

绪论

电子 费米子 自旋 $1/2$ ；光子 玻色子 自旋 1

目前的信息电子学：以电荷为基础（电荷电子学）

以电子自旋为基础（自旋电子学）

玻色子（英语：boson）是遵循玻色-爱因斯坦统计，自旋量子数为整数的粒子。玻色子不遵守泡利不相容原理，多个全同玻色子可以同时处于同一个量子态，在低温时可以发生玻色-爱因斯坦凝聚。和玻色子相对的是费米子，费米子遵循费米-狄拉克统计，自旋量子数为半整数（ $1/2, 3/2, \dots$ ）。物质的基本结构是费米子，而物质之间的基本相互作用却由玻色子来传递。

在一组由全同粒子组成的体系中，如果在体系的一个量子态（即由一套量子数所确定的微观状态）上只允许容纳一个粒子，这种粒子称为费米子。或者说自旋为半奇数（ $1/2, 3/2, \dots$ ）的粒子统称为费米子，服从费米-狄拉克统计。费米子满足泡利不相容原理，在由费米子组成的系统中，即不能两个以上的费米子出现在相同的量子态中。

第一章 固体的晶体结构简介

固体类型：无定形（原子排列只在多个原子尺度内有序 **各向同性**）；多晶（在许多原子尺度的区域内**短程有序 各向异性**）；单晶（在整个材料内具有高度的**长程有序 各向异性**）

晶体的内部结构可以看成一些**相同的点**在空间做**规则的周期性的无限分布**

晶体结构=结构基元+空间点阵

基元：晶体的基本结构单元（一个基元对应一个节点；基元周围的环境相同；基元内部有结构，可以由一种或者数种原子构成）

点阵：晶体中代表基元的节点在三维空间进行周期性重复排列，所得到的三维网格图形叫做点阵（布拉菲空间点阵）

简单晶格：格点上的基元只包含一个原子

复杂式晶格：格点上的基元包含两个或两个以上的原子

简单晶格必须有同种原子组成，由同种原子组成的不一定是简单晶格

基本的晶体结构：3 大晶族、7 大晶系、14 种布拉菲点阵

元胞：任意四个不在同一平面的相邻的阵点（格点），确定三个方向的位矢；体积最小的**元胞为原胞**

原胞的性质（1）体积最小的周期性结构单元（2）格点只存在**平行六面体的顶角上**（3）原胞的选取不唯一，但是体积相等（4）原胞中只有**一个基元**（5）反应**周期性，不能反应晶体的对称性**

晶胞（晶体的周期性描述）（1）在能够保持**晶体对称性**的前提下，构成晶体的**最小周期性结构单元**（2）晶胞一般不等于原胞，其体积可以使原胞的**整数倍**（3）结点可以在**顶点、体心或面心**

