

辐射固体物理学导论

林理彬摇编著

四川出版集团·四川科学技术出版社

前摇摇言

摇摇辐射固体物理学研究各种辐射与各类固体材料相互作用中出现的物理现象,引起的物理效应以及产生的相关物理问题。作为一个新的物理学科的分支,它既是凝聚态物理中一个新的发展方向,又是辐射物理、辐射技术及应用的一个重要方面。

摇摇辐射固体物理学研究所使用的辐射源既包括电磁辐射也包括非电磁辐射,既包括致电离的核辐射也包括致电离的非核辐射。因此可以用传统意义上的粒子、射线为主的辐射,也可以用现在比较热门的强激光辐射,甚至太赫兹的微波强辐射。其研究对象所涉及的固体材料更是多种多样的,按导电性可分为绝缘体、半导体和金属,按结晶状态可分为单晶、多晶和非晶态。还可按功能分类,按化学成分分类,按形态分类……。特别是新型固体如低维材料、纳米材料、复合高分子材料等等,也都成为辐射固体物理研究的对象。

摇摇辐射引起的值得研究的效应有很多,如用于进行生物育种和基因突变的辐射生物效应、用于高分子辐射聚合和交联的辐射化学效应等,而辐射固体物理主要研究辐射与固体相互作用中产生的位移损伤、电离效应以及力学、热学、光学和电磁性能变化的物理效应。

摇摇辐射固体物理是辐射物理和固体物理之间的一门交叉学科,在航空航天、国防科技、核能工业、高新材料等诸多领域具有重要的应用价值和实际的科学意义。例如,空间飞行器在空间运行中要经受高能高密度的轻、重粒子和射线的辐射,航天器上所用材料及器件,特别是电子元件的辐照效应及其在辐射环境中应用时的可靠性的分析与研究,对航天器的安全运行和精确控制至关重要,同时对核能工业及核武器发展等国防建设也很重要。又如利用固体辐照效应的基本原理对固体材料、固体器件进行改性及抗核加固,都在实际应用中有重大意义。

摇摇本书共分六章。前三章主要阐述了各种辐射源、辐射与物质相互作用形式、离子注入、位移损伤以及电离效应等基础知识,并特意加入了固体能带论及半导体的相关知识,使得半导体的辐照效应更易理解。后三章按固体材料的不同导电类型讨论了半导体、绝缘体和金属的辐照效应,并考虑三类材料各自对辐照响应的敏感性有不同的特点,结合半导体、绝缘体、金属的辐照效应,分别讨论了辐照导致电学性质,光学性质和力学性质的变化。在半导体辐照效应中,还着重讨论了半导体的辐射敏感特性、激光辐照半导体、核反应和嬗变掺杂以及半导体在核探测中的具体应用等。在绝缘体的辐照效应中,主要讨论了辐照诱导电子性缺陷和辐照致变价、离子晶体的离子性辐照缺陷、共价晶体的辐照效应以及辐照赋色和抗辐照变色等具体应用。在金属及合金的辐照效应中主要讨论了金属及合金的辐照损伤形态、辐照对金属与合金力学性能的影响、金属中的辐照致相变和辐照对记忆合金相变的影响。本书尽力突出两个特点:一是作者有意在书中举出许多具体例子作为参考,帮助读者对基础知识的理解;二是作为一本专业性较强的书籍,作者希望在书中能反映一些成熟的近期科研成果,其中也包括了少许作者所在科研组与合作单位的研究工作。

摇摇本书可作为高等院校相关专业的研究生教材,也可供从事辐射固体物理研究的相关技术人员参考。由于篇幅所限,书中没有过多地涉及辐射固体物理的具体应用、辐照缺陷的测试分析方法和相关仪器。

摇摇本书是作者在多年从事辐射固体物理教学与研究的成果的基础上撰写成稿。在撰写过程中听取了不少老师同学的意见和建议,在此一并感谢。此书作为辐射固体物理首部专门性的参考书,错误及不足之处在所难免,敬请读者指正。

林理彬

二〇一四年 四月于四川大学

目 录

第一章 辐射物理基础	1
第一节 常用辐射源、辐射环境及辐射剂量	1
一、放射性核素辐射源	1
二、加速器粒子辐射源	2
三、反应堆辐射源	2
四、空间辐射及核爆辐射环境	2
五、常用的辐射量	2
第二节 辐射对物质的主要作用方式	3
一、库仑作用	3
二、电磁作用	3
三、核反应	3
第三节 辐射粒子束的穿透行为	3
一、能量损失	3
二、射程、投影射程和标准偏差	3
第二章 辐射位移损伤与离子注入	3
第一节 辐射位移过程	3
一、位移过程的描述	3
二、位移原子数与级联碰撞	3
三、菲林理论简介	3
第二节 辐射位移损伤缺陷	3
一、点缺陷及其迁移	3
二、复合缺陷及无定形损伤区	3
第三节 辐射离子注入物理	3
一、离子注入装置及结构	3
二、非晶靶中注入离子的射程分布	3
三、沟道运动及单晶靶中注入离子的射程分布	3
四、离子注入损伤	3
五、退火效应	3
六、辐射增强扩散效应	3
第四节 辐射位移损伤的相关性	3
一、位移损伤缺陷对宏观参数的影响	3
二、中子、质子和电子的相对损伤	3
第三章 辐射电离效应	3

