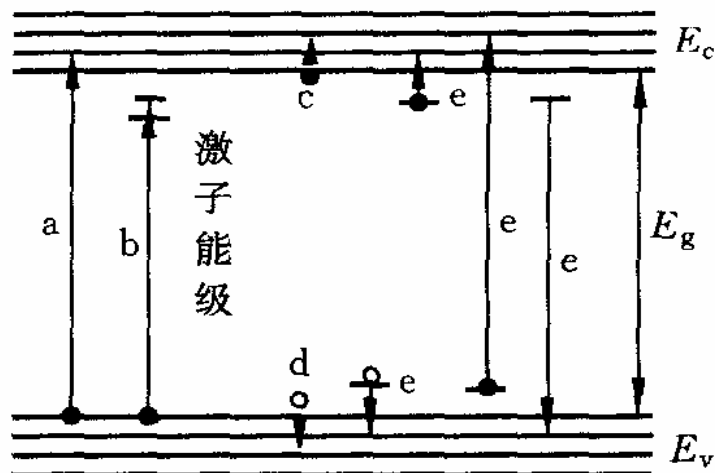
N型半导体：掺入施主杂质V族（P、As、Sb）形成导电机理的半导体。

P型半导体：掺入受主杂质III族（B、Ga、In）形成导电机理的半导体。

5. 光吸收、光电导，光吸收的电子跃迁过程。

半导体中的光吸收是由于其中的电子吸收光子能量从低能态跃迁至高能态所致。

半导体吸收光子后，可能导致导带电子和价带空穴数目增加，形成非平衡载流子，引起半导体的电导率增加。这种由于光照引起半导体电导率增加的现象称为光电导。分为本征吸收、激子吸收、自由载流子吸收、杂质吸收、晶格振动吸收。



6. 光生伏特效应。

当用适当波长的光照射非均匀掺杂的半导体（如P—N结）或其它半导体结构时，由于光激发和半导体内建电场的作用，将在半导体内部产生电势。这种现象称为光生伏特效应。

应用：太阳能电池，光检测元件

7. 半导体磁学性质：霍尔效应、磁阻效应（物理磁阻、几何磁阻）。

霍尔效应：沿x轴方向通入电流I，z轴方向加一磁场H_z，那么在y轴方向将产生一电场E_y，利用霍尔效应可检验材料是否存在电子电导

磁阻效应：磁场的存在导致半导体电阻增大。物理磁阻（电阻率增大）、几何磁阻（长度增加）

8. 半导体热电性质：西贝克效应及其应用。

西贝克（Seebeck）效应：将两种不同材料连成闭合回路，并保持两个接点处有温差，则回路中将会产生电动势。

珀耳帖（Peltier）效应（Seebeck效应的逆效应）：将闭合回路保持一定温度，并通以电流时，一处接点放热，另一处接点吸热。改变电流方向，则吸、放热的接点也互换。

汤姆逊（Thomson）效应：当电流通过有均匀温度梯度的半导体时，原有的温度分布将被破坏，为维持原有的温度分布，则半导体将吸热或放热。

9. 元素半导体、化合物半导体（III—V族、II—IV族、IV—IV族）的基本特性、能带结构特征。

锗、硅的能带结构：具有多能谷结构、导带底和价带顶处于不同的k值，为间接带隙半导体

III—V族与IV族元素半导体相比，具有：1. 迁移率高。制造高频、高速器件。2. 禁带宽度大。可用作高温、大功率器件。3. 能带结构是直接跃迁型。转换成光的效率高，可制作半导体激光器、发光二极管等。

晶体结构：立方闪锌矿结构、六角纤维锌矿结构。

II—IV族能带结构：1. 禁带宽度(E_g)比同一周期的III—V族化合物和元素半导体大。2. 都为直接跃迁型。3. 随着原子序数增加，E_g减小。

晶体结构：闪锌矿型、纤维锌矿型

禁带宽度变化范围大。直接跃迁型能带结构。电负性差值大，离子键成分大。

IV—IV族：高硬度、较大的热导率、宽禁带、高电子饱和速度、高击穿电压。三高（高功率、高频率、高温）器件的优良衬底材料

10. 半导体相关工艺方法：外延（同质外延、异质外延）。

外延工艺（Epitaxy）：在一定条件下，在经过仔细加工的衬底上沿着与原来的结晶学平面相同的取向，生长出一层（或几层）导电类型、掺杂浓度、厚度、表面状态、内部缺陷等符合要求的材料的工艺方法。

