

# 前 言

辐射物理是研究辐射环境生成与模拟、辐射测量与诊断、辐射效应与抗辐射加固技术的科学，涉及核科学与技术、电子科学与技术、材料科学与技术等多个学科交叉，主要研究材料、电子元器件与系统的抗辐射加固问题，为提升电子材料、元器件、系统的抗辐射能力提供技术支撑。

经过长期发展，我国在辐射物理研究领域建立了较为完备的研究体系，具有比较坚实的研究基础，形成了一支经验丰富的研究队伍。

为进一步促进我国辐射物理的研究，在国家自然科学基金委员会数理科学部主任基金（项目批准号：11345007）的支持下，组织召开了“我国辐射物理方向发展战略研讨会”，来自国内 30 余所大学及科研院所的 60 余位专家参与了研讨。研讨会分析了国内外辐射物理的发展趋势、最新理论与实验技术，梳理出我国辐射物理方向发展需要研究的基础科学问题。

本书是在战略研讨会的基础上，结合国家自然科学基金重大项目“纳米器件辐射效应机理及模拟试验关键技术”（项目批准号：11690040）的研究成果整理形成的。为使读者对辐射物理有一个完整的概念，便于不同层次的读者阅读，特增加了“概述”部分，重点介绍辐射物理的相关概念。

本书第 1 章由陈伟研究员与杨海亮研究员执笔撰写，第 2 章由邱爱慈院士与杨海亮研究员执笔撰写，邱孟通、丛培天、陈维青、盛亮、来定国、尹佳辉、王亮平、吴坚、孙凤举、吴刚、孙剑锋等提供素材；第 3 章由夏佳文院士执笔撰写，唐传祥、柳卫平、吴宜灿、马燕云、杨建成、石健、刘杰等提供素材，杨海亮研究员补充了参考文献；第 4 章由欧阳晓平院士、陈亮副研究员、刘金良副研究员执笔撰写，王宇钢、龚建、曾超、郑春、郭刚、谢彦召、胡华四、王铁山、杨朝文等提供素材；第 5 章由陈伟研究员、郭红霞研究员、王祖军研究员执笔撰写，谭满清、

贺朝会、于庆奎、张文仲、张巧云、刘杰、郭刚、杨筱莉等提供素材；第 6 章由谢彦召教授执笔撰写，马弘舸、曾超、邓建红、程引会、石立华、张建军、王庆国、罗建书、郭春营、陶灵姣、刘青、田春明等提供素材；第 7 章由曾超研究员执笔撰写，许献国、林东生、杨善潮，李楠、张力、王敏、尚爱国、王铁山等提供素材；第 8 章由王立研究员和曹洲研究员执笔撰写，冯煜芳、刘红侠、贺朝会、胡华四、谢彦召、杨生胜、于庆奎、华更新、赵元富、岳素格、卫新国、郭旗、郭刚、曾超、张巧云、杨筱莉、张正选等提供素材。全书由陈伟研究员与杨海亮研究员统稿。

本书的出版得到了国家自然科学基金（项目批准号：11345007，项目批准号：11690040）的支持，在此表示感谢！

西北核技术研究所郭宁、李楠、李婷参与了书稿的整理工作，在此一并致谢。

衷心感谢西北核技术研究所龚建成研究员、中国人民解放军火箭军工程大学尚爱国教授在百忙之中审查了书稿，并提出了具体的修改意见。

由于辐射物理涉及的领域较广，作者学识有限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第 1 章 概述	1
1.1 辐射环境模拟	1
1.2 辐射测量与诊断	3
1.3 辐射效应与抗辐射加固	5
参考文献	8
第 2 章 强脉冲辐射模拟源研究中的关键问题	9
2.1 国内外研究现状及发展趋势	10
2.2 强流脉冲粒子束产生技术	11
2.2.1 强流脉冲粒子束二极管的工作特点	11
2.2.2 强聚焦二极管	14
2.2.3 大面积二极管	16
2.3 Z 箍缩物理	18
2.3.1 Z 箍缩基本物理过程	18
2.3.2 Z 箍缩物理方面需要深入研究的科学问题	19
2.4 高功率脉冲产生与传输汇聚	20
2.5 电磁脉冲辐射源与天线	26
参考文献	26
第 3 章 空间辐射模拟装置发展需求与关键问题	30
3.1 重离子同步加速器相关动力学和技术研究	30
3.2 质子单粒子效应地面模拟装置	36
3.3 高能单色 $\gamma$ 射线源	39
3.4 空间辐射中子环境模拟装置	41
参考文献	43
第 4 章 脉冲辐射测量与诊断技术研究的新技术与新方法	44
4.1 脉冲辐射场的构建	45
4.2 满足特殊场合探测需求的先进辐射探测技术研究	50