原胞与晶胞的异同：原胞节点只能在顶点，所含节点数=1；晶胞节点在顶点、面心或体心，所含节点数>1

晶面：任意三个不共线的格点，构成一个晶面。用密勒指数标定。

晶面间距：相邻平行晶面之间的距离。晶面间距越大，相邻平行晶面原子之间的作用力越小，解理该晶面更容易。

晶面的原子表面密度；方向指数

金刚石结构：每个碳原子周围都有四个碳原子形成正四面体结构。闪锌矿结构：与金刚

石结构相似，但由两种不同的原子组成。

原子键：原子间相互作用的表现形式

离子键：电离能很小的金属原子和电子亲和能很大的非金属原子相互靠近；共价键：同种原子或者电负性相差很小的原子；金属键：所有金属原子都倾向于丢失电子

范德瓦斯键：是气体分子能够凝聚为液体和固体的主要原因。

固体的缺陷和杂质：结构基元的点阵排列偏离严格周期性的现象。

点、线、面、体缺陷。杂质缺陷（替代式、填隙式）

第二章 量子力学导论

量子力学原理：能量子、波粒二象性、测不准原理

物体的热辐射：分子的热运动使物体辐射电磁波，这种与温度相关的辐射称为热辐射。

热辐射电磁波的能量大小与频率分布与温度有关。

平衡热辐射：物体辐射电磁波的同时也吸收和反射电磁波。辐射的能量等于吸收的能量时，热辐射过程达到热平衡。

振子只能一份一份地按不连续方式辐射和吸收能量，每份能量都称为能量子。

光的粒子性实验：爱因斯坦光电效应 光波实验（也说明了光子具有能量）、康普顿效应（光子具有动量）

德布罗意关系提出了物质波的假设，即实物也具有波动性。

证实粒子具有波动性的实验：戴维逊革末实验

测不准原理：动量位置测不准原理（ x 方向与 y 方向位置可以同时侧准，因为方向正交）、能量时间测不准关系，角动量角度测不准关系。

不确定性原理是一种观察者效应。不确定性关系的存在根源于微观粒子的波粒二象性。

薛定谔波动方程

波函数模的平方代表 t 时刻在空间某点 r 处单位体积内发现粒子的几率（概率密度）

粒子的几率密度只与位置有关，而与时间无关。

边界条件：(1) 几率密度函数归一化 (2) 波函数（几率密度）有限、单值、连续 (3) 一阶导数（动量）有限、单值、连续 (4) 二阶导数（能量）有限

薛定谔波动方程的应用实例

自由空间中的电子（给定动量的粒子，无法确定粒子的位置）

粒子运动基本特性：能量、动量；波传播基本特性：（角）频率、波矢

一维无限深势阱

阶跃位函数：粒子能渗入高能势垒区，但随着深度的增加，几率密度急剧下降，最终被散射回去（低能量粒子能渗入高能势垒）

势垒：隧道效应（粒子射到势垒上有一定几率穿过势垒而出现在区 III）

原子的波动理论

单电子原子：自然界中最简单的束缚系统。

几个量子数：主量子数 n （能量量子化）、轨道角动量量子数 l （角动量量子化） $[0, n-1]$ 、磁量子数 m （角动量在 z 轴上的投影） $[-l, l]$ 。

对于同一个 n , m 和 l 有不同的取值，但是能量相同（简并）。

自旋量子数 s ，电子自旋角动量空间取向量子化，只取 $1/2$ 。自旋磁量子数 $m_s = \pm 1/2$

自旋是电子的固有属性，与电子的空间运动无关。玻色子自旋为整数（光子），玻色子不可区分；费米子自旋为半整数（电子、中子、质子、中微子），费米子可以区分。

量子通信：基于量子力学的通信技术。其物理基础是：量子比特、量子不可克隆、量子态的叠加、量子纠缠特性

第三章 固体电子论基础

周期势场中的电子和能带论

	自由电子	孤立原子中的电子	固体中的电子
外力源	无	同一原子核与其他电子	众多原子核及其电子
能量分布	连续谱	能级	能带
运动形式	自由运动	受束缚	共有化运动
波函数	平面波 $A \exp(jkx)$	束缚电子	布洛赫波 $U(x) \exp(jkx)$
能量分布特点	能量连续	分立能级	能带
运动范围	空间各点	原子核周围	整个晶体中

能级：电子仅占据的几个分立的能量状态

能带：电子可占据的几个连续的能量区间

实际晶体中的电子处于**稳定、非平衡电子分布**

能带的形成：原子相互接近形成晶体，不同原子的**相似壳层**相互交迭，电子不再局限在某一个原子上，可以从一个原子转移到另一个原子上，电子在**整个晶体中进行共有化运动**。

孤立原子能级 E_{nl} ，能容纳电子 $2(2l+1)$ 个， N 个原子组成的晶体，能级分裂成 N 个能级组

成的能带，能容纳电子 $2N(2l+1)$

外壳层按照能级，内壳层能带

硅晶体能级分裂，能带相互交叠形成混合能带，交叠后还能再次分裂成上下两个能带。

能级分裂形成的能带都称为允带，允带之间的能态空隙称为禁带。

KP 模型

多体多电子问题 **绝热近似**（电子运动速度 \gg 离子运动速度；假定离子固定在平衡位置上不动；离子运动与电子运动不交换能量）变成 单体多电子问题 **单电子近似**（其他电子的作用看成平均势场；固定的离子势场）变成 单体单电子问题 **周期势场近似**（固定的粒子势场和其他电子的场之和是一个周期势场）变成周期性势场中的单电子问题