同质外延、异质外延

11. 半导体微结构材料：异质结，超晶格，设计方法。

半导体微结构材料：具有半导体异质结、超晶格和具有量子效应的半导体材料。

异质结：禁带宽度不同的两种材料在原子尺度上形成完美界面的材料。



图 3.22 双异质结示意图

图 3.23 GaAs/AlAs 超晶格材料导带示意图

超晶格：两种不同带隙的超薄层构成的一维周期性结构。

设计方法：异质结器件的中心设计原理。调制掺杂原理超晶格。量子限制效应库仑阻塞效应。

12. 激光特点与发光机理，基质晶体、激活离子的作用。

激光特点：1. 方向性好，亮度高，能量集中。2. 单色性好。3. 相干性好。4. 激光传递信息的容量大。

5. 高简并度的强激光，其场强远大于分子、原子库仑场强，引起新的物理效应

发光机理：爱因斯坦关系
$$\bar{n} = \frac{\text{光子数}}{\text{光子态数}} = \frac{W_{21}}{A_{12}}$$

$\bar{n}$ ：光子简并度，定义为一个光子态（光子的状态）中平均的光子数目；

W_{21} ：受激发射几率；

A_{21} ：自发辐射几率。

体积愈大，频率愈高，光子可能的状态数目就愈大。同态光子是不可区分的，同态光子是相干的。

$W_{21} < A_{21}$ ：常规发光过程

$W_{21} > A_{21}$ ：激光发射过程

激光产生的必要条件：1. 粒子数反转分布（光放大）。2. 减少振荡模式——开式光学谐振腔的作用

激光产生的充分条件：1. 起振条件：初始增益大于损耗。2. 稳定振荡条件：饱和增益等于损耗

基质晶体：组成晶格的主组分，为激活离子提供适当的晶格场。材料的物化性质主要取决于基质晶体

氟化物晶体：CaF₂、BaF₂、SrF₂、LaF₃、MgF₂

金属酸盐晶体：CaWO₄、CaMoO₄、LiNbO₃、YVO₄

金属氧化物晶体：Al₂O₃、Y₃Al₅O₁₂、YAlO₃、Er₂O₃、Y₂O₃

激活离子：少量的掺杂离子，发光中心。激光的波长主要取决于激活离子的内部能级结构

过渡族金属：Cr³⁺、Ni²⁺、Co³⁺

三价稀土：Pr³⁺、Nd³⁺、Sm³⁺、Eu³⁺、Dy³⁺、Ho³⁺、Er³⁺、Yb³⁺、Tm³⁺

二价稀土：Sm²⁺、Er²⁺、Tm²⁺、Dy²⁺

锕系：U³⁺

13. 半导体发光材料的复合机制。

半导体发光材料：由电能直接转换为光能，具有很高的转换效率。

耗尽层中载流子的复合是决定半导体p-n结发光性质的重要因素。

辐射性复合（电子与空穴的复合以光能的形式辐射能量）：电子和空穴由于碰撞而复合、通过杂质能级的复合、激子复合
非辐射性复合（跃迁能量转换为低能声子）：阶段地放出声子的复合、俄歇过程、表面复合

14. 光纤材料的特点，光纤性能。

光纤材料（Optical Fiber）作为信息传输介质的优点：1. 光纤的传输损耗低、信息容量大。2. 具有抗电磁干扰能力，特别适合于强。3. 电磁辐射干扰的环境中应用。4. 光纤之间的串话即相互干扰小。5. 尺寸小、重量轻，有利于敷设和运输。6. 光纤材料主要是石英，它在地球上非常丰富。
光纤性能：1. 光纤的数值孔径。2. 光纤的传播模式（单模、多模）。3. 光纤的传输损耗。4. 光纤的带宽。5. 光纤的机械强度。6. 光纤的温度特性

