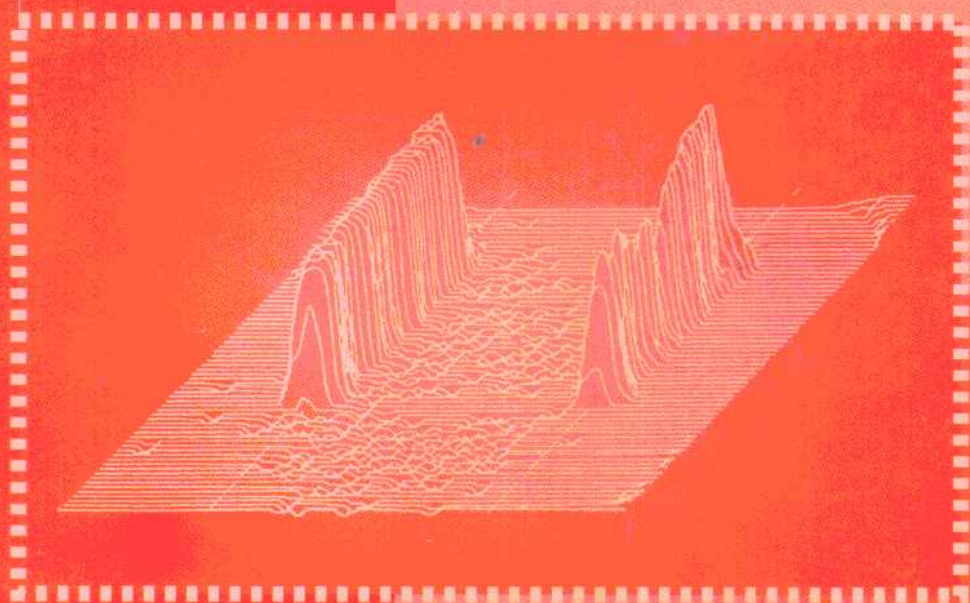
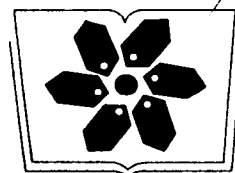


▼ 杨津基 编著

高温高密度 磁化等离体



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

高温高密度磁化等离子体

杨津基 编著

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书在简述高温高密度磁化等离子(HHMP)发展史的基础上,全面系统地阐述了HHMP的基本理论;HHMP的技术装置(包括强脉冲电流装置、高电压快装置与短脉冲装置等的组成和放电回路的计算);等离子体焦点(包括等离子体焦点的基本原理,初始阶段、加速阶段和箍缩阶段,脉冲中子发射、氘核发射、粒子束发射和X射线发射等);Z箍缩(包括喷气Z箍缩、激光Z箍缩、核聚变与X射线激光)等内容。

本书可供等离子体物理、核物理、力学、磁流体力学、高电压技术、微电子学等科学技术领域内的科研人员、工程技术人员,以及高等学校相关专业的教师、学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高温高密度磁化等离子体/杨津基 编著. —北京:科学出版社, 2000.

ISBN 7-03-007566-8

I. 高… I. 杨… II. 高温高密度等离子体-磁化等离子体-等离子体焦点. N. 053

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 16900 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000 年 3 月第 一 版	开本: 787×1092 1/16
2000 年 3 月第一次印刷	印张: 26 1/4
印数: 1—1 100	字数: 611 000

定 价: 53.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

从古至今,人类使用的能源主要是地球上的煤、石油、天然气和水力资源等,这些能源是有限的。有人估计,不久的将来,这些能源将被消耗尽或开发完。因此,人类需要开发新的能源。在开发的新能源中,氘核聚变可以产生巨大的能量,而且氘大量存在于海水中,可以说是取之不尽的。军事上用的氢弹就是利用氘核聚变原理研制而成的。氘核聚变能释放巨大的能量,但它是一次性释放完的。鉴于民用方面的需要,必须研究连续的、可控的、像电能那样的能源,因此形成了“受控热核聚变”的研究领域。20世纪40年代中期,美国和苏联开始对受控热核聚变进行秘密研究。在研究过程中,他们认识到这一问题不是短期内能解决的,需要各国的共同努力。因此于50年代中期,他们将各自研究的结果公布于世,以便得到世界各国的支持和帮助。Z箍缩等离子体(包括等离子体焦点)是他们研究受控热核聚变最早采用的研究方法之一;苏联采用的是平板型装置,美国用的是同轴型装置。由于Z箍缩方法产生的等离子体密度和温度都比较高,而且设备比较简单,因此,德、英、法、日等国家相继建立这种装置,进行等离子体聚变的研究。在研究过程中,人们发现,由于Z箍缩产生的等离子体存在不稳定性及末端效应,要达到热核聚变的劳逊条件是很困难的。直到80年代后期,新的研究结果表明,只有采用喷气Z箍缩或细丝放电(Z箍缩的又一种方式)的方法才有可能达到劳逊条件,实现小型的受控核聚变。