原子实：除价电子外，包括原子核和所有壳层的电子

晶体中周期性势场与晶格有相同的周期。

布洛赫定理：在一维性周期势场中的单电子波函数为一个**周期性调幅的平面波**，其**振幅周期为晶格周期**，用布洛赫函数描写状态的电子成为**布洛赫电子**。

本征方程：
$$F(E) = P' \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha a} + \cos(\alpha a) = \cos(ka)$$
，描述 k 与 E 的关系的方程（色散关系）。

简约布里渊区，整个 $E-k$ 曲线经过平移后落在 $[-\pi/a, \pi/a]$ 中。

为什么用 $E-k$ 关系来描述晶体中电子的行为：从波动的角度来描述电子。描述波动行为最重要的是色散关系。

微扰法：零级近似，微扰项

自由电子模型（晶体中势场的周期性变化部分很小，当做微扰，把自由电子的常值 U_0 当做零级近似）：晶体势场很弱，以势场平均值求解，适用于金属价电子的粗略近似。

紧束缚模型（孤立原子能量作为零级近似，原子之间相互作用作为微扰）：适用于导电性能差的晶体，对狭窄内壳层能带的粗略近似。

固体的导电性、有效质量和空穴

在考虑有效质量时没有考虑晶体势场的作用，故能带底有效质量为正，能带顶有效质量为负。有效质量与 E 对 k 的二阶偏导成反比。

有效质量为负时，表示晶体势场比外力大得多，并且反向。

满带晶体不导电，部分填充能带晶体导电。

金属、绝缘体和半导体

价电子就是构成化学键的电子。（主族元素的价电子就是最外层电子；副族元素原子的价

电子除最外层电子，还可包括次外层电子）价电子决定元素特性。价电子能级分裂形成的能带为价带。能带结构主要决定固体的电、磁、光等特性。

	金属	绝缘体	半导体
载流子	自由电子		价带中的电子和导带中的空穴
能带	部分填充能带 ; 导带与价带出现交叠	导带为空带 价带为满带	导带和价带为部分填充能带