摇第一节摇能带论基础	150
一、能带的形成	150
二、载流子与非平衡载流子	150
摇第二节摇辐射致电离产生非平衡载流子	150
一、辐照产生非平衡载流子	150
二、非平子的复合和寿命	150
三、俘获现象与俘获截面	150
摇第三节摇非平衡电导率	150
一、电导率及电导率系数	150
二、晶体材料中非平子的输运和迁移率	150
三、非平子的扩散	150
四、非晶固体中非平子的输运和迁移率	150
摇第四节摇剂量增强效应	150
第四章摇半导体的辐照应用及其物理问题	150
摇第一节摇半导体的辐照敏感特性	150
一、半导体中辐照诱导的缺陷及缺陷态	150
二、各种粒子束(射线)辐照半导体的情况	150
三、辐照对半导体物性的影响	150
摇第二节摇激光辐照半导体	150
一、激光与半导体基本的相互作用	150
二、激光辐照缺陷	150
三、激光致再结晶	150
四、自由电子激光辐照半导体	150
摇第三节摇核反应和嬗变掺杂	150
一、 γ 射线引起的光核反应	150
二、中子嬗变掺杂	150
摇第四节摇半导体核探测器及其原理	150
一、半导体核探测器的基本原理	150
二、几种常用的半导体探测器的性能	150
第五章摇绝缘体的辐照损伤及其影响	150
摇第一节摇辐照诱导电子性缺陷	150
一、碱卤化物晶体中的电荷再分配	150
二、刚玉晶体中杂质的辐照变价	150
摇第二节摇离子晶体的离子性辐照缺陷	150
一、碱卤化物晶体中离子性辐照缺陷	150
二、色心的浓度	150
三、配位和键中的缺陷	150
四、辐照引起结构的变化	150
五、电导率的变化	150

六、力学性质的改变及其他效应	四九
摇第三节摇共价晶体的辐照效应	四九
一、典型的共价晶体及其特性	四九
二、金刚石的辐照效应	五〇
三、二氧化硅系统的辐照效应	五一
摇第四节摇辐照赋色及抗辐照变色	五二
一、宝石的辐照改性机理	五二
二、天然宝石辐照改性的要求	五三
三、镁铝尖晶石的抗辐照变色	五四
摇第五节摇绝缘体—半导体界面的辐照效应	五五
一、绝缘—半导体界面的辐照效应	五五
二、半导体—半导体的辐照效应	五六
第六章摇金属及合金的辐照效应	五七
摇第一节摇金属与合金中辐照损伤形态及损伤参数	五七
一、点缺陷	五七
二、其他辐照缺陷	五八
三、位移阈能,位移原子数,损伤函数和 当量	五八
摇第二节摇辐照对金属与合金性能的影响	五九
一、金属及合金的电阻及电阻率	五九
二、辐照引起肿胀	六〇
三、辐照蠕变	六一
四、辐照硬化和辐照致脆	六二
五、辐照损伤的回复	六三
摇第三节摇辐照对相变的影响	六四
一、辐照对固溶体相状态的影响	六四
二、辐照改变形状记忆合金相变特性	六五
三、辐照对金属—非金属相变的影响	六六
摇第四节摇在核反应堆中的锆合金	六七
一、锆和 锆合金的主要特性	六七
二、辐照损伤和辐照效应	六八

第一章 辐射物理基础

习惯上,将那些在各种放射性原子核衰变和核反应过程中产生的从原子内或原子核内释放出来的粒子(包括 γ 射线)称为核辐射。所有的核辐射都是电离辐射,也就是说,核辐射能够直接地或间接地(通过某些次级过程)引起物质的电离。但电离辐射并非全是核辐射,如原子退激发和韧致辐射产生的载射线就不属于核辐射。除了电离辐射外还有非电离辐射,如光(包括红外光、可见光及紫外光),因其能量低(几个 eV)不足以引起电离故称为非电离辐射。本书讨论的辐射包括电离辐射和非电离辐射。所涉及的辐射源包括电子、重带电粒子(α 粒子、质子、重离子)、不带电粒子(主要是中子)和电磁辐射(载 γ 射线和光)等。

用辐射源辐照固体物质使辐射“粒子”与固体发生相互作用。研究这些相互作用最基本的能量、动量以及其他形式的变化是本章的主要内容。

第一节 常用辐射源、辐射环境及辐射剂量

核辐射源中最简单方便的辐射源就是放射性核素辐射源,即通常所称的放射源,另一种就是加速器或反应堆辐射源。关于非核辐射源,这里只着重介绍同步辐射源及自由电子激光辐射源。本节除了常用的辐射源外尚要简单介绍常用的辐射剂量和有关的辐射环境。