15. 光纤损耗及其类型。

光波在光纤中传输，随距离的增加，其强度逐渐减弱，光纤存在对光波的衰减作用，称之为光纤的损耗（或衰减）。

在波长λ下，沿光纤传输距离L的衰减

$A(\lambda): \quad A(\lambda) = 10 \lg \frac{P_1}{P_0} \quad (\text{dB})$

P₁: 光纤输入端的光功率
P₀: 光纤输出端的光功率

衰减系数α(λ): $a(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \quad (\text{dB/km})$

现有光纤的最低损耗为0.2dB/km，相当于1km的透光度为95.5%，在此种光纤中，光功率衰减一半的距离是15km。

16. 光纤的接续方式及其应用场合。

固定接续、活动连接器

17. 光纤材料的基本要求，基本的材料体系。

光纤材料的基本条件：1. 材料透光性能好，光损耗低；2. 便于加工成细长均匀的纤维；3. 资源丰富，价格便宜，可靠性高。

表 4.4 光纤损耗的类型

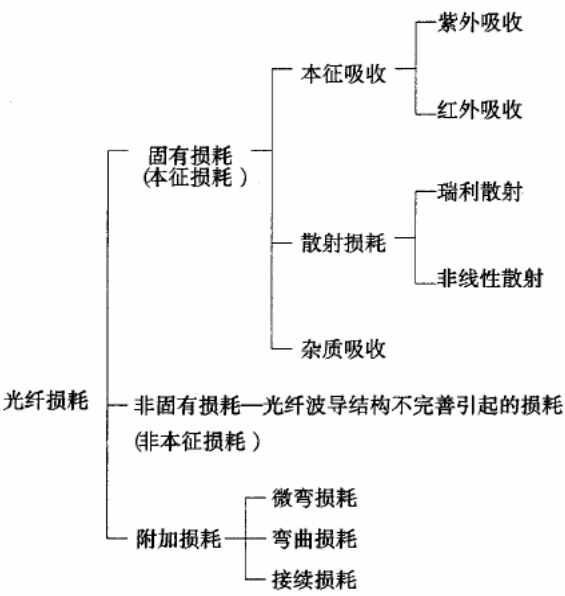


表 7.3.1 目前主要研究的光纤材料体系

种 类	组成材料(代表例) ^①	原 料	低损耗波长范围 ^② /μm
氧化物玻璃			
石英系	1) SiO ₂ + GeO ₂ + P ₂ O ₅ 2) SiO ₂ , SiO ₂ + F, SiO ₂ + B ₂ O ₃	SiCl ₄ , GeCl ₄ , POCl ₃ SiCl ₄ , SF ₆ , 熔融石英	0.37~2.4
多元系	1) SiO ₂ + CaO + Na ₂ O + GeO ₂ 2) SiO ₂ + CaO + Na ₂ O + GeO ₂	SiCl ₄ , NaNO ₃ , Ge(C ₄ H ₈ O) ₄ Ca(NO ₃) ₂ , H ₂ BO ₂	0.45~1.8
非氧化物玻璃			
氟化系	1) ZrF ₄ + BaF ₂ + CdF ₂ 2) ZrF ₄ + BaF ₂ + CdF ₂ + AlF ₃	ZrF ₄ + BaF ₂ + CdF ₂ ZrF ₄ + BaF ₂ + CdF ₂ + AlF ₃ + NH ₃ · HF ₄	0.40~4.3
硫属元素化合物	1) As ₄₀ S, As ₃₈ S ₃ Se ₁₇ 2) As ₄₀ S	As, Ge S, Se	0.92~5.6 1.4~9.5
晶体			
卤化物单晶	1) CsBr, CsI	CsBr, CsI	—
卤化物多晶	1) TiBrI	TiBrI	—
塑料	1) D 化 PMMA 2) D 化 PMA	D 化 MMA D 化 MA	0.42~0.94