直接带隙半导体（能带跃迁不改变电子动量）；间接带隙半导体（能带跃迁改变电子能量和动量）

半导体中载流子

如何计算载流子的浓度？

1. 计算单位体积下能带中单位能量所包含的量子态数目（态密度函数）
2. 计算每个量子态被电子占据的概率
3. 对整个能带积分得到电子的浓度

态密度函数：单位体积、单位能量允许电子占据的量子态数目（用三维无限深势阱算出）

麦克斯韦-玻尔兹曼分布：粒子可以一一区别，每个能态中所能容纳的电子数没有限制。

费米温度；费米面

本征半导体平衡载流子浓度与温度、禁带宽度有关，与费米能级无关。

浅能级施主/受主杂质的能级离导带底/价带顶很近、深能级杂质很远（在禁带中间部分）

N 型半导体大量提供导带电子，P 型半导体大量提供价带空穴

互补型半导体：既掺施主杂质，也掺受主杂质。

费米能级位置（分为低温弱电离区、中间电离区、强电离区、过渡区、高温本征激发区）

低温弱电离区：大部分施主杂质能级仍为电子占据，少量电离；本征激发到导电的电子可以忽略不计；导带电子由电离施主杂质提供。

强电离区：大部分的施主/受主杂质都电离了，载流子浓度由掺杂浓度决定。

高温本征区：本征激发产生的载流子数远大于杂质电离产生的载流子数

金属中的自由电子

一般情况下，温度上升对电子分布的影响较小；在费米能级附近，温度上升对电子的影响较大。

自由电子的费米面，理想时为球面，但实际与球面有较大差别。

自由电子的费米面对金属特性有较大影响。

两次散射之间自由时间的平均值，称为弛豫时间 τ

温度上升，载流子速度上升，电离杂质对载流子散射减弱；晶格震动上升，对载流子散射上升。

半导体电阻率与温度的关系：低温区（受电离杂质散射主导，温度上升，载流子浓度上升，电导率上升）、饱和区（载流子浓度几乎为常数，温度上升，晶格震动起主要作用，电导率下降）、本征区（温度上升，载流子浓度上升，综合效果是电导率上升）

半导体材料

化合物半导体需要与衬底晶格常数匹配。

自补偿：掺受主杂质的半导体材料内，由于热缺陷出现负空位，该负离子补偿了受主。

单极型半导体：有些 2-6 族化合物半导体只能呈现 p 型或者 n 型。

双极型半导体：元素半导体、3-5 族半导体，既能掺 n 又能掺 p。

几种固态电子的体效应

磁电效应：可用于确定载流子类型和浓度。

磁阻效应：磁场较强时，载流子偏转较大，沿外电场方向电流密度减小，使半导体电阻增大。

耿氏效应：当加半导体两端的电场超过一定值后，载流子迁移率随电场强度上升而下降。

（出现微分负阻区）负阻效应原因：双能谷结构（中心谷、卫星谷）

畴区形成过程：内部不均匀，电子浓度涨落；形成局部高阻区（高阻区内电子速度慢，区外电子漂移速度比区内大）；靠近阳极一侧形成耗尽层，阴极一侧形成积累层；形成偶极畴（偶极畴内电荷产生与外电场同方向电场，使畴内电场增强，畴外电场降低）；内部电场增强，使电子漂移速度不断下降，偶极畴不断生长；直到畴内外电场都跃出负微分电阻区；畴内电子以共同速度漂移，畴停止生长，稳态畴向阳极移动

畴区电子基本位于卫星谷，非畴区电子位于中心谷

畴区消失与形成时间——脉冲宽度；畴区漂移时间——脉冲周期

俄歇电子：当电子束射入样品表面时，激发样品内层能级上的电子逸出体外，在该能级上留下一个空穴。另一个电子从较高能级填入，与该空穴复合。释放出的能量作为光子形式或者被别的电子吸收，使该电子跃迁出表面，形成俄歇电子。