4.2.1	大视场时空分辨 X 射线单色成像技术研究	51
4.2.2	用于狭小空间 14MeV 脉冲聚变中子探测新方法	52
4.2.3	器件辐射效应地面模拟试验中质子诊断技术研究	53
4.2.4	低剂量快脉冲 $\gamma$ 射线束测量技术研究	54
4.3	新型先进辐射探测器的研制和研究	56
4.3.1	宽禁带化合物半导体辐射探测器研究	56
4.3.2	气体探测器研制技术	59
4.4	基于辐射效应的测试和诊断	59
4.4.1	核光转换探测技术	59
4.4.2	基于光纤辐射效应的辐射场检测方法研究	61
4.4.3	基于在线测量系统的载能离子辐照损伤机理研究	64
4.5	复杂脉冲辐射场的联合诊断技术	65
4.5.1	编码成像技术及应用研究	65
4.5.2	强电磁场环境对聚变核反应的干扰机制研究	68
	参考文献	69
<b>第 5 章</b>	<b>新材料、新工艺、新器件空间辐射效应研究中的关键问题</b>	<b>74</b>
5.1	需求背景	74
5.1.1	微电子的发展促进了航天电子系统的应用发展	74
5.1.2	新型器件的特点及对空间辐射效应的影响分析	76
5.2	国内外研究现状及发展趋势	77
5.2.1	国外研究进展	77
5.2.2	国内研究进展	80
5.3	需要研究的关键问题	81
	参考文献	84
<b>第 6 章</b>	<b>高功率电磁脉冲辐射环境、效应机理及防护研究中的关键问题</b>	<b>86</b>
6.1	高功率电磁脉冲环境及影响机理	86
6.2	高功率电磁脉冲与复杂电子系统相互作用的建模仿真	90
6.3	高功率电磁脉冲对器件和设备的效应机理研究	93
6.4	高功率电磁脉冲测量、评估和防护新技术	95
	参考文献	96
<b>第 7 章</b>	<b>新材料、新工艺、新器件的核辐射效应与损伤新机理及研究方法</b>	<b>99</b>
7.1	国内外研究现状及发展趋势	99

---

7.2 需要研究的关键问题·····	102
7.3 研究方向和研究内容·····	105
参考文献·····	106
<b>第8章 电子器件与系统加固新技术、新方法、新材料及新的辐射加固性能 评估方法·····</b>	<b>109</b>
8.1 微纳系统及新型纳米材料空间辐射效应评价方法及防护理论·····	109
8.2 空间高性能电子系统单粒子效应测试新方法研究·····	112
8.3 空间高压大功率系统辐射效应试验评价方法及防护理论·····	114
8.4 强电磁环境下航天器损伤评价和加固技术基础研究·····	116
8.5 脉冲激光单粒子效应模拟试验方法基础理论研究·····	119
8.6 纳米集成电路的辐射可靠性与加固方法研究·····	122
参考文献·····	124



# 第 1 章 概 述

本章主要介绍辐射物理研究领域涉及辐射的来源、种类与特点、辐射模拟的主要技术手段，辐射测量与诊断的特点，主要的辐射效应种类与抗辐射加固技术的概念等<sup>[1-11]</sup>。

## 1.1 辐射环境模拟

辐射物理研究中涉及的辐射环境主要有天然辐射环境和人为辐射环境。天然辐射环境又可分为空间辐射环境与大气辐射环境。天然辐射环境研究的重点是宇宙射线及次生辐射，宇宙射线主要包括银河宇宙射线、太阳宇宙射线、范艾伦辐射带、太阳风、等离子体等多个来源，并且与太阳活动及地磁活动密切相关；次生辐射主要是指宇宙射线导致的大气辐射环境中的质子、中子、重离子等。人为辐射环境主要指核爆辐射环境、加速器产生的辐射环境和人工放射性等。