① 1) — 芯纤；2) — 护套。 重氢化聚甲基丙烯酸甲脂

18. 光纤基材制备方法。

石英系光纤的制备

由于软化点高，首先须合成具有既定折射率分布的棒状玻璃体（母体），然后再拔成细丝获得光纤。

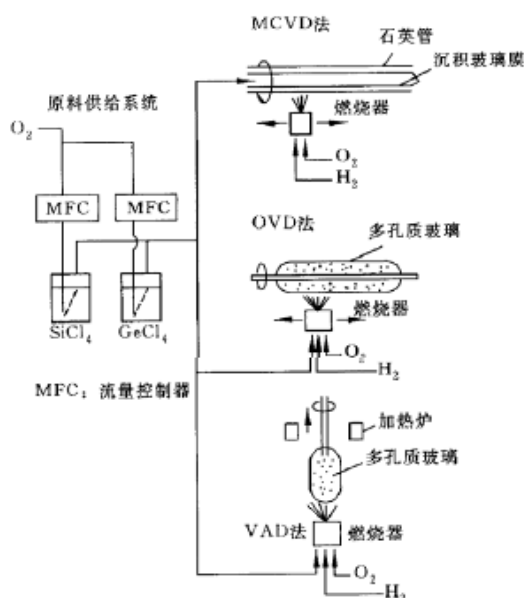


图 7.3.3 石英系光纤基材制备方法

初始原料：

SiCl_4 、 GeCl_4 、 POCl_3 、 SF_6 等

母体的合成：将气体原料送入高温区，形成氧化物粉末，并逐步沉积，再将沉积物加热使其透明。

■ 准化学气相沉积法 MCVD

Modified Chemical Vapor Deposition

■ 气相外延沉积法 OVD

Outside Vapor-phase Deposition

■ 气相轴向沉积法 VAD

Vapor-phase Axial Deposition

母体尺寸：外径12~50mm 长度400~1000mm

14

19. 液晶材料及主要的结构类型。

液晶：液态晶体的简称。既有液体的流动性，又有晶体那样的各向异性。

类型：溶致液晶（溶解在一定的溶剂中才呈现液晶性）

热致液晶（在一定的温度范围内才呈现液晶性）
近晶相、向列相（显示的主要类型）、胆甾相
液晶的双折射现象如右图

20. 热释电材料及基本性能要求。

产生的电荷量随温度的变化率称为热释电系数。

电生热效应(逆热释电效应)：对热释电晶体绝热施加电场时，晶体的温度将发生变化。

要求：比热C小，热释电系数P大，介电常数ε小，材料易于制备和加工。

21. 光调制用材料：电光材料、磁光材料、声光材料及相应的功能效应与应用原理。

在外加电场的作用下，介质折射率发生变化的现象，称为**电光效应**。具有电光效应的介质称为**电光材料**。当光通过晶体时，在电场方向上光速下降，垂直方向上光速增加，即电场改变了折射率。

光与磁场中的物质，或光与具有自发磁化特性的物质之间相互作用的现象，称为**磁光效应**。具有磁光效应的介质称为**磁光材料**。

磁致旋光效应（法拉第效应）： $\theta = VLB$

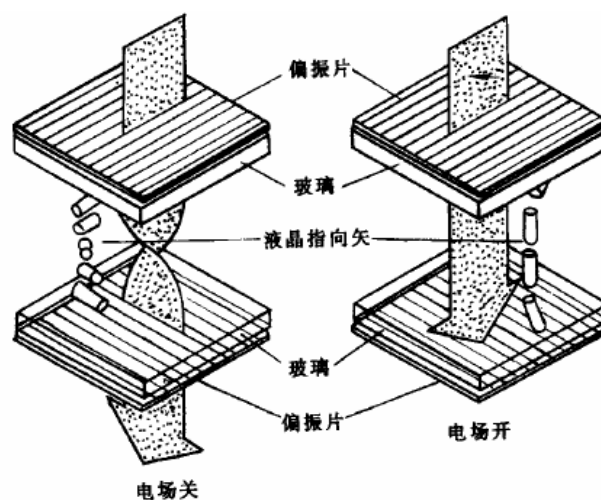


图 4.28 扭曲向列型液晶显示原理图

克尔效应：线偏振光入射到磁化介质表面时其反射光的偏振面发生偏转。

磁致双折射：在强磁场作用下，一些各向同性的透明磁介质呈现出双折射性。

光磁效应：光照后磁性能发生变化的现象。

当声波在介质中通过时，介质的疏密随声波振幅的强弱而产生相应的周期性的疏密变化，它对光的作用有如条纹光栅。此时光束若以适当角度射入晶体（光栅）内即产生衍射现象。这种声致光衍射现象称为**声光效应**。具有声光效应的材料，称为**声光材料**。