人们在研究受控热核聚变的过程中,发现Z箍缩等离子体可以产生很强的X射线与中子脉冲,这是其他方法难以达到的。因此,人们将Z箍缩作为强脉冲X射线源或中子源,应用于科学研究及工农业生产等方面。例如用于研究活细胞的结构和活动,用于大规模集成电路芯片的光刻和对地层中石油进行探测等。

目前有两种方法可以产生高温高密度等离子体。一种是Z箍缩方法,另一种是用强激光脉冲进行的惯性约束方法。前者产生的等离子体是由磁场约束的,而后者产生的等离子体没有磁场约束。一般把由等离子体焦点、Z箍缩、细丝爆炸所产生的等离子体称为高温高密度磁化等离子体(HHMP)。

20世纪70年代初,我国开始Z箍缩等离子体的研究工作,清华大学、原子能科学研究院和中国科学院物理研究所相继建立了等离子体焦点装置和Z箍缩装置。清华大学气体放电与等离子体试验室先后建立了两套等离子体焦点装置和一套喷气式Z箍缩装置,并在这些装置上系统深入地进行了大量的研究工作。他们在焦点装置上进行了从绝缘子根部放电到电极顶部聚焦过程的试验研究,并对电极区X射线的发射进行了理论分析。他们在所拍摄的等离子体箍缩过程中发现了多次箍缩现象,并对此进行了数字模拟的理论分析,对于Z箍缩过程给出了比较全面的图像。这些结果曾在国际会议和国际重要期刊上发表过。

对于高温高密度磁化等离子体的研究至今已将近50年,科学家们为此做了大量工作,积累了丰富的经验,并取得了重要的进展。从事等离子体工作的广大科技工作者迫

切需要学习和了解 Z 箍缩等离子体的理论、技术和研究现状，而目前国内尚无比较全面、系统地介绍这方面内容的书。本书旨在填补这一领域内的空白，作者力求系统而深入地介绍 Z 箍缩等离子体的主要理论、技术装备和研究状况，使广大读者尽快跟踪 Z 箍缩等离子体研究的发展和重要的研究方向。

从 70 年代建立“气体放电与等离子体试验室”开始，和我一起工作过的清华大学的同事们，特别是韩旻教授和王新新副教授，西北核技术研究所的同志们，以及清华大学电机系的历届博士研究生都对高温高密度等离子体的研究作出了重要贡献，也为此书的出版提供了丰富的资料，著者对他们表示深切的感谢。这里，还要特别感谢李成榕教授，他不仅通读了全书，进行了许多文字修改工作，而且协助作者对书稿做了一些修改整理工作。正是由于他们的共同努力和支持帮助，才为此书的出版奠定了基础。

第一章 绪 论

1.1 概 述

等离子体是一种物质状态,它由带正电荷的离子、带负电荷的电子,以及一些原子、分子组成,在宏观上呈电中性.其性质不同于气体、液体和固体,所以又称之为物质第四态.等离子体的分布范围非常广,除了人们常见的电弧、日光灯等的电离气体外,围绕地球的电离层,太阳及太阳风,以及其他恒星等也都是等离子体,它是宇宙间物质存在的主要形式,占宇宙间物质总量的绝大部分.

等离子体一词最早出现于 1923 年,即研究气体放电问题的那个时期^[1].经过几十年的研究与发展,以及各学科之间的交叉影响,形成了现在如此广泛的等离子体领域.例如,随着能源开发的需要,人们开始研究热核聚变,从而形成了等离子体物理学.当等离子体被应用在合成、聚合、表面改性等技术上后,又形成了等离子化学和等离子工艺学.由于等离子体过程可能既包括化学过程也包括物理过程,如果简单地用“等离子体物理”或者“等离子体化学”来划分似乎欠妥,因此有人根据温度的高低来划分等离子体.目前在一些国际会议上等离子体就是被这样划分的.产生热核聚变的等离子体属高温等离子体,温度在上千万摄氏度到几亿摄氏度;而等离子体化学的合成、聚合及电弧等产生的是低温等离子体,温度约在三四万摄氏度以下.