紫外光电子能谱：外壳层电子特性；x 射线光电子能谱：内壳层电子特性。

第四章 半导体器件原理

Pn 结特性概述

同质结（两种相同的半导体单晶材料）；异质结（两种不同的半导体单晶材料）；pn 结（导电类型相反的单晶材料）；高低结（导电类型相同的单晶材料界面）

N 区载流子带负电，施主离子带正电；p 区载流子带正电，受主离子带负电。

扩散运动（浓度差）；漂移运动（电场）；扩散运动与漂移运动的动态平衡形成空间电荷区（耗尽区）形成了内建电场

电场与位置成线性关系；最大电场在结平面处。

半导体连续性方程 非平衡少子会影响半导体性质。少子对事件的变化，与少子空间扩散、寿命影响、电场漂移以及其他因素有关。

整流特性（point： $p \cdot n = n_i^2$ 是同一个区内的浓度，而不是 p 区的 p 与 n 区的 n）

加正向电压：势垒区变窄，使结区漂移运动减弱，pn 结少子正向注入，产生电子（空穴）扩散区

通过任一截面的总电流密度相等，即 $J = J_0 = J_n(-x_p) + J_p(x_n)$ ，求解出肖克莱方程

实际的 pn 结，正偏时有一定的正向导通电压，材料的禁带宽度越大，正向导通电压越大。

加反向电压：势垒区变宽，使结区漂移运动增强，pn 结少子反向抽取。

少子浓度较低，反向抽取时扩散长度基本不变，反偏时少子浓度梯度几乎不随电压变化，打到稳定值（即反向饱和电流）

电容特性：势垒电容（主要存在于空间电荷区，反偏时起主要作用）与扩散电容（扩散区，正偏时起主要作用）。

势垒电容：正偏电压上升时，势垒宽度下降，空间电荷下降，电容变大（电荷存入）

击穿特性：隧道击穿（可利用）、雪崩击穿（可利用）、热电击穿（不可利用）

隧道击穿：掺杂浓度高的 pn 结中，加上高反偏电压，势垒变薄，隧道效应。

雪崩击穿：少子扩散到势垒区，在势垒区中高速漂移，产生雪崩效应。

Pn 结二极管

变容二极管、开关二极管、雪崩二极管、隧道二极管

隧道二极管：p 区 n 区都重掺杂，从而 n 区导带和 p 区价带出现相同能量的量子态（I-V 关系图掌握，四个区域；具有负阻效应）

雪崩二极管：微波频段下的负阻效应

双极型晶体管

两个背靠背的 pn 结互相影响，基区宽度比少子扩散区短，具有放大作用。

金属——半导体接触和肖特基势垒

真空能级：表面外真空中电子势能，固体中刚能脱离固体，发射到真空中的电子能量。（真空能级连续） E_0

金属功函数：电子从金属中逸出到表面外至少需要的能量 ϕ_m , $\phi_m = E_0 - E_{Fm}$ E_{Fm} 为金属费米能级。

半导体功函数：半导体费米能级和真空能级之差 ϕ_s

电子亲和势：真空能级与半导体导带底之差 χ 。（电子亲和势不变）

空间电荷区内，电子浓度比内部小得多，形成高阻区域，称为阻挡层。（半导体费米能级比金属高）；当金属费米能级比半导体高时，电子从金属流入半导体，半导体能带向下弯曲，形成反阻挡层，有利于半导体中电子流向金属。

表面态：分为施主型（被电子占据时呈电中性，释放电子后带正电）和受主型（空着时呈电中性，被电子占据后呈电负性）

表面态可以屏蔽金属接触的影响，使半导体内的势垒高度与金属的功函数无关。

感应库仑势的影响：导带底和价带顶都向费米能级接近

热平衡态，有统一的费米能级；耗尽层部分弯曲；中性区部分弯曲

肖特基结：金属与半导体接触；导带电子越过势垒顶，进入金属。

无外偏压时，金属费米能级与半导体费米能级拉平；外加正偏压主要落在半导体一侧，使半导体费米能级上升，主要电流为导带电子越过势垒进入金属；外加反向偏压，半导体费米能级下降，金属侧势垒几乎不变，有反向饱和电流密度。