一、放射性核素辐射源

早在 1896 年亨利·贝可勒尔(Henri Becquerel)发现铀元素无论处于何种化学状态,并且不经过活化,始终发射出穿透性的辐射。1903 年居里(居里夫妇)发现镭之后,镭一直被作为 γ 辐射源用于实验和射线治疗,直到二次世界大战以后,才被更廉价的⁶⁰Co 所代替。地球上最大的辐射源是“运”“战”“战”和“栽”地壳里“运”发射的总能量估计是 10¹⁶ W。这些都是天然的放射源,如果没有天然放射性所产生的热量,地球将会比现在冷得更快。此外,当辐射能最后转化为热能之前,必须产生物理和化学变化,其中某些效应对地球的演变或生命起源都可能具有重大意义,例如,放射性辐射可能在一定程度上与发展为生命的有机化合物的形成有关^[1]。又如天然放射性引起某些矿物的辐射损伤,用热释光技术可读出其所记载的历史年代,成为现代技术考古学的依据之一^[2]。

天然存在的约有 30 种放射性同位素,其中有 8 种是稳定核素。另有 22 种为人造核素。这些放射性核素,绝大多数放射 β 射线,电荷数在 1~10 的放射性核素有些放射 α 射线,同时往往又伴随放射 γ 射线或特征载射线,也有少数核素只放射纯 γ 射线,纯 β 射线以及纯 α 射线的。

放射性原子是不稳定的,通过放射出 α 粒子或 β 粒子而自发地转变成另一种元素的原

子,称为衰变或蜕变。这种放射性衰变是一种自发过程,不受外界的温度、压力、电场、磁场等元素存在环境的任何影响。例如铀原子核(在越南)可衰变成钍原子核(在越南)同时放出一个 α 粒子,称为 α 衰变,可表示为



α 衰变的一般表示式为



式中 Z 为原子序数 (核电荷数), A 为原子量。

而 β 衰变则可有三种方式



如铀原子核(在越南语为铀)衰变成钍原子核(在越南语为钍),金原子核(在越南语为金)衰变成铂原子核(在越南语为铂)以及铀原子核(在越南语为铀)俘获其原子中一个 运层电子(藻)衰变成锂(在越南语为锂)分别属于以上三种方式。以上表示式中的 藻或 β^+ , β^- , $\bar{\nu}$ 及 ν 分别表示电子、正电子、反中微子和中微子。

由于自发的放射性衰变过程,放射性核素最终转变为稳定的、不再发出射线的另一种元素的原子。为了描述这一衰变过程,设在 $t=0$ 时刻有 N_0 个放射性原子 [核], 在 t 时刻有 N 个放射性原子, 由于随着时间的增加, 经过 t 时间有 $N_0 - N$ 个原子发生衰变, 则

原暈∞暈物搖搖搖 原暈越暈城 (員愛原)

式中负号是表示量随时间 t 的增加而减少, λ 为比例系数称为衰变常数, 量纲为秒⁻¹。

积分 (积分原式)

$$\int_{\text{暈園}}^{\text{暈}} \frac{\text{暈}}{\text{暈}} \text{越} \int_{\text{園}}^{\text{賊}} (\text{原} \wedge \text{賊})$$

$$\text{暈原} \text{暈} \text{越原} \wedge \text{賊}$$

则得摇摇摇摇摇摇晕越晕藻 (员分)

当 $\frac{\text{晕}}{\text{圆}}$ 减少到一半, 即 $\frac{\text{晕}}{\text{圆}} = \frac{1}{2}$ 时, 可得 $\frac{\text{贼}}{\text{贼}} = \frac{\text{盗}}{\text{盗}}$ (见原图)

衰变半衰期。这是一个重要参数,标志了放射性核素的物理性质,即 N_0 个核素减少到一半所需的时间,也可视为某个核素的放射性减为一半的时间。由于衰变规律是一个统计规律,单个核的寿命有长有短,在 $T_{1/2}$ 时间间隔内有 $N_0/2$ 个核衰变了,也就是说有 $N_0/2$ 个核的寿命为 $T_{1/2}$ 。全部 N_0 个核的寿命之和应为 $T_{1/2} \cdot N_0$ 。则可得 N_0 个核的平均寿命为 τ 。

τ 越^員_羣 越^員_羣賊原羣 越^員_羣賊入藻^員_羣 越^員_羣賊藻^員_羣 越^員_羣賊越^員_羣 (員愛原羣)

由此可以知道衰变常数实质上决定于平均寿命。

使用放射源时,除了需要知道核素的名称、放射的射线种类以及半衰期以外还可从衰变纲图上查到发射粒子的能量或最大能量、衰变分支比(母核衰变到子核的不同能级,相应发

射粒子可不止一组,各组所占有的百分比即分支比)。另外就是放射性活度(单位时间内核的衰变数)、比活度(单位质量的活度或单位体积的活度)和放射源的形状都可以从放射源的产品说明书上找到。一般放射源很少是某种纯的放射性核素,而是有载体的,大多以某种化合物形式存在。例如⁶⁰Co放射源一般是以⁶⁰Co的²Na²SO₄·⁷H₂O的点状或平面源形状,同时其形态可以是气体、液体、粉末或固体。辐照场用的⁶⁰Co源则是用金属钴经反应堆辐照而制得,为若干条形、棒形组成的平板圆柱形,以使辐照剂量分布均匀。