随着人口的不断增加,对能源的需求及消耗将越来越大.但地球上的能源,如煤、天然气、石油等矿物质,以及水力资源等都是有限的,能源供应将成为不久的将来的一大问题,因此引起了人们的高度重视,并开始探索新能源的开发.海水中存在大量的氘(H^2 ,它是氢的同位素),用它进行热核聚变能产生有效的能量,这是最终解决能源问题的方法之一.可以说,现在已解决了获取氘核能的问题,氢弹就是一种释放氘核能的装置,但它是不可控制的,只是一种大炸弹,瞬间便释放完巨大的能量,因此不能像电能那样供一般情况下的使用.如何将这种核能转变为一般通用的能源,科学家们从 20 世纪 40 年代中期开始进行了可控核聚变等离子体的研究^[2],并由此形成了“可控热核聚变反应”科学分支.

太阳与地球之间的太阳大气、太阳风、地球磁层及电离层形成了一个庞大的等离子体系统,而且绝大多数的行星也都有自己的磁层及电离层,有自己的等离子体系统.这些等离子体系统构成了空间和天体等离子体.目前,科学家们主要研究的是日地空间中的等离子体现象,以开发空间资源、建立空间基地.空间等离子体物理研究的是等离子体和飞行体之间的相互作用,太阳等离子体中热核能的输出和在行星际间的传输,以及磁层和电离层中能量的转化和分配等.这些研究对预测天气的长期变化,保护地球环境,保障航天安全和进行空间应用都具有深远的意义.地球电离层的状态对于无线电通讯(特别是短波全球通讯)、广播、导航、制导等是否能正常进行有重要的影响.太阳剧烈扰动所引起的电离层骚扰可能导致短波通讯中断.1984 年 2 月发生的太阳大耀斑就是一例,全球短波通讯因此而中断达 4 小时之久.等离子体的空间尺度变化很大,参数范围可以覆盖几个数量

级,如等离子体宏观速度可以从静止到高速度($5 \times 10^5 \text{ m/s}$).在日地空间中有无数不停激发着的等离子体波,它们产生着丰富的非线性现象.无论是从具体应用还是从认识宇宙来看,对空间和天体等离子体的研究将越来越受到人们的重视.

相对于热核聚变等离子体而言,低温等离子体^[3,4]的温度比较低,其放电形式有辉光放电、电弧及等离子体炬.低温等离子体被广泛地应用于工业、农业、医疗等方面.按照学科来分,低温等离子体可分为三类:

(1)热等离子体,或是局域热力学平衡等离子体,主要应用于机械加工(焊接、切割、喷涂等)、冶金(金属或特种合金等的冶炼)、材料制备(如超细超纯粉末、特种材料等的制备).

(2)冷等离子体,这是一种非热平衡的等离子体,它可用于聚合各种薄膜、微电子加工、表面处理等方面.

(3)燃烧等离子体,如燃煤磁流体发电中的等离子体等.

低温等离子体也称为等离子化学.但是从上述内容来看,等离子体化学中也包括物理过程,所以人们根据温度划分来代替物理和化学的划分可能是合适的.

等离子体科学是一个很大的学术领域,具有广泛的应用范围.上面介绍的三类等离子体,每一类都包含有大量的研究内容.例如受控热核聚变,自40年代中期开始研究以来,所取得的研究成果虽然已接近实现热核聚变堆的临界条件(见图1-1)^[4],但要达到实际应用还要解决建堆的材料及氦的处理等问题.又如用高温高密度磁化等离子体(HHMP)作为实现受控热核聚变的一种方法,从1947年开始研究以来,研究过程中虽出现了一些波折,但现在认为^[24,25]HHMP用作小型聚变堆是可能的.此外,HHMP还可以产生强的脉冲X射线及中子,为工业生产和医疗等方面提供服务.充氦的HHMP一次放电可以产

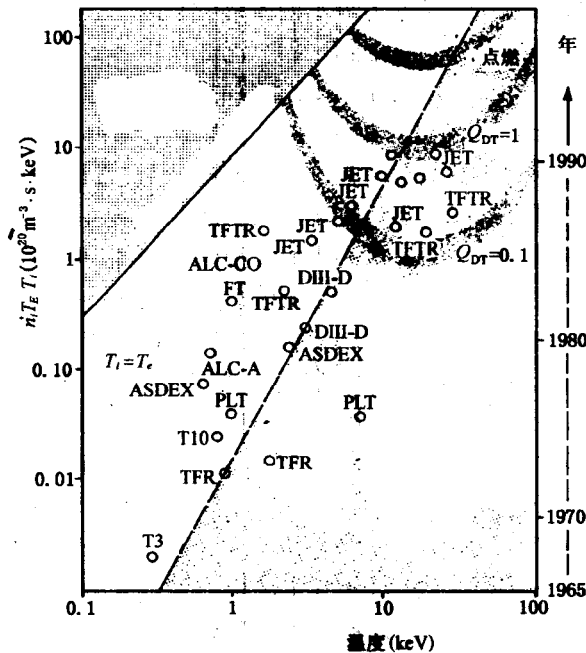


图 1-1 核聚变试验所达到的参数

生 10^{11} 中子, 充 Ar 的 HHMP 一次放电可以发射 30kJ 软 X 射线产额.