肖特基二极管为多子器件，热电子发射。宏观特征：反向饱和电流密度大，正向时无扩散电容，高频特性好，导通电压低，工作频率高。Pn 结二极管宏观特性相反，关断特性好。

Pn 结 少子器件 利用少子的扩散与漂移；肖特基 多子器件 通过热电子的发射

欧姆接触（非整流接触，低阻抗双向导通）分为非整流势垒型接触和隧道势垒型接触，接触电阻主要由势垒高度、掺杂浓度决定。

非整流型势垒接触需形成反阻挡层，但由于半导体表面态的原因，gg

隧道势垒型接触：半导体侧重掺杂，势垒区宽度大幅下降，隧道效应形成隧道电流。

场效应晶体管

垂直的电场控制半导体的导电能力

结型场效应管：pnp 靠 n 沟道导电，nnp 靠 p 沟道导电

MOSFET：nnp 靠 n 沟道导电，pnp 靠 p 沟道导电。MOS 管没有电流，费米能级不弯曲，多子积累（反向电压）；多子耗尽，少子反型（正向电压）。

肖特基势垒栅型场效应管：利用肖特基结，不需要绝缘层与 pn 结，电子迁移率高。

异质结及其器件（形成异质结晶格常数要匹配）

异质结电流运输机制复杂，是多种电流机制的组合。

分为同型异质结和反型异质结，大写的字母禁带宽度大。

界面态对能带的影响：受主型界面态（电子势垒），施主型界面态（空穴势垒）

异质结特点之一：高电子注入比。晶体管（高电流放大倍数）；半导体激光器（高注入效率、低阈值电流密度）

本征载流子浓度只与禁带宽度有关

异质结二维电子气：禁带宽度不同，形成电子势阱和空穴势阱。能量在一个方向是量子化的，在另两个方向是连续的

量子阱（在与势阱薄层平行的平面内运动）、量子线（与势阱线平行的方向上自由运动）、量子点

多量子阱：两种禁带宽度不同的材料，交替形成多层结构

超晶格：势垒很薄的周期性量子阱，势阱耦合，第一类电子空穴势阱在同一材料，第二类在不同的材料。

第五章 光电子学和光电器件

两个过程：光能转换为电能、电能转换为光能。

相关器件：太阳能电池（光生福特效应）、光敏电阻（光电导效应）、光电探测器（产生光电流）、发光二极管、半导体激光器（电能转化为光）。

固体的光吸收

光吸收系数与波长有关。

光吸收机制主要有：本征吸收(直接跃迁吸收、间接跃迁吸收)、激子吸收、自由载流子吸收、杂质与缺陷吸收、晶格吸收。

本征吸收是电子从价带跃迁到导带，产生电子空穴对。包括直接跃迁与间接跃迁，直接跃迁光子参加即可，间接跃迁还需要声子参加。所以间接吸收吸光系数远小于直接跃迁。

激子：束缚在一起的电子空穴对。激子电中性。激子在固体中运动，不传导电流。

激子吸收（光子能量小于禁带宽度），激子再激励产生导带的电子与价带的空穴，产生传导电流；复合则产生能量辐射，发光。

自由载流子吸收，载流子在能带内部跃迁被吸收。

杂质与缺陷吸收：束缚在杂质或缺陷上的电子或空穴吸收光子能量，电子跃迁到导带，空穴跃迁到价带。

晶格吸收：光子能量直接转换为声子动能。

固体的光吸收

固体非热平衡态到热平衡态，多余能量以光或热形式释放。

主要的发光形式：光致发光（光辐射照射固体，电子向上跃迁进入非平衡态，再向下跃迁恢复到热平衡态，固体发光；日光灯管壁上的发光粉）、阴极射线发光（电子束或者阴极射线轰击发光物体）、放射线发光、生化发光、电致发光（pn 结或肖特基势垒发光：注入载流子复合导致的发光）。

主要复合形式：带间复合过程（导带底电子与价带顶空穴复合）、杂质或缺陷复合过程（深陷阱产生的非辐射复合；其余[导带与受主、价带与施主、施主与受主]为辐射复合且可发射光子也可不发射光子）、俄歇复合过程（非辐射复合、激发声子使晶体发热）。

发光效率=辐射复合效率/总复合效率

非辐射寿命很大的材料，有很高的发光效率

同一种材料不同组分下直接带隙与间接带隙的转换（组分与禁带宽度的关系）

Pn 结光生伏特效应和太阳能电池

太阳能电池，光生伏特效应

光照射半导体产生空穴电子对，在内建电场的作用下产生光生电动势；光生电压的方向与内建电场的方向相反（相当于 pn 结正偏压）；p 区能带下降，n 区能带上升（费米能级错开但仍然连续）。