银河宇宙射线是指来自宇宙空间的辐射，大约 89% 的宇宙射线是质子，10% 是  $\alpha$  粒子，1% 是重元素离子，较多为碳、氧、钠、镁、硅、硫、钙和铁等离子， $\alpha$  粒子的数量约为铁离子数量的 300 倍，大部分粒子能量在 100MeV~10GeV。太阳活动对银河宇宙射线具有调制作用，表现为银河宇宙射线粒子进入日球层后，其强度、能谱等受到太阳活动的作用而发生变化。

太阳宇宙射线主要是指太阳喷发的高能带电粒子，主要成分是质子和电子，也包括少量  $\alpha$  粒子和其他核子。它们的能量略低于银河宇宙射线，受地磁场的影响较大，因而强度受纬度的影响更大。太阳宇宙射线的强度在太阳耀斑大爆发时迅速增大，源于太阳表面所发生的短时间释放巨大能量的突然爆发，大部分能量以紫外线和 X 射线的形式辐射出来，另一部分能量通过磁流体力学过程使带电粒子加速到很高能量，称为太阳耀斑粒子，这类事件中粒子主要成分为质子和少量的重离子，大部分粒子能量为 1~500 MeV，有的甚至可达 10GeV。

高能粒子被地磁场捕获，形成动态的高能粒子密集区，称为范艾伦辐射带或地球辐射带。范艾伦辐射带对围绕地球运行的飞行器构成的威胁最大，其环绕地球呈带状分布，形成内、外范艾伦辐射带。

在行星际空间还存在太阳风，即由太阳发出的一股恒定的带电粒子（质子和电子）流，太阳风强度随太阳的活动强度变化，太阳被扰动时，能量可迅速增大并会引起磁暴和极光。

太阳活动引起地磁场全球性的剧烈扰动，从而出现磁暴，会对通信系统、导航、电力系统、输油管道、空间飞行器等产生影响，磁暴也会引起全球范围的高能电子增强现象，称为高能电子暴。

在大气层和地面观察到的宇宙辐射<sup>[12,13]</sup>不仅包括来自宇宙空间的初级辐射，还包括与大气层中的原子核反应形成的次级辐射。从外层空间进入地球大气层的宇宙射线称为初级宇宙射线。初级宇宙射线进入大气层后，与大气原子发生作用，产生中子、质子、重离子等次级粒子，称为次级宇宙射线。

辐射环境模拟主要包括强脉冲辐射环境模拟和天然辐射环境模拟两大类，强脉冲辐射环境模拟研究采用脉冲功率技术产生的强脉冲 $\gamma$ 射线、X射线、电子、离子、电磁脉冲等辐射环境；天然辐射环境模拟研究采用加速器和放射源等产生类似空间、大气层内、地球表面等的辐射环境。

强脉冲辐射环境模拟的核心技术包括脉冲功率驱动源和负载物理。脉冲功率驱动源获得超高功率电脉冲，在 ns 量级内将脉冲电磁能量释放到特定负载；负载物理研究采用不同类型的强流二极管、箍缩等离子体负载、电磁脉冲天线等，产生超高功率脉冲电子束/离子束、X射线/ $\gamma$ 射线、等离子体以及电磁脉冲等强脉冲辐射<sup>[14]</sup>。

空间辐射环境模拟主要是利用加速器、反应堆等提供质子、重离子、电子、中子等粒子，开展电子元器件的辐射效应、生物学效应等研究，为航天器的安全与可靠运行，以及航天员在辐射环境下的健康与安全提供保障。

## 1.2 辐射测量与诊断

辐射物理研究工作中涉及的辐射测量与诊断主要包括天然辐射环境参数测量、地面模拟装置辐射场参数测量以及相关辐射探测器技术。主要研究辐射场（中子、 $\gamma$ 射线、X射线、电子束、电磁场等）的时间行为、强度、能量、能谱/频谱、空间分布参数等的测量诊断方法与技术，诊断辐射形成过程，为各种辐射环境生成和效应试验研究提供准确的环境参数。

天然辐射场、加速器与反应堆等产生的辐射场都是混合辐射场，对混合辐射场的粒子与射线种类的甄别、能谱的测量等一直是辐射测量研究的重点问题，需要解决不同能区、不同粒子与射线的分辨式测量和时空分辨测量等。