1.2 高温高密度磁化等离子体

前面已经提到, 用箍缩方法进行热核聚变试验研究虽然开始得比较早, 但当时是保密的. 一直到 50 年代后期, 人们才意识到, 热核聚变不是短时间内能解决的问题, 并且需要各国的共同研究才能实现. 因此, 从 1961 年开始, 每三年召开一次“等离子体物理及受控核聚变研究(Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion Research)”的国际会议; 1971 年后改为每两年召开一次. 此后, 这方面的研究成果才公之于世, 还同时出版了“核聚变(Nuclear Fusion)”期刊. 1962 年在该期刊上发表了等离子体 Z 箍缩的研究结果^[6].

人们在 Z 箍缩试验中看到, 等离子体被磁场箍缩成很小的点, 其密度和温度都比较高(密度约 $10^{19}/\text{cm}^3$, 温度约几千电子伏), 称之为稠密等离子体焦点(dense plasma focus)或等离子体焦点(plasma focus). 强激光聚焦在氘靶丸上也可以产生高温高密度等离子体, 其密度比等离子体焦点的密度还高, 但它不是由磁场所约束的等离子体. Tokamak 装置上也可以产生磁约束等离子体, 磁场所约束的等离子体温度可以达到 10keV 以上, 但是其密度比较低. 由于这些原因, 人们把等离子体焦点, 以及由 Z 箍缩产生的等离子体称为 HHMP. 石英管中放电、爆炸金属丝放电等方法所产生的等离子体也属于 HHMP.

作为可控能源, 由热核聚变装置产生的等离子体必须具有高密度 n 、高温 T 的特点, 并且能维持一定的时间 τ , 亦即要满足临界条件

$$n\tau > 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \quad T > 5 \text{keV} \quad (1-1)$$

只有这样, 核聚变所释放的能量才可能大于为产生此高温高密度等离子体所消耗的能量, 以及辅助设备所需要的能量. 早期的等离子体焦点和 Z 箍缩研究已经获得了比较好的结果, 例如, 等离子体密度 n 达到 10^{19}cm^{-3} , 温度 T 达到 $1 \sim 5 \text{keV}$, 中子产额 Y_N 达到 10^{10}D-D (氘-氘反应)中子/脉冲(氘-氘互作用产生的中子), 中子产额最高达到 $6 \times 10^{12} \text{D-T}$ (氘-氘反应)中子/脉冲(氘-氘互作用产生的中子).

热核聚变的氘或氚反应中所释放的能量主要是中子的能量(2.45 或 14.1MeV), 这些能量将被转变为电能. 所以核聚变试验中常用中子产额 Y_N 表示装置产生核聚变的效果. 为了能预期获得所需中子产额的试验参数, 需要找出核反应(或中子产额)和设备参数的关系. 参考文献[12]中介绍了中子产额 Y_N 和设备电压 U 的关系($Y_N \propto U^{4.5}$), 以及 Y_N 与装置储能 W 的关系($Y_N \propto W^{2.3}$).

当电流通过等离子体柱时, 等离子体柱将因加热而膨胀. 由热力学原理知道, 这时等离子体的压强 p 与密度 n 、温度 T 的关系为 $p = nkT$. 通有电流的等离子体柱还受到其中电流及磁场产生的电磁力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 的作用, 等离子体在此电磁力的作用下将沿径向向内箍缩. 这里, $\mathbf{J}$ 是通过等离子体的电流, $\mathbf{B}$ 是电流产生的磁场. 当热膨胀力和电磁力平衡时, 等离子体中氘的密度与电流的关系为 $n \propto I^2$. 于是, 氘核与氘核发生反应时所产生的中子产额 Y_N 与电流 I 成 4 次方的关系. 即 $Y_N \propto I^4$, 一般称之为中子“定标定律”. 试验结果也基本如此^[13,14]. 按照定标定律, 在强大电流下(例如 10MA), 预期可以得到很高的中子产额. 因此而鼓舞了科研人员, 使这方面的研究发展得很快.