表 1 常用 α 放射源

核摇摇素	半衰期 栽	耘(耘戮)	分支比 (豫)
 马燥	员怨戮怨 苗	缘戮缘	怨戮怨
 砸葬	员怨园 赠	源戮缘 源怨园	怨戮缘 缘戮缘
 战	员戮园伊员 赠	源怨园 源戮园	愿戮源 员戮园
 战	苑戮怨伊员 赠	源戮员 源戮缘	缘戮员 员
 战	源戮怨伊员 赠	源戮远 源戮怨	苑戮 园
 马怎	愿戮源 赠	缘戮怨 缘戮苑	苑戮 园
 马怎	园戮园 赠	缘戮缘 缘戮猿 缘戮猿	苑戮 员戮员 员戮缘
 皂	源戮 赠	缘戮远 缘戮猿	愿戮园 员戮愿
 隹	员戮愿 苗	远戮猿 远戮园	苑戮员 园戮怨
 隹	员戮员 赠	缘戮缘 缘戮猿	苑戮苑 园戮猿
 隹	园戮苑 赠	远戮愿 远戮远	愿戮源 员戮缘

摇摇常用的 α 放射源如表 员源原所示。表中列出的分支比不全,只列出了分支比较大的那些 α 粒子的发射。以 ^{226}Ra 为例,它是现在的商品 α 源,是 ^{226}Ra 的 β 衰变子体核素,其衰变纲图如图 员源原所示。 ^{226}Ra 衰变到 ^{222}Rn 的基态记为 $\alpha_{\text{基}}$,其分支比为 园豫, α 粒子的能量为 缘源原 耘。衰变到 ^{222}Rn 的第一激发态、第二激发态及第三、第四激发态各记为 $\alpha_{\text{员}}$, $\alpha_{\text{圆}}$, $\alpha_{\text{猿}}$ 和 $\alpha_{\text{源}}$ 。图中给出了各种 α 粒子的能量和分支比,其中 $\alpha_{\text{基}}$ 的分支比最大为 园豫,能量为 缘源原 耘。其次是 $\alpha_{\text{猿}}$ 的分支比为 员豫,能量为 缘源原 耘。因此在表 员源原中只给出这两支。图 员源原中也标出了 ^{222}Rn 的五个能级的能量、自旋和宇称。这

里也发射有多种能量的 γ 射线，其中能量为 $25-0$ 和 433 的 γ 射线是很重要的，图 $10-10$ 给出了 ^{241}Am 发射的 α 粒子能谱。

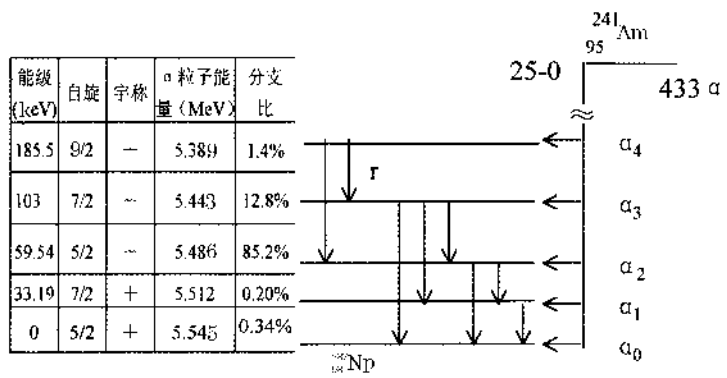


图 $10-10$ ^{241}Am 衰变纲图

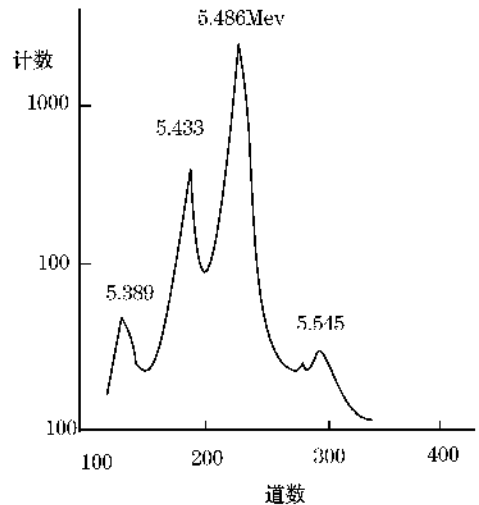


图 $10-11$ ^{241}Am 的 α 粒子能谱

常用的 β 放射源列在表 $10-1$ 中，其中 β 粒子能量是指它的最大能量 E_{β} ，这能量近似等于衰变能 Q_{β} 。表中还列出主要伴随放射的 γ 射线的能量 E_{γ} 。以 ^{60}Co 为例，其衰变纲图如图 $10-12$ 所示，图中 ^{60}Co 衰变到 ^{60}Ni 的 β 衰变的分支比为 100% ， β 衰变还伴随有 γ 射线，其能量为 0.041 和 0.133 MeV。

常用的 β^+ 放射源列在表 $10-2$ 中。凡是能够发射正电子的放射性核素，均可能发生轨道电子俘获 (EC)，但是能发生电子俘获的核不一定能发生 β^+ 衰变。以 ^{11}C 为例， ^{11}C 通过 β^+ 衰变成为 ^{11}B 有三条途径： β^+ 衰变过程，占 99.9% 。伴随发射中微子 ν ； β^+ 衰变占 99.9% ，所发射的 β^+ 粒子的最大能量为 0.96 MeV； β^+ 衰变占 0.01% ，其最大能量为 0.96 MeV。 ^{11}C 的衰变纲图如图 $10-13$ 所示。