天然辐射环境参数测量的重点是空间辐射环境，空间辐射环境中包括质子、重离子、电子、X射线、 $\gamma$ 射线等多种类型的粒子和射线，能量跨度从 eV 量级至 GeV 量级，不同空间位置 and 不同时间段的分布差异非常大，还有太阳爆发与平静时的巨大差异。必须解决粒子的能谱测量、粒子种类甄别以及在轨测量、精密测向等难题，解决不同轨道处太阳质子事件注量率峰值和总注量率测量、地球同步轨道高能电子暴测量技术等大注量率峰值与日常监测及不确定性评估等问题。

航天时代开始以后，国际上对空间辐射的探测和研究就从未停止过，其中地球辐射带是持久的热点。20世纪60~70年代，国外利用在轨卫星进行了大量的空间辐射环境探测工作，并在辐射带理论研究方面取得了突破，俄罗斯在辐射环境探测和研究方面也取得了瞩目的成绩，他们拥有完整的空间高能粒子探测数据库，并且开发出了自主的动态辐射带模式，他们开发的动态银河宇宙射线模式和太阳宇宙射线模式已经作为空间环境国际标准得到推广。美国非常重视卫星数据的深度开发和利用，美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的SWPC已经在地球静止环境业务卫星（GOES）系列卫星探测数据的基础上开发出了质子事件、高能电子暴事件的预报和警报模式，并在其网站上实时运行，为航天部门和公众提供及时的服务，其卫星监测数据也实现了实时上网。美国和

欧洲国家的科学家通过对 SOHO、ACE 等卫星数据进行分析, 开发了一批实用的空间天气预报模型。

我国也在卫星上搭载了高能质子、高能电子和太阳 X 射线探测器, 积累了大量的实测数据, 并在这些数据的基础上发表了大量的研究成果。

与空间辐射测量相关的另一个重要方面是实现空间辐射损伤的在轨监测和诊断。航天器空间辐射损伤引起的故障在轨甄别、分析及定位数据是判断航天器运行状态的重要依据, 也是航天器在轨救援措施制订及后续型号加固设计的重要参照。在轨航天器运行环境复杂, 影响因素很多, 由于体积、功耗、重量以及数据传输等条件限制, 在轨故障监测和诊断技术难度很大。需要密切结合航天器系统的设计、地面试验和仿真模拟, 有针对性地进行飞行试验, 开展辐射效应在轨监测和辐射损伤在轨诊断研究。

地面模拟装置包括质子加速器、重离子加速器、电子加速器、强脉冲加速器、中子发生器、反应堆等, 每种类型装置的辐射场都有各自的特点。

用于空间辐射模拟的加速器质子束注量率跨度大, 试验中会伴随产生大量的次级中子本底。质子束流诊断技术研究需要结合质子辐射效应试验特点, 满足单粒子(核反应与直接电离)、总剂量、位移损伤的单项或综合测量需要, 同时围绕实时监测、准确测量、效应鉴别、自动化诊断等技术要求, 开展全面、深入的质子束流诊断技术研究。当前急需发展的关键技术包括质子束能谱测量及能散度测量、低能散射粒子抑制及甄别技术、不同注量率质子束流测量, 束斑尺寸及相应范围内束流分布均匀性探测等。

在强脉冲加速器方面, 因为强脉冲加速器产生的辐射场的脉冲时间短、强度高, 所以研究的重点是提高探测系统的时间响应和空间分辨能力, 解决等离子体抑制强电磁脉冲干扰的能力等, 主要包括高强度快脉冲辐射场参数测量、高功率电脉冲产生过程诊断、辐射转换过程诊断等。

在反应堆中子辐照试验中, 涉及中子、 $\gamma$  环境, 研究的重点是反应堆中子试验孔道中子注量率、能谱、 $\gamma$  剂量率等伴随测量的技术难题,

进一步提高测量不确定度。

碳化硅、碲锌镉、氮化镓、金刚石等新型半导体探测器，已在加速器 D-T 中子源测量，反应堆中子注量率、中子能谱测量方面得到很好的应用。其中，SiC 探测器是核辐射领域国际上的研究热点，美、俄、意、日、韩等国家先后开展了大量研究，欧洲核子中心将 SiC 半导体作为辐射探测的重要研究材料。