中子产额的定标定律鼓舞了人们采用大电流的方法来产生中子, 许多试验室进行了

这方面的研究. 但试验结果发现, 有的定标关系的幂数不是 4, 而是小于 4. 这引起了人们对中子产额定标关系的怀疑, 于是定标关系成了当时的一个重要研究问题. 经过一段时间的探索研究, 人们发现, 有些试验中所测的电流不是等离子体电流, 而是输入放电室中的总电流. 其中有一部分电流没有通过等离子体, 因此没有参加等离子体的箍缩, 而是沿绝缘子表面泄漏掉了. 等离子体中实际的电流比测量值小, 所以中子产额比定标定律预期的要小. 如果将被测电流的线圈设在电极的顶部, 这样来测量等离子体箍缩中的电流, 就可以得到定标定律 4 次方的关系. 由此可见, 偏离 4 次方的定标定律有时是因为没有正确测量箍缩等离子体中的电流所引起的. 人们在试验中还发现, 电流在 1MA 左右以下, 定标定律和试验是一致的, 电流超过此值时其结果达不到应有的中子产额. 其原因是由于放电室内的杂质(特别是电极根部绝缘子所产生的杂质)参与了放电过程, 影响了等离子体的核聚变. 图 1-2 就是一个例子, 它表示了绝缘子对中子产额的影响.

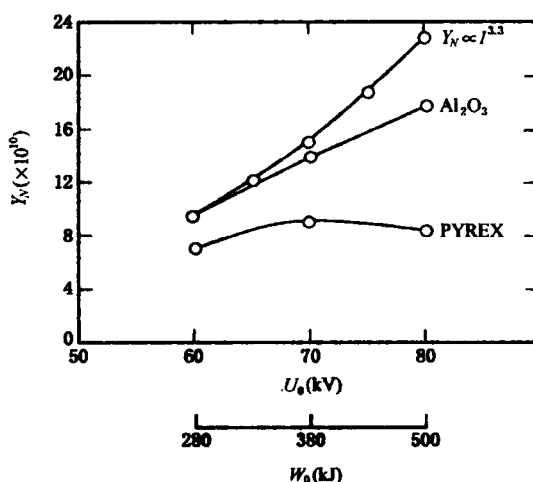


图 1-2 不同绝缘子情况下中子产额和电容器电压的关系

用 Al_2O_3 作绝缘子比用硼硅酸玻璃绝缘子所得的中子产额高, 这是因为 Al_2O_3 的汽化温度比玻璃的高, 产生的杂质少. 此外, 设备容量也有影响. 在设备容量很小的极端情形下, 如几千焦耳等离子体的小装置上, 得到的中子产额比定标定律的高. 人们曾在一个电容器储能为 1.35kJ、电压为 20kV 的小装置上获得了 2.8×10^8 中子/脉冲^[15]的中子产额, 比定标定律预计的大许多, 其原因还尚待研究.

研究初期, 人们将等离子体焦点和 Z 箍缩等产生中子的机制作为热力学问题来考虑, 并且得到了中子定标关系. 但后来发现, 有些现象, 例如等离子体焦点发射的中子不是“各向同性(isotropic)”的^[9], 等离子体箍缩中出现细丝^[17]及热点^[18]等, 这些现象难以用热力学来解释. 对于这类装置发射中子的认识有一长期的演变过程. 1968 年发现了等离子体焦点发射的中子不是各向同性的, 而是有一定的角分布^[9]. 后来由于中子测量技术的发展及完善, 1980 年测量到了比较详细的中子发射的分布^[19], 如图 1-3 所示. 其中图(a)是中子发射沿轴向的分布, 图(b)是沿径向的分布. 由此可见, 中子的产生不能用热核模型来解释, 因为它的分布不是各向同性的. 也曾有用不同的假设来解释试验现象^[20], 如“移动锅炉(moving boil)模型”和“束靶(beam target)模型”. 移动锅炉模型认为中子是由热

核反应产生的,但是它沿轴向的移动像反应锅炉在轴向移动一样,这种移动导致了中子发射的各向异性.束靶模型假设氘束沿轴向加速,并打在驻定的氘气靶上,产生核聚变反应.这些假设都不能满意地说明试验结果.近年来,随着试验技术和计算机计算的发展,人们对这个问题的认识也加深了.参考文献[21]中用“回旋粒子模型(gyrating particle model)”在计算机上进行计算并得到了比较好的结果.要使受控热核聚变达到有效地供应电能的目的,等离子体必须满足公式(1-1)的临界条件.等离子体焦点的密度及温度都比较高,这是它的优点,也是人们长久研究它的原因.但是,在等离子体焦点中存在着 $m=0$ 不稳定性,这限制了等离子体的约束时间(100~200ns).因此,用等离子体焦点来实现受控热核聚变,与公式(1-1)的临界条件还有一定的差距.根据定标定律,中子产额只和电流的4次方有关系,似乎只要提高电流就可以提高中子产额.为此,有的研究机构曾建立一个低电压(约20kV)、大电容(约5000 μ F)的1MJ储能装置来进行研究,但是没有成功,