22. 磁信息材料的基本特性、工艺及要求。

23. 磁性液体的特性及应用。

① 磁特性：微粒是单畴或近乎单畴的；微粒具有超顺磁性，矫顽力、剩磁为“0”。

② 粘度：与其它胶体一样，无外加磁场的作用时，磁性液体的粘度比基液要大；有外加磁场作用时，其粘度会发生变化。

③ 光学特性——磁致双折射：在磁场作用下，磁性液体中的数个磁性微粒结成链状，沿磁场方向有序排列，产生光学各向异性。这种数个微粒的凝聚仍不破坏磁性液体的稳定性。

④ 力学特性：在梯度磁场的作用下，浮力使密度大于磁性液体本身的物体可以悬浮在磁性液体中。

⑤ 界面特性：磁性流体界面不稳定性，该特性使磁性液体对于液体介质的密封作用很快失效！

① 利用磁性液体的性能在磁场中的改变

如：利用磁液在磁场中透射光的变化可做成光传感器、磁强计；利用粘度在磁场中的变化可制造惯性阻尼器；利用液面在磁场中的变化可制造压力信号发生器、电流计等。

② 利用外加磁场和磁性液体作用产生的力

磁液密封是最常见的。利用梯度磁场中的悬浮效果，制成密度计、加速度表等。

③ 利用磁场控制磁性液体的运动

利用其流动性可制备药物吸收剂、治癌剂、流量计等；生物分子分离；利用热交换可制成能量交换机、液体金属发电机等。

【其他】磁液动态密封：防尘密封、真空密封

液封优点：① 利用了磁液的流体性能，气密封性能好，能够实现真正的零泄露密封。② 磁液密封对轴的表面粗糙度以及偏轴转动的要求不高。③ 磁液与转轴之间的磨损很小，只有一般机械密封的1/10，而且减少了固体密封时产生的噪声和发热。④ 对密封圈左右两面均可加压。

注意的问题：① 在温度大于100℃时，磁液不稳定。因此，在常温下当转速超过20m/s时，必须有冷却装置。② 由于磁液与普通液体之间存在界面不稳定性问题，尚不能实现对液体介质的长期密封。③ 密封耐压强度有待提高。

24. 超磁致伸缩材料特性及要求。

实用化要求

1. 产生应变、应力要大（并具有相应的机械强度）；2. 响应速度快；3. 软磁性；4. 可在低磁场下驱动；5. 居里温度高；6. 对温度变化不敏感；7. 高可靠性；8. 良好的环保性能和市场竞争力。

25. 传感器与敏感材料的基本类型以及对敏感材料的基本要求。

传感器：一种能把物理量或化学量转变成便于利用的电信号的器件。通常由敏感元件和转换元件组成。

敏感元件：直接感知（响应）环境变量的各种变化。

转换元件：将敏感元件感知（响应）到的被测量，转换成适于传输、测量的电信号。

类型：热(温)敏感材料、热电偶材料、氧化物半导体材料、示温型液晶、光纤温度传感器、湿敏材料、气敏材料、氧敏材料

基本要求：

1. 对于某种特定变量（物理、化学、生物等变量）具有较高的敏感性，能迅速将微小的变化准确地、可重复地变换为相应的电信号输出。

2. 在一定条件下，除了对所指定的一种变量敏感外，对其余变量都不敏感，能在环境中存在多种变量的复杂情况下，准确摄取指定的变量信息，即具有良好的选择性，且响应速度要快。