### 1.3 辐射效应与抗辐射加固

当带电粒子入射到半导体器件内时，带电粒子可以通过电离过程使一些束缚电子从价带激发到导带，从而产生大量的电子空穴对，形成致密电离径迹。这些带电粒子辐射产生的电子空穴对将对半导体器件的性能产生影响，严重时甚至会使半导体器件失灵或烧毁。电离效应包括单粒子效应（single event effect, SEE）、总剂量（total ionizing dose, TID）效应和瞬时电离辐射（transient ionizing radiation, TIR）效应。

入射粒子和被辐射材料的原子核发生碰撞，产生空位-间隙原子对，会在晶体中引入一些新的电子能级，成为载流子的产生-复合中心，造成器件材料的位移损伤。

过去几十年，人类在单粒子效应、总剂量效应、剂量率效应、充放电效应和位移损伤效应等方面已经取得了大量的研究成果，但随着微电子产业的迅猛发展，近年来大量涌现的新材料、新结构、新器件对于辐射效应机理的研究提出了新的挑战。

单粒子效应是微电子器件受到高能粒子，如质子、中子、 $\alpha$  粒子或其他重离子辐照，由入射粒子本身或与其与器件材料发生核反应产生的次级粒子在器件敏感区域电离产生的电子空穴对被电场收集形成脉冲电流导致的器件辐射损伤<sup>[15]</sup>。

单粒子效应可以分为单粒子软错误和单粒子硬错误两大类，单粒子软错误表现为电路逻辑状态或存储数据的随机改变，使执行程序混乱，如单粒子翻转（single event upset, SEU）、单粒子功能中断、多位翻转（multiple-bit upset, MBU）等。单粒子硬错误表现为器件本身永久性的损坏，如单粒子栅穿（single event gate rupture, SEGR）、单粒子烧毁（single

event burnout, SEB)、单粒子锁定 (single event latchup, SEL) 等。

随着器件特征尺寸的减小, 存储单元发生翻转的临界电荷也减小, 低能质子直接电离即可导致器件的单粒子效应。同时, 电路集成度提高, 存储器的单粒子翻转从单个位翻转到出现了多位翻转, 导致器件两个以上存储单元逻辑翻转的现象。工作的频率和速度不断提高, 单粒子效应导致器件输出异常脉冲信号, 出现了单粒子瞬态效应 (single event transient, SET), 并逐渐成为影响时序电路和组合电路的主要因素, 限制了数字电路的工作速度。还出现了更复杂的单粒子失效模式, 如单粒子功能中断 (single event functional interrupt, SEFI), 导致逻辑器件不能完成规定的逻辑功能。不仅空间辐射环境下工作的电子学系统会出现单粒子效应, 高空和地面工作的系统可靠性也面临着单粒子效应的问题, 如中子和 $\alpha$ 粒子引起的单粒子效应。

单粒子瞬态效应和多位翻转是器件特征工艺尺寸减小后必须特别关注的辐射效应。首先, 随着工作频率的提高, 单位时间内时钟沿的数量增加, 单粒子瞬态效应被俘获的概率增大; 其次, 小尺寸器件节点电容减小, 电源电压降低, 逻辑状态变化所需电荷量也随之降低, 在相同的粒子注量条件下, 能够产生更多具有足够高度和宽度的单粒子瞬态效应脉冲, 导致敏感窗口增大, 进一步增加了单粒子瞬态效应敏感度; 最后, 随着门延迟减小, 能够无衰减传播的脉冲宽度和高度也随之减小。对于新型小尺寸器件, 单粒子瞬态效应脉冲与时钟宽度相当, 单粒子瞬态效应的加固将变得越来越困难, 单粒子瞬态效应引起的软错误率将超过单粒子翻转, 成为软错误的主要来源。

小尺寸器件的多位翻转同样变得日趋严重。传统的大尺寸半导体器件的入射粒子能量沉积、电荷产生模式可以用系列点状分布来近似。但是, 对于小尺寸器件, 沉积电荷的径向分布已经可以与器件的灵敏区尺寸相比拟, 不能简单地近似为系列点状分布, 需要考虑电荷共享机制、粒子径迹分布对多位翻转产生的影响。

单粒子锁定是指单粒子效应导致集成电路寄生可控硅导通, 在电源端和接地端之间形成低电阻通道的现象。单粒子栅穿是指单粒子效应导致器件绝缘栅介质击穿的现象。单粒子烧毁是指单粒子效应导致功率