源

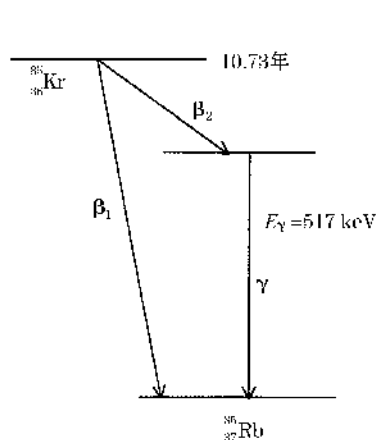


图 1 爨原彝¹ 逆戟变纲图

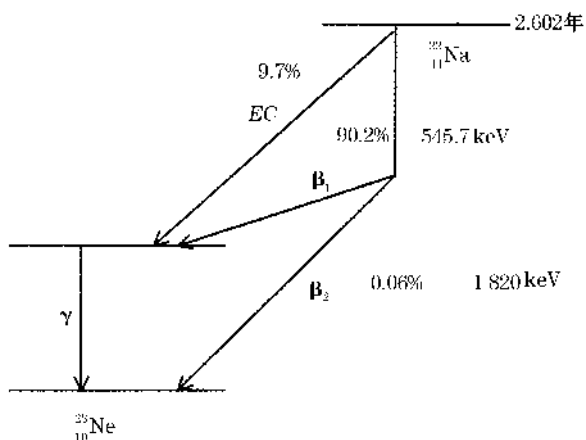
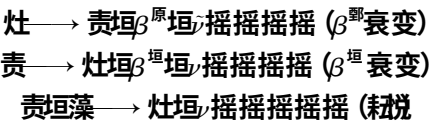
图 1 炭原脛^①羧基衰变纲图

表 1 为原素常用 β 放射源

核素符号	半衰期 栽	β 粒子最大能量 耘 (噪敦)	伴随 γ 射线能量 耘 (噪敦)
匀	匀源猿赠	匀源近	
悦	缘远圆赠	员缘	
粤造	圆园猿猿皂	圆愿缘	员苑圆苑
孕	员源远凿	员源	
悦群	员猿凿	圆愿	
猿糟	愿猿凿	猿苑	员源圆缘 愿猿圆
灾	猿猿远皂	圆源园	员源源
蚤	怨赠	远	
远则	员源猿赠	远圆	缘苑
远则	圆愿员赠	缘远	
再	远源噪	圆圆圆	
在则	远源凿	猿远	苑源
蚤遭	猿猿缘凿	员园	苑远
酝噪	远远噪	员园源	
栽糟	圆源猿开 赠	圆园	
陨	愿园源凿	远远缘	猿源缘
悦群	员猿源凿	猿员	愿愿缘
苑	圆源圆赠	圆缘	员圆
粤怎	圆源凿	员猿猿	源圆
匀屏	源猿猿凿	圆源	圆怨
粤造	猿猿猿赠	苑猿	

摇摇无论是 β^- , β^+ 衰变过程还是电子俘获过程,其本质是在于原子核内质子—中子相互转

化。



γ 射线放射源是应用最广泛的放射源。如表 1 所列,其中 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 是常用的 γ 源, ^{60}Co 通过 β^- 衰变成 ^{60}Ni 再发射 γ 射线,其衰变纲图如图 1 所示, ^{60}Co 的半衰期为 5.26 年,它发射两组 β^- 粒子。 β_1 的分支比为 99.74%,最大能量为 1173 keV; β_2 的分支比为 0.26%,最大能量为 1332 keV。 ^{60}Co 有两组 γ 射线, γ_1 的能量为 1173 keV (1173 keV), γ_2 的能量为 1332 keV (1332 keV)。如果钴源是 ^{60}Co 它经轨道电子俘获或 β^+ 衰变而成为 ^{60}Ni 的激发态有 5 个,其 γ 跃迁多达 5 种, γ 射线能量大于 100 keV 的就有 5 种,这是用作高能 γ 射线的源。如果能量在 100 keV 以下的 γ 射线源,是一种低能 γ 源,也是一种低能光子源,当放射性核素衰变时,如果子核处于激发态,则通过 γ 跃迁回到基态, γ 跃迁的方式之一是发射 γ 射线。

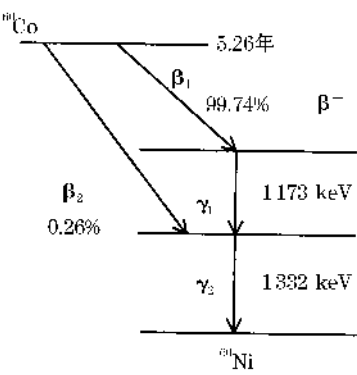


图 1 ^{60}Co 衰变纲图

表 1 ^{60}Co 常用 β^- 放射源

核素	载体	材料 (载体)	材料 (载体)
^{60}Co	金属钴	金属钴	金属钴
^{60}Co	金属钴	金属钴	金属钴
^{60}Co	金属钴	金属钴	金属钴
^{60}Co	金属钴	金属钴	金属钴
^{60}Co	金属钴	金属钴	金属钴
^{60}Co	金属钴	金属钴	金属钴
^{60}Co	金属钴	金属钴	金属钴
^{60}Co	金属钴	金属钴	金属钴