3. 具有良好的耐环境稳定性。在温度、湿度、辐射强度等急剧改变的环境中，其敏感特性不发生明显的劣化。并对环境中存在的酸、碱、盐雾等有害气体具有良好的耐受性。

26. 常见敏感材料的敏感特性与机制。

27. 物理、化学电源定义、分类及常见电池与材料的特点。

化学电源：将物质的化学能通过电化学反应直接转换成电能的一种装置或系统。

物理电源：在一定条件下实现能量直接转换的物理器件。

化学电源：① 原电池（一次电池）② 蓄电池（储能电池、二次电池）③ 储备电池（特殊的一次电池）④ 燃料电池

镉镍电池、氢镍电池、金属氢化物镍电池、铅酸电池、锂离子二次电池、燃料电池

物理电源：太阳电池、温差发电机

28. 纳米材料的基本特性、基本制备技术。

纳米材料的特性：

① 表面效应：纳米粒子的表面积很大，在表面的原子数目所占比例很高，大大增加了纳米粒子的表面活性，不但引起粒子表面原子输运和构型的变化，同时也引起表面电子自旋构象和电子能谱的变化。

② 体积效应（小尺寸效应）：当纳米粒子尺寸与光波波长、德布罗意波长、超导态的相干长度或透射深度等物理特征尺寸相近或更小时，符合周期性的边界条件受到破坏，因而在光、热、电、声、磁等的物理特性方面会出现一些新的效应。

③ 量子尺寸效应：纳米粒子的尺寸很小时，费米能级附近的电子能级由准连续变为离散的现象，导致纳米粒子的磁、光、电、声、热、超导等特性显著不同。

④ 宏观量子隧道效应：微观粒子具有的贯穿势垒的效应。

近年来，人们发现一些宏观量，如微粒的磁化强度、量子相干器件中的磁通量等也具有隧道效应，可以穿越宏观体系的势垒而发生变化，故称为宏观量子隧道效应。

碳纳米管制备方法：

电弧蒸发法

激光蒸发法

化学气相法

等离子沉积法

电解法

电子轰击法

纳米粉体制备技术

固相法

传统粉碎法

固相化学反应法

气相法

蒸发凝聚法(加热源：电阻、等离子体、高频感应、电子束、激光等)

溅射法

爆炸丝法

化学气相沉积法(CVD)

液相法

沉淀法

水热合成法

溶胶-凝胶法

溶液蒸发法

微乳液法

29. 各种焊接技术的特点。

熔焊：利用高温热源将需要连接处的金属局部加热到熔化状态，使它们的原子充分扩散、冷却凝固后连接成一个整体的方法。

钎焊：采用液相线温度比焊件（母材）固相线温度低的金属材料作钎料，将焊件和钎料一起加热到钎料熔化而焊件并不熔化的温度，利用熔化了了的钎料润湿焊件并填充焊件连接处的间隙，并借助液态钎料与焊件间的相互溶解和扩散而实现零件连接的方法。

电阻焊：将焊件压紧于两电极之间，并通以电流，利用电流流经焊件接触面及其邻近区域所产生的电阻热使之加热到熔化或塑性状态，使之形成金属结合的一种连接方法。

锡焊：将铅锡焊料熔入焊件的缝隙使其连接的一种焊接方法。

助焊剂的3大作用：（1）除氧化膜。（2）防止氧化。（3）较小表面张力。

30. 各种金属热处理技术的特点

退火：将钢加热到一定的温度，经较长时间保温后缓慢冷却（随炉冷却）的热处理方法。

主要目的：消除内应力，降低硬度，改善加工性能，获得均匀稳定的组织，以利后续加工。

正火：将钢加热到相变以上的某一温度，经保温适当时间后在静止空气中冷却的热处理方法。

主要目的：细化晶粒，提高强度、硬度和韧性，改善切削加工性能。



淬火：将钢加热到相变温度以上的某温度，稍加保温后，快速淬入水中（或油等介质）的热处理方法。
主要目的：获得过饱和的淬火马氏体组织，提高硬度、强度和耐磨性。

回火：紧接淬火的热处理操作，将淬火后的钢件再加热到相变温度以下的某一温度，经适当保温后再缓冷或快冷的热处理方法。

主要目的：降低或消除钢件淬火时产生的内应力，减少脆性，提高塑性和韧性，并获得稳定的回火组织。

时效：合金钢经淬火处理或冷形变后，其性能或形状尺寸随时间推移而变化的现象。常用的时效方法有自然时效、人工时效等。

自然时效：将钢件放置足够长的时间（数月或数年），以稳定钢件的组织、性能和尺寸

人工时效：将钢淬火、回火后，加热到 $100\sim 170^{\circ}\text{C}$ ，经 $4\sim 36\text{h}$ 或更长时间保温后空冷，达到稳定性和尺寸的目的。