光生载流子携带电流 \neq 外电阻电流，外电阻电流=光生电流-正偏导致的电流

短路电流等于光生电流；开路电压

光学窗口：光子穿过宽带隙材料进入窄带隙材料被吸收。

非增益型半导体光电探测器

半导体光电探测器是将光能转化为电能的光电器件。分为非增益型（光电二极管：pn 结型、PIN 型、肖特基型）与增益型（雪崩光电二极管）。

非增益型二极管工作要加反偏电压，使光子产生的空穴电子对分离，在较宽的耗尽区漂移，将光生载流子抽取出

内、外量子效率：单位时间内产生的光电子数（发射的光电子数）/单位时间内注入的电子空穴对数；且内量子效率大。

PIN 光电二极管中间的本征区长，提高响应速度。

增益型和异质结半导体光电探测器

雪崩光电二极管，高反偏电压碰撞离化；增益高、灵敏度高，利用雪崩倍增效应。

雪崩是复杂的随机过程，所以雪崩二极管的噪声倍增因子是因为雪崩过程是随机过程。

空穴电离率比接近 0 或者无穷大比较适合做雪崩二极管。即雪崩二极管正常工作的要求仅有一种载流子能引起碰撞电离。

雪崩倍增因子 = (放大后光电流+暗电流) / (放大前光电流+暗电流)

由于雪崩过程和碰撞过程的随机性，会引起附加的噪声，称为雪崩噪声或者过剩噪声。

雪崩倍增导致噪声倍增比信号倍增更强。

增益带宽积 f_r = 雪崩倍增因子 M * 带宽 B ，增益和带宽相互制约。

异质结光子能量与两种材料禁带宽度关系与能否产生光电流。

若宽带区宽度相当薄，突破异质结窗口效应的限制，光响应延伸到短波较远的区域。

光电二极管的窗口效应：异质结二极管产生光电流的光波波长局限在一定的光波波长内。

构成异质 PD，缺点：晶格常数不匹配，暗电流较大。优点：量子效率提高、相应速度上升、可以选择相应窗口。

Pn 结、pin 结、雪崩二极管共同点：工作时 pn 结都是反偏的，光子能量要大于禁带宽度，产生一个光生电流。

Pn 结二极管相应速度慢，响应度低；PIN 型二极管有比较厚的耗尽层，扩散区比较薄，响应速度与响应度提高了；雪崩二极管需要加大反偏电压，出现内部电流增益。

发光二极管

发光二极管正向偏置 pn 结，电子或空穴正向注入，与半导体中的空穴或电子复合，自发辐射发光。

自发辐射：无外磁场时，电子自发从高能级向低能级跃迁，并发射光子。发光二极管(LED)是自发辐射。

受激辐射：与外来辐射是相干的，外来辐射被放大了。半导体激光器(LD)是受激辐射。

激光器三个基本条件：粒子数分布反转（形成增益）、谐振腔（纵模条件，保证来回一次相移为 $2k\pi$ ）、阈值条件（光波在谐振腔内往返传播一次的增益大于损耗）。

半导体激光器输入与输出关系。

同质结激光器通过掺杂获得折射率差，对光子限制较弱，阈值电流较大，室温下不能连续工作；异质结激光器通过不同材料，对光子限制较强，阈值电流较小，在室温下可以连续工作。

第六章 磁电子学

原子轨道运动产生轨道磁矩，自旋运动产生自旋磁矩，还有原子磁矩（较小）

根据磁化率的不同，可分为：逆磁性（所有材料的共性）、顺磁性（较小，与温度倒数相关）、铁磁性（较大，过了居里温度会呈现顺磁性）、反铁磁性（晶面间磁矩抵消，较小，过了奈尔温度会呈现顺磁性）、亚铁磁性（未抵消完的反铁磁性，温度很高时也会呈现顺磁性）。

被电子占满的壳层，总角动量和磁矩均为 0

原子中的电子结合的模型：LS 耦合模型（适用于不同电子的轨道-轨道耦合、自旋-自旋耦合较强）、JJ 耦合模型（每个电子的轨道磁矩和自旋磁矩合成该电子总的磁矩，然后各电子的总磁矩合成该电子壳层的总磁矩；适用于同一电子轨道-自旋耦合较强）