表 2 ^{60}Co 常用的 γ 放射源及用途

核素	用途	活度 (Bq)	制作方式
^{60}Co	工业辐照	$10^4 \sim 10^6$	金属钴, 铈玻璃, 氯化铯
	γ 照相、探伤	$10^4 \sim 10^6$	金属钴, 铈陶瓷
^{137}Cs	医疗辐照	$10^4 \sim 10^6$	铯化合物
	工业仪表	10^4	铯陶瓷
	各种 γ 源	$10^4 \sim 10^6$	点源、面源

表 1.1 铀-238 衰变链中内转换电子源

核素 (母核)	电子能量 (keV)	壳层	强度 (%)
²³⁸ U	4.27	L	1.4
²³⁴ Th	2.04	L	0.06
^{234m} Pa	2.04	L	0.06
²³⁴ Pa	2.04	L	0.06

铀-238 衰变链中内转换电子源可发射六组内转换电子。它先通过 α 衰变到 ²³⁴Th 而 ²³⁴Th 有五组 γ 跃迁,因此也可发射五组 γ 射线。发射 γ 射线或发射内转换电子是相互竞争的过程,决定于发射几率。

当快速电子打在重元素的靶物质上,由于电子和原子核库仑场间的强烈相互作用,电子被减速,同时将其一部分能量转为电磁辐射,即 轫射线。这种由高速电子速度改变时所产生的连续能谱的电磁辐射称为轫致辐射。常用的轫致辐射源由表 1.2 列出。

表 1.2 常用轫致辐射源

核素	半衰期	靶	能量 (keV)
²²⁶ Ra	1600 年	Al	4.8~5.0
²²⁸ Ac	6.7 年	Al	4.8~5.0
²²⁸ Ac	6.7 年	Al	4.8~5.0
²²⁸ Ac	6.7 年	Al	4.8~5.0

二、加速器粒子辐射源

用各种加速器加速各种带电粒子如电子、质子、氦核, α 粒子以及到铀的全部元素的离子使这些粒子的能量可调,从几十 keV 到几十 MeV 甚至几 GeV 而且辐射强度大,束流可从几十 μ A 到几 mA,即注量率可达 10^{14} ~ 10^{16} cm⁻²s⁻¹ 数量级。比放射性同位素辐射源发射的粒子种类多得多,强度也大,能量又可调,作为科学研究,材料改性、探伤、医疗的应用以及进行工业辐照都具有更大的优越性。研究固体的辐照效应往往需要能量可调、强度可变的粒子束,因此加速器粒子辐射源是不可缺少的。

产生辐射的大多数加速器按同样的原理工作。灼热灯丝用来产生电子,或借放电来产生正离子如氦、氖或氢离子,然后用电场加速这些带电粒子使之通过真空向靶行进。

轫射线可以用任何电子加速器产生的电子打到一个高原子序数的靶上来得到。这种方法产生的 轫射线(轫致辐射)具有连续的能量,最高能量为所用以轰击的电子的能量。同样的原理也适用于通常的低电压 轫射线装置。在许多 轫射线装置里用固定电场加速电子,但也可用交变电场来产生快速波动的 轫射线束。这种 轫射线的能量取决于所用电压的峰值。

中子束的获得可以用产生辐射(如氦核或高能 轫射线)的加速器通过适当粒子束与靶

材料的核反应来产生。典型的反应是 $^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow \text{碎片} + \gamma$, $^{238}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow \text{碎片} + \gamma$ 等。

下面简要的介绍几种类型的加速器^①：

(一) 静电加速器

以图 1-1 所示的电子静电加速器为例,图中的环带用来带动电荷对静电场的运动。装置上有一排针尖和光滑平板,它们之间有几千伏的电势差可以对绝缘环带喷电,环带把电荷带到金属球壳内部,球内的放电针尖把电荷取下来转移到金属半球上,金属半球与外面的钢桶用高压气体绝缘,在连续不断地运转中,金属球的对地电势达到一个限度。通过真空加速管,半球与加速器底部之间的高电势差来加速带电粒子。又可用磁扫描法使带电粒子束呈宽束经过窗口辐照样品。这种加速器能产生 $10^6 \sim 10^7 \mu\text{A}$ 的电子流,但由于绝缘困难而使上限受到限制,束流最大可达几百微安,如用质子流时只有 $10^{-6} \sim 10^{-7} \mu\text{A}$,用电子流几乎可达 $10^{-6} \sim 10^{-7} \mu\text{A}$ 。

(二) 直线加速器

直接把电压加到加速管的办法使粒子加速到很高能量是很困难的。如果用一个不很高的电压把粒子重复地加速,这样积累起来的总能量就可以达到很高。这就是直线加速器所根据的原理,它可以用来加速电子或重离子。如图 1-2 所示,在真空室内有一系列金属圆管,称为漂移管,其中每一个的长度依次逐渐增加。排列在单数及双数位置的圆筒各自连结在一起成为两组,然后它们又和高频振荡器的两端相连。入射粒子只是在接近或两管之间的间隙中时受到电场的作用。而在漂移管中,由于没有电场作用,它们以匀速前进。只要我们准确的确定各管的长度,使得在第一个间隙中能量增加的粒子能准时到达其他各个间隙而获得能量增加。如果要增加粒子最终的能量,可以增加加速管的节数或加速管的总长度以及采用增加振荡器的频率和电压的办法。