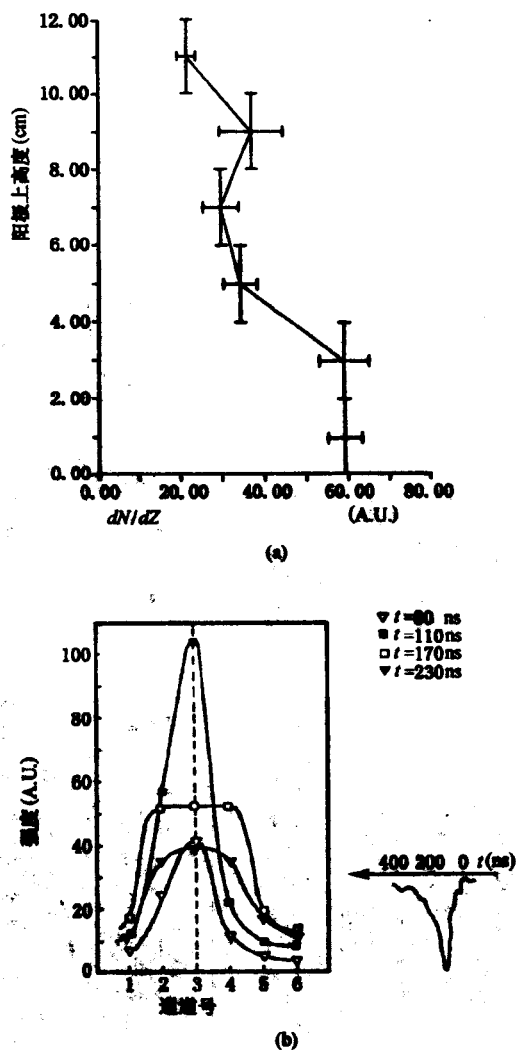


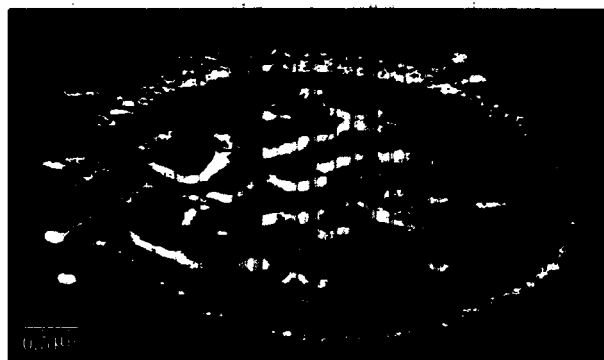
图 1-3 中子发射的分布
(a)沿轴向分布;(b)沿径向分布(虚线是电极轴线)

即没有获得预期的中子产额^[22]. 与此相反,有人采用高电压(200kV)、小电容(1.56 μ F)装置进行试验^[23],也没有获得成功. 80年代后期,文献[24,25]中提出了另一种方案,即用短脉冲(≤ 200 ns)、快上升率($10^{12} \sim 10^{13}$ A/s)的电流、小等离子体半径($r_0 \approx 20 \mu\text{m}$)和高电压(约 1MV)来进行试验,力图通过等离子体自身磁场的约束以及崩溃辐射过程,使等离子体达到核聚变的要求. 人们在细丝试验中发现,电流上升期间 Z 箍缩没有发生 $m=0$ 的不稳定性. 这样,利用细丝试验人们克服了等离子体焦点试验中的重大障碍,使 HHMP 的研究又有了新的发展. 人们认为用这种方法来建立小型热核聚变堆是可能的.

在用 HHMP 实现受控核聚变堆遇到困难时期,人们发现 Z 箍缩装置的等离子体可以产生强的中子及 X 射线. 如果在这种装置中充 Ne, Ar, Kr 或 Xe 来进行试验,可以产生大剂量的 X 射线. 一台容量 1.4MJ 的 Z 箍缩装置能产生 500kJ 软 X 射线,而且效率高达 36%^[26]. 软 X 射线有多方面的重要用途,如用软 X 射线拍摄的细胞组织结构图像比电子显微镜拍摄的更精细,并且可以拍摄活细胞的组织结构,这是一般电子显微镜难以达到的. 图 1-4(a)是用 X 射线拍摄的湿的、活的血小板样品图像^[27],图 1-4(b)是一般电子显微镜拍摄的死的血小板图像,由图可以看出它们有明显的差别. 在电子工业上,软 X 射线对电子元件芯片的发展有重要的意义. 电子元件芯片的集成度越高、电子计算机的体积将越小. 图 1-5(a)是 X 射线光刻的芯片图^[28],线宽为 $0.5 \mu\text{m}$. 据估计,用这方法可以达到 $0.2 \mu\text{m}$ 的线宽,这对计算机发展有重要意义^[29]. 图 1-5(b)为用于 X 射线光刻的 Z 箍缩装