朗德因子反映了原子中轨道磁矩和自旋磁矩对总磁矩贡献的大小，接近 1 轨道角动量占据主导，接近 2 自旋角动量占据主导

Er³⁺: 1s²2s²2p⁶3s²3p⁶3d¹⁰4s²4p⁶4d¹⁰4f¹¹5s²5p⁶

4f¹¹不满壳层 ↓ **f壳层4f electronic shells: 14个电子满**

S取泡利原理所允许的最大值

- **第一定则：自旋角动量量子数：** $S = 7 \times (1/2) + (-4) \times (1/2) = 3/2$
- $n = 4, l = 0, 1, 2, 3, m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$

第二定则 ↓ **L在S取最大值的各状态中，取泡利原理所允许的最大值**

$S = 1$ **光子是玻色子**

$m = 0, 1, 2, 3, -1, -2, -3; 3, 2, 1, 0$

L = $\sum m$

$L = 3 + 2 + 1 + 0 = 6$

- **4f: 11个电子，大于半满（7个电子）**

第三定则 ↓ **超过半满， $J = |L + S|$**

$J = |L + S| = 6 + 3/2 = 15/2$

取 $g = 1.5$ ↓

$\mu_J = g [J(J+1)]^{1/2} \mu_B = 11.98 \mu_B$

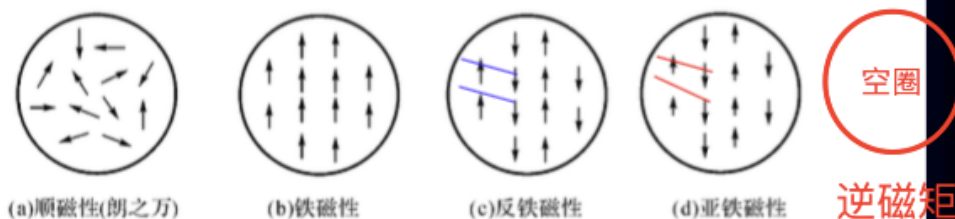
电子是费米子

什么情况下能观察到逆磁性：本征磁矩等于 0 的时候

分子场假设：铁磁体内部存在很强的附加磁场。分子场导致铁磁性，但分子场不是磁场。

磁畴假设：各个自发磁化区域称为磁畴

顺磁性、铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性的磁矩排列：



铁磁体磁化过程包括：磁壁位移和磁畴转动

第七章 超导电子学

超导性质为：完全导电性（直流电阻为 0，交流存在电阻）和完全逆磁性（外加电场在表面感生出超导电流[迈纳斯电流]，表面超导电流产生的磁化强度与外磁场完全抵消，形成一个完全逆磁性。）超导电流穿透深度与外加磁场穿透深度均为伦敦深度

二流体模型：分成常导电子（受晶格散射、有电阻、对比热有贡献）和超导电子（无晶格散射、无电阻、无熵）。是一个唯象模型

伦敦第一方程：电场决定超导电流的时间变化率

伦敦第二方程：超导电流靠磁场维持

库柏电子对：对费米面附近形成，两个电子自旋相反，动量大小相等，方向相反。获得能量后，会变成常导电子。

库柏电子对能量比两个电子能量低，所以导致能隙，能隙能量对应库柏电子对拆开的能量。超导体绝对零度时，费米面附近全是库柏电子对。

超导体约瑟夫逊隧道效应：库柏电子对的隧穿效应。（为超导电流，不需要加电压）

库柏电子对的电流 不外加电压是有直流电，外加电压后产生交流电

设计部分

半导体激光器的设计

半导体激光器原理性结构（衬底、有源区、异质结组分、脊形波导结构、谐振腔长度）

根据工作波长确定有源区材料

载流子限制、光场限制及有源区（电子势阱限制电子、空穴势阱限制空穴、光波导限制光子）

谐振腔考虑（解里面作为反射镜，形成谐振腔，长度根据纵模间隔计算）

性能优化考虑（分布反馈、分布布拉格发射）

耿氏二极管设计

耿氏二极管原理性结构（有源区、阴极、阳极）

耿氏二极管电极即半导体掺杂的考虑（管芯区与电极的相连需要欧姆接触，所以需要过渡区）

耿氏二极管结构（两边过渡区需要重掺杂，电阻小）