冷处理：将钢件放置在 0°C 以下处理的方法。

主要目的：减少钢件淬火时的残余奥氏体含量，以稳定尺寸和性能。

31. 膨胀合金、封接合金的技术要求与应用。

膨胀合金：定膨胀合金与玻璃、陶瓷相封接，最主要的是两者的热膨胀系数相匹配。根据封接陶瓷、玻璃的特性来选择封接合金。

封接合金：①金属与陶瓷、玻璃的热膨胀系数相匹配；②金属上的氧化膜与基体结合牢固；③氧化物与陶瓷、玻璃的浸润性良好；④在金属加工及零件工作范围内不应有组织转变；⑤希望金属的氧化物具有较低的电阻率；⑥在封接处不应形成气泡；⑦合金的价格较低廉；⑧加工性好，易冲制成各种零件。

32. 三防技术的总体思路及材料、工艺选择原则与相关应用。

三防：在电子工业中，一般是指防潮、防霉、防盐雾。

基本方法：

（1）在产品研究和设计阶段，根据使用条件，提出三防要求，使三防技术贯穿到产品设计当中，而不是在产品完成之后。

（2）严格优选材料和工艺。采用不受潮湿、温度、盐雾、霉菌等侵蚀的材料；采用经试验证明是可靠的工艺方法。

（3）通过组件密封、元件包封、零部件涂覆等方法防止潮气或腐蚀介质接触到材料。

（4）通过排除湿气、冷却、灭菌等方法改善环境条件或利用周期性检查和维修及时排除问题。

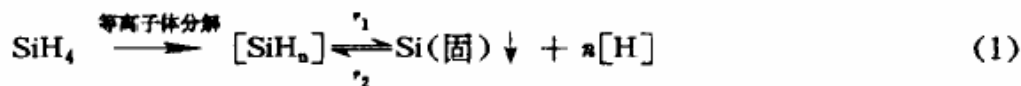
金属材料的腐蚀与选择：金属材料选择（高耐腐蚀性、腐蚀倾向性小、杂质含量低）、合理的加工工艺、合理的设计

非金属材料的选择：1) 基本电性能、2) 强度、耐温等级、物理状态等、3) 具有低吸潮性、4) 工作频率范围内的性能稳定性、5) 工作温度范围内性能稳定性、6) 不长霉

纳米晶硅：纳米固体材料是一种既不同于晶态也不同于非晶态的第三类固体材料。

纳米硅的制备是在 PECVD 系统中，用 SiH_4 作源， H_2 作载气，在氢的辉光放电中淀积而成。与一般的 PECVD 系统不同的是，除了在上、下两个平行电极间加 RF 射频电源外，还要加一直流偏压 $V_b (=0\sim 1000\text{V})$ 。为满足这些要求，工艺上一定重视两个方面：①浓氢稀释 SiH_4 ，②在平行电极间加直流偏压。

主要反应：



2. 纳米硅的性质

结构：① nc-Si 由晶粒和界面原子两部分组成，②晶粒大小为几到十几纳米，③界面原子所占的比例为 $(50+5)\%$ 。界面原子的结构与非晶硅不同。

电学：通过适当调整工艺参数，可以使生长的 nc-Si 膜室温电导率高达 $10^{-3}\sim 10^{-2}/\Omega \cdot \text{cm}$

对所有掺杂样品，电导率对温度的依赖关系严格遵守指数定律公式 $(5) \log \sigma \sim 1/T$ 曲线是线性的以及一些光学性质。

由于纳米硅材料的结构特点，使得它具有许多新颖的特性，如光热稳定性好，光吸收能力强，掺杂效率比 $\mu\text{-c-Si}$ 高，室温电导率可在 $10^{-2}\sim 10^{-5}/\Omega \cdot \text{cm}$ 间变化，