(a)



(b)

图 1-4 血小板 X 射线图像
(a)活细胞的图像;(b)风干细胞的图像

置示意图^[30]。软 X 射线的另一发展是 X 射线激光^[31],即利用 HHMP 产生的 X 射线激发激光质产生 X 射线激光。强 X 射线的发射还可以用于军事。此外,HHMP 发射的中子脉冲也有非核聚变的用途。中子有容易通过小分子而被大分子物质阻挡的性能。可以用作中子照相;检验金属密闭容器中有机材料结构是否完好,如金属导爆束中炸药是否连续充满等。由上述的情况可见,HHMP 有着广泛的用途。

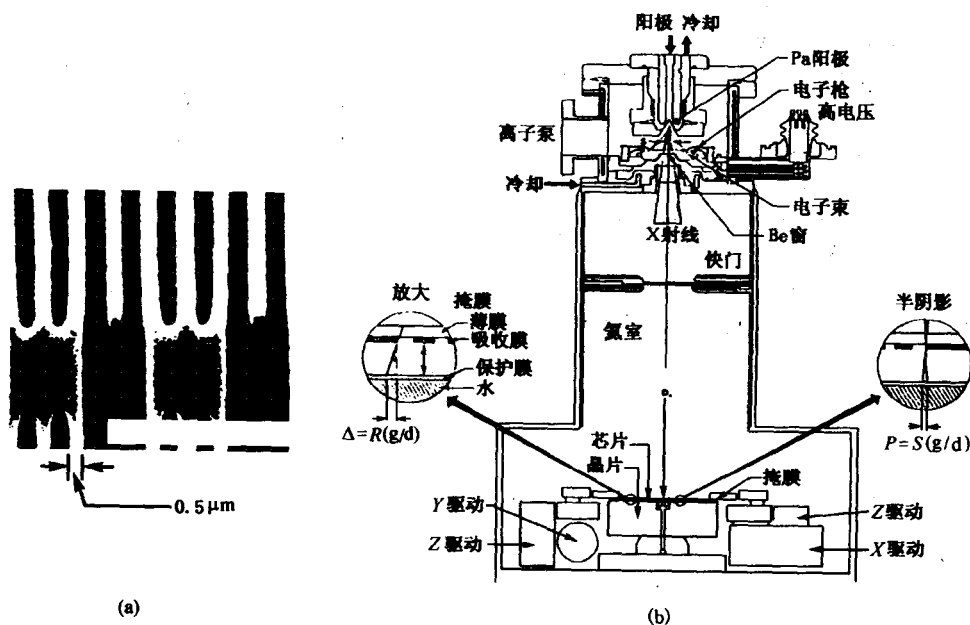


图 1-5 (a) X 射线光刻芯片图;(b) X 射线光刻装置示意图

参 考 文 献

- [1] H. A. 卡普卓夫著,南京工学院无线电系工业电子学教研室译,气体与真空中的电现象,高等教育出版社,1958.
- [2] J. L. Bromberg, Fusion, The MIT Press, 1982.
- [3] H. Yasuda, Plasma Polymerisation, Academic Press, 1985.
- [4] H. V. Boening, Plasma Science and Technology, Cornell University Press, 1982.
- [5] V. E. Golant, M. N. Rosenbluth, S. Nakai, F. Najmabadi and R. W. Conn, Nucl. Fusion, 31, 761, 1991.
- [6] N. V. Filippov, J. I. Filippova and V. P. Vinogradov, Nucl. Fusion, Suppl. I, 577, 1962.
- [7] V. E. Agafanof, et al., 3rd Conf. Plasma Phys. Contr. Fusion Res., I-21, 1968.
- [8] N. J. Peacock, et al., 3rd Conf. Plasma Phys. Contr. Fusion Res., I-51, 1968.
- [9] P. J. Bottom, 3rd Conf. Plasma Phys. Contr. Fusion Res., I-67, 1968.
- [10] J. H. Lee, Phys. Fluids, 14, 1227, 1971.
- [11] D. C. Gates, Bull. Am. Phys. Soc., I-15, Paper 6E15, 1464, 1970.
- [12] Ch. Maisonnier, et al., 4th Europ. Conf. Contr. Fusion Plasma Phys. Rom, 117, 1970.
- [13] H. Schmidt, 2nd Latin Am. Workshop Plasma Phys. Contr. Thermo. Nucl. Fusion, Medellin (Colombia), IPF-97-5, Uni, Stuttgart, 1987.
- [14] P. Cloth, et al., Proc. Intern. Conf. Radiation Test Facilities for the CTR Surface & Materials Programm, Argonne National Lab., U. S. A., July 15-18, 1975.
- [15] L. Michel, Appl. Phys. Lett., 24, 57, 1974.
- [16] 中国科学院原子能研究所,物理学报, 24, 309, 1975.