MOSFET 寄生晶体管二次击穿等热损伤的现象。

辐射粒子入射到电子器件或系统中，使原子发生电离而诱发的辐射损伤效应称为总剂量效应。总剂量电离损伤可使半导体电导率发生变化、漏电流增加和时间响应劣化等，其结果是器件特性参数退化，功能失效。MOS 器件对电离辐射很敏感，电离辐射导致  $\text{SiO}_2$  绝缘层中形成正的氧化物陷阱电荷，在  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面产生界面陷阱电荷。电离辐射总剂量应是一种累积的损伤行为。一般来说，短时间的总剂量效应主要是氧化物陷阱电荷的损伤，而长时间的总剂量效应则主要来自界面陷阱电荷的损伤。

相同总剂量不同剂量率引发的辐射效应存在差异，出现低剂量率增强效应（enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS）。低剂量率增强效应的形成是一个极为复杂的物理过程，与众多因素相关，包括辐照剂量率、辐照温度、氧化层电场、氧化层缺陷能级分布与空间分布、氧化层中 H 的分布与浓度、H 的输运、辐射感生空穴与电子的输运、空穴与电子陷阱的俘获、复合与辐射、界面陷阱钝化与去钝化、衬底电子隧穿等。

当晶体管特征尺寸变得与粒子产生的电离径迹直径可相比拟时，出现了微剂量效应，即单个粒子入射器件，通过直接或间接电离的方式在栅氧中产生的陷阱电荷以及在  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面处产生的界面态缺陷足以引起器件的局部总剂量失效，从而造成器件的永久性损伤。微剂量效应兼具总剂量效应的失效永久性与单粒子效应的随机性，同时与总剂量的均匀剂量分布不同，微剂量在空间分布上具有局域性的特点；与单粒子效应的辐射感生载流子直接参与输运不同，微剂量通过辐射感生缺陷间接影响载流子输运，是一种新的效应现象，值得关注。

位移损伤效应（displacement damage, DD）是指入射粒子和被辐射材料的原子核发生碰撞，使晶格中的原子离开晶格，停留在晶格的某一间隙位置，在晶格已位移原子的位置留下一个空位，这些空位-间隙原子对会由于点阵形变及热运动互相发生作用而退火，最终形成稳定的缺陷状态，在晶体中引入一些新的电子能级，充当载流子的产生-复合中心。这些产生-复合中心对电导率、载流子迁移率，特别是少数载流子寿命有很大的影响。一般来说，位移损伤对少子器件和光电器件的危害

较大, 而对 MOS 器件影响相对较小。

电子学系统在天然辐射环境中同时受到电离辐射总剂量、累积位移损伤与单粒子效应等多方面的影响。航天器在轨初期, 累积剂量较小, 器件所表征出的单粒子效应规律与地面预估的情形一致。随着卫星在轨时间的延长, 累积剂量不断增大, 长期累积效应也会对单粒子效应产生影响。

## 参 考 文 献

- [1] 陈伟, 杨海亮, 郭晓强, 等. 空间辐射物理及应用研究现状与挑战[J]. 科学通报, 2017, 62(10): 978-989.
- [2] 陈伟, 郭晓强, 姚志斌, 等. 空间辐射效应地面模拟等效的关键基础问题[J]. 现代应用物理, 2017, 8(2): 020101-1-020101-12.
- [3] 赖祖武. 抗辐射电子学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 曹建中. 半导体材料的辐射效应[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [5] 皮塞卡. 空间环境及其对航天器的影响[M]. 张育林, 陈小前, 闫野, 译. 北京: 中国宇航出版社, 2011: 148-172.
- [6] 萨·格拉斯顿. 核武器效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 1965.
- [7] 刘文平. 硅半导体器件辐射效应及加固技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] 丁富荣, 班勇, 夏宗璜. 辐射物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.
- [9] Messenger G C, Ash M S. 空间单粒子效应[M]. 陈伟, 郭晓强, 丁李利, 等译. 北京: 中国原子能出版社, 2015.
- [10] 中村刚史, 马场守, 伊部英治, 等. 大气中子在先进存储器件中引起的软错误[M]. 陈伟, 石绍柱, 宋朝晖, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [11] 陈伟. FPGA 抗辐射加固技术[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2016.
- [12] EUGENE N. Single-event effects in avionics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2): 461-474.
- [13] 杨海亮, 李国政, 姜景和, 等. 航空电子器件的单粒子效应[J]. 抗核加固, 1999, 16(增刊): 14-30.
- [14] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016.
- [15] 杨海亮, 李国政, 李原春, 等. 质子和中子引起的单粒子效应及其等效关系理论模拟[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(6):490-495.