采用直线加速器来加速电子则为电子直线加速器,一般能量都在几百 MeV 的数量级,现在已有加速到 $10^6 \sim 10^7 \text{ MeV}$ 的电子直线加速器,它的总长度为 $10^3 \sim 10^4 \text{ m}$ 左右。也可设计电子直线加速器的能量不很高,但束流很强,以利用它来产生快速中子,或用来作为产生强度很大的 γ 射线的辐射源。

(三) 串列静电加速器

如果我们把能量约为 $10^6 \sim 10^7 \text{ eV}$ 的阴离子从加速器外的一个装置注入到静电加速的加速管中,使它加速后趋向高电压端。在那里通过薄膜或低压气体以剥离电子,阴离子就成为阳离子。然后阳离子再加速到接地电位,这样对质子或氦核就能获得端电压相应能量的两倍,如果加速多电荷离子,第一阶段离子所带电荷为 q ,第二阶段离子所带电荷为 $2q$,加速离子所获得的能量将等于端电压相应能量的 $(2q/q)$ 倍。

我们可以用一台有阴离子出射的静电加速器作为注入器,把已经加速了的阴离子注入串列静电加速器再加速,这就形成三级加速,最后可提供高能量的离子,如有的三级静电加速器可提供 $10^6 \sim 10^7 \text{ MeV}$ 的质子和氦核 $^{2\text{He}}$ 离子和 $^{3\text{He}}$ 离子以及 $^{12\text{C}}$ 的 $^{12\text{C}}$ 离子等。

(四) 高压倍加器

它利用电压倍增产生高压来加速质子、氦核等,一般设计为 $10^6 \sim 10^7 \text{ MeV}$,束流为几十 μA 到几十 mA ,如果加速 ^{235}U 等离子则可作为半导体器件的离子注入机,如果加速氦核,通过氦-氟反应则可作为中子能量最高的单能中子源,中子能量可达 $10^6 \sim 10^7 \text{ MeV}$ 。

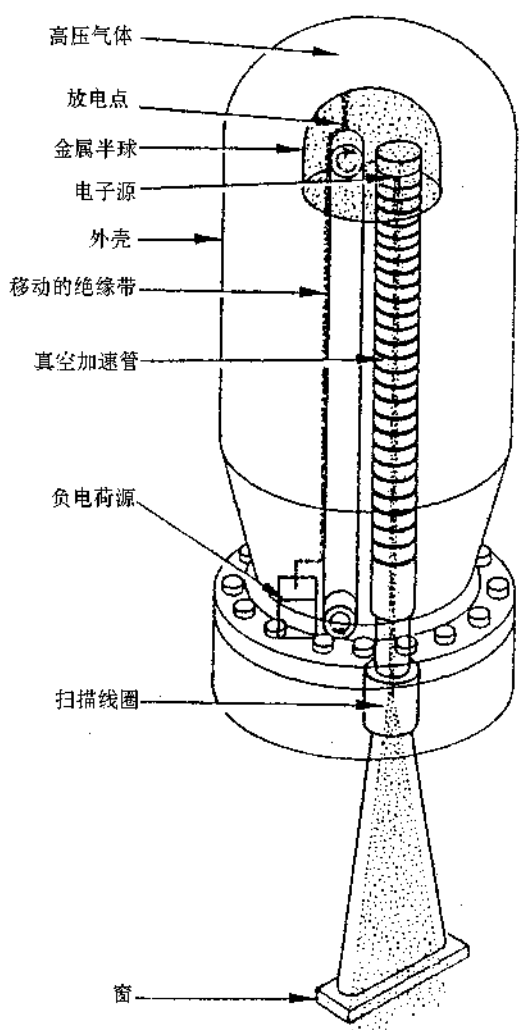


图 员员原瑶范德格喇夫电子加速器

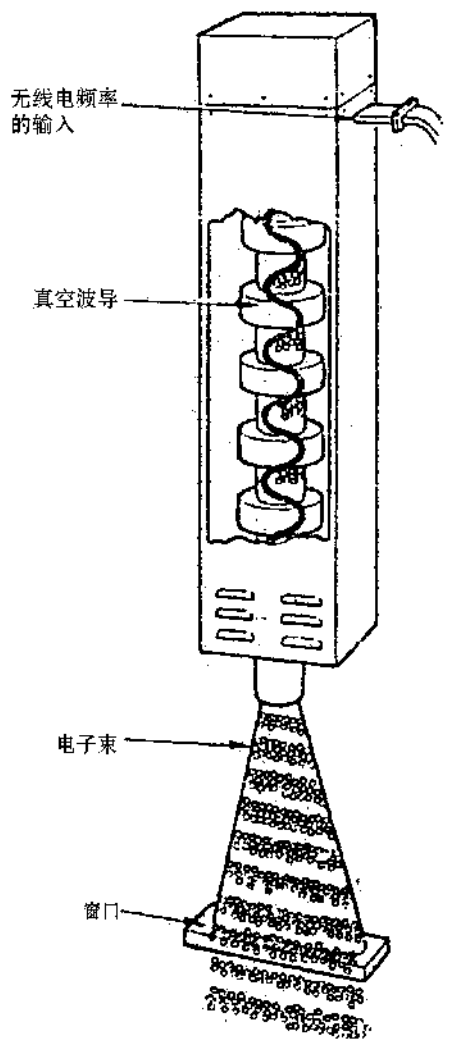


图 员员原瑶直线加速器

圆缘瑶回旋加速器

(缘 回旋加速器

它是一种产生能量高达几十 兆 的电子束的优良加速器。图 员员原瑶给出了一个常规的回旋加速器、正离子是在“ 阅”形的两个平板半圆形铜盒(称 阅形盒)间的空隙中产生的。正离子由电场加速,进入一个 阅形盒,并由安放在 阅形盒上方和下方的电磁铁使其在 阅形盒内按半圆轨道行进。当离子回到空隙时再被相反的电场加速,穿过空隙再次在 阅形盒内转圆圈,此次因它们的速度较前次大就有略大一些的半径。在 阅形盒之间的高频电压作用下,此过程继续发生,直至离子按螺旋形转到一个带负电荷的偏转板,它使离子束通过出口,来到 阅形盒外,然后离子束通过真空室内的薄窗引出回旋加速器。

改进型的回旋加速器,如同步回旋加速器可得到高达几 兆 能量的离子束。

(远 电子感应加速器

电子感应加速器是用来加速电子的,它利用电磁铁中磁通量的改变来加速电子。同时

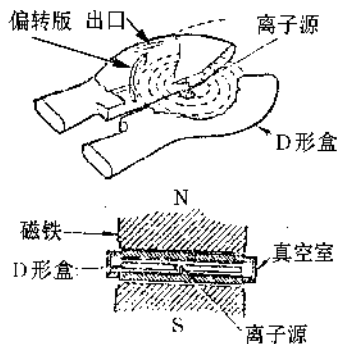


图 员员原员 回旋加速器

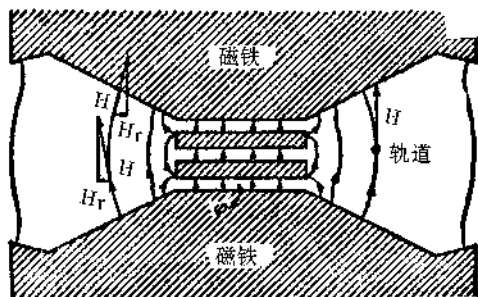


图 员员原员 电子感应加速器所采用的电磁铁的截面

把电子的运动固定在一定的轨道上,电子沿着轨道转动时所受到的平均力等于电磁场所作的功除以所经过的距离。从另一方面说,这也就是动量的变化率应满足一定的关系,如果对电磁铁的磁极面作一定的修正,那末在这样的磁极间隙中就可以找到一个符合要求的运动轨道,也就是电子运动轨道的位置处在磁极间隙中的环状真空室内,如图 员员原员 所示。电磁铁每秒激磁几百次,激磁电流在一定方向从零增加到最大值时,电子就受到加速。

利用电子感应加速器进行原子核物理研究时,多半采用使加速电子撞击内靶产生 载射线的办法。高能 载射线对于研究光核反应、辐射治疗等应用上都是非常有用的。

在电子感应加速器和其他圆周轨道的加速器中被加速电子的辐射损失是很严重的,这种辐射损失一般称为同步辐射。同步辐射把圆周形轨道加速器加速电子可能达到的能量限制在几个 兆电子伏以下,在加速重粒子时,因为它们的质量大,这个极限要高得多。同步辐射是以一个小锥角向前发射的而且辐射是椭圆偏振的它具有连续分布的光谱特性。一般分布在可见光到 载射线的范围内,其辐射总强度可达 瓦特。而且其发射的是短于毫微秒的脉冲。又因为是在超高真空中形成的,是一种纯度极高的光源。作为光源,同步辐射在化学,生物学,固体物理等的应用非常广泛。

(苑) 对撞机

这本是一种用以高能粒子物理实验的。为了得到更高的粒子轰击能量便利用两束高能粒子的互相碰撞,通过计算可知,如两束 兆电子伏的质子束互撞时,质心系能量就可得 兆电子伏。实验上首先是把从高能加速器引出的粒子束一股一股地注入环形真空室(储存环)储存起来,积累到一定数量后就让它们在某些位置互相碰撞。

高能加速器引出的粒子束注入到一个环形真空室后,在导引磁场的作用下长时间的回旋着。以西欧原子核中心的 费米对撞机 为例,其环形真空室平均直径为 兆米。从加速器引出的粒子(其能量为 兆电子伏)经过 兆米的输运分别进入两个畸变的接近圆形的轨道,在 兆米处相交。

目前运用的对撞机以 费米对撞机为主。虽然电磁相互作用产生的强子的截面小得多,但 费米对撞机有亮度大,束流比较单纯,强子本底小等优点。世界上曾经建成的当时最大的正负电子对撞机(建于 西欧核子中心),实际上是由很多加速器一级一级串接而成的一个庞大的复合体。它的加速器链是: 质子- 质子- 质子- 质子- 质子,见图 员员原员。