## 第 2 章 强脉冲辐射模拟源研究中的关键问题

强脉冲辐射模拟装置包括两大技术，一个是脉冲功率技术；另一个是负载技术，如图 2.1 所示。

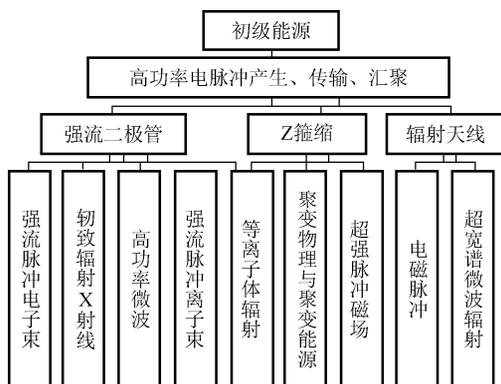


图 2.1 强脉冲辐射模拟装置的主要组成

脉冲功率技术是研究获得超高功率电脉冲的科学，它以低功率较慢时间储存电磁能量，然后借助于各种开关（等离子体导通与断开）进行能量的快速切换、脉冲压缩，使功率放大十几个量级，至 TW 或 PW 量级，其瞬时功率可以达到全世界的发电功率，储能密度在空间上压缩 10 个量级，在 ns 量级时间内将脉冲电磁能量释放到特定负载。

负载技术包括不同类型的强流二极管、等离子体辐射转换负载、辐射天线等，用以将脉冲功率驱动源储存、压缩、传输的能量转化为超高功率电子束/离子束、X 射线/ $\gamma$  射线、等离子体辐射、电磁脉冲、微波、激光等。

本章重点分析脉冲电子束/离子束、X 射线/ $\gamma$  射线、等离子体产生技术中涉及的科学问题。

## 2.1 国内外研究现状及发展趋势

在强脉冲辐射环境模拟方向,美国具有国际领先地位,建设了系列辐射模拟源,如脉冲软 X 射线源(如 Saturn、ZR)、脉冲硬 X 射线源(如 Saturn、Pithon)、脉冲 $\gamma$  射线源(如 Hermes-III)、核电磁脉冲源(如水平极化模拟装置 HPD、垂直极化有界波模拟装置)。近年来脉冲源的技术指标得到了进一步提高。例如,完成了软 X 射线模拟源 Z 装置到 ZR 装置的升级,驱动电流由 20MA 提高到 26MA,正在研制亚纳秒前沿、电压 6~7MV 的电磁脉冲模拟器。在聚变能研究方面,利用 Z 装置驱动等离子体内爆产生聚变中子达  $6 \times 10^{13}$ ,用 Z 箍缩动力学黑腔压缩聚变靶丸,获得的压缩比达 14 倍以上。

### 1. 研究热点和技术前沿

当前研究的重点是各类模拟装置的驱动源技术和强脉冲辐射转换技术,包括脉冲高电压、大电流的产生和脉冲束流、脉冲辐射、电磁脉冲的生成技术等内容。

目前,驱动源技术的研究热点和主要发展方向是超高功率脉冲源技术、新型脉冲 X 射线驱动源技术、快上升沿电磁脉冲模拟源技术等。强脉冲辐射转换技术研究的重点是应用不同类型的强流二极管产生不同能段的 X 射线,其中广泛涉及等离子体物理和高能量密度物理方面的基础研究。从应用角度出发,研究重点是如何利用各种物理机制或技术手段以有效提高辐射转换效率,并且较精确地控制能谱。近几年,在软 X 射线产生技术研究方面,美国深入开展了 Z 箍缩负载优化技术研究,以更为复杂、精细的多层嵌套负载将 keV 量级的软 X 射线辐射转换效率提高近 1 倍。在以高阻抗二极管产生 MeV 量级的高能 X 射线方面,当前的研究热点是能够产生小焦斑(1mm 左右)强脉冲高能 X 射线的强聚焦二极管技术。例如,美、英、法等国家都在竞相研究阳极杆箍缩二极管、自磁箍缩二极管、傍轴二极管等强聚焦二极管技术,其中阳极杆箍缩二极管已获得最小焦斑直径 1mm 的聚焦 X 射线,并得到了实际应用。