- [17] J. W. Mather, Dense Plasma Focus. in "Methods of Experimental Physics" Academic Press, New York, 1971.
- [18] P. Choi, C. Deeney, H. Herold and C. S. Wong, Z-Pinch & Plasma Focus. 76, Nice, 1988.
- [19] K. Steinmetz, Plasmabericht 1/80, 1980, Inst. fur Angewandte Phys, Universitat Heidelberg.
- [20] J. H. Lee, Phys. Fluids, **14**, 2217, 1971.
- [21] U. Jager, Uni. Stuttgart. Inst. fur Plasmaforschung, IPF-86-1, 1986.
- [22] C. Goulan, H. Kroegler, Ch. Maisonnier, J. P. Rager, and B. V. Robouch, Intern. Conf. Plasma Phys. Contr. Fusion Res. , 1978, No. CN-37/u-3-1.
- [23] G. Decker, R. Deutsch, W. Kies and J. Rybach, Plasma Phys. Contr. fusion **27**, 609, 1985.
- [24] M. G. Hains, Plasma Phys. Contr. Fusion, **31**, 259, 1989.
- [25] M. G. Hains, Intern. Conf. Plasma Phys. Contr. Fusion Res. , IAEA-CN-53/C- N -19, 769, 1990.
- [26] A. E. Robson, Nucl. Fusion, **29**, 1825, 1989.
- [27] R. Feder, V. Banton, and D. Sayre, Nature, **227**, 64, 1985.
- [28] I. Okada, Y. Saitoh, S. Itabashi and H. Yoshihara, J. Vac. Sci. Technol, B4, 243, 1986.
- [29] A. Heuberger, Solid State Technology, Feb. 93, 1986.
- [30] G. A. Garrettson and A. P. Neukermans, Hewlett-Packard J, 14, 1982.
- [31] S. J. Stephanakis, et al. , IEEE Trans. **PS-16**, 472, 1988.

第二章 高温高密度磁化等离子体的装置

2.1 概 述

高温高密度磁化等离子体是由强脉冲电流在气体中放电产生的. 当脉冲大电流通过气体时, 产生等离子体, 并且在电流自身的磁箍缩效应作用下, 被压缩到很小范围, 成为密度及温度均很高的等离子体焦点. 所产生的等离子体焦点发射出脉冲的强 X 射线、中子和粒子束. 这一效应可以在气体中实现, 也可以用线形或薄筒形的固体来实现. 脉冲强电流先使固体汽化, 形成等离子体, 再利用电流自身的强磁场将等离子压缩成高温高密度状态. 如今可用以下几种方法来产生 HHMP:

(1)稠密等离子体焦点(Dense Plasma Focus, DPF)方法.

(2)Z 箍缩(Z-pinch)方法, 其中又分埋气式(gas-embedded)、喷气式(gas-puff)及激光触发式(laser-triggered)等. 目前采用的装置大多为喷气式装置, 该装置有许多优点, 效果也比较好. 埋气式方法已逐渐被淘汰, 激光触发式的方法尚在发展中.

(3)线爆炸(exploding wire)方法. 用脉冲强电流对金属丝放电, 产生高温高密度等离子体, 是获得强 X 射线脉冲的方法之一. 如果用氘化的线(如氘化的锂线)还可以产生中子脉冲.

(4)聚爆(implosion)方法. 这种方法不用单根线, 而代之以薄筒或鼠笼式的多根线. 当强电流通过多根线时, 它们将被气化并向中心压缩, 产生 HHMP.

现在一般采用等离子体焦点及 Z 箍缩方法. 下面介绍这两种方法所用的装置. 实际上, 除放电室之外, 这两种装置是相似的.

由于使用目的不同, 对装置的要求也不同. 研究核聚变所用的装置必须有一定的规模, 才能实现核聚变的“收支相当(break-even)”, 即达到能量转化的增益, 获得有效益的能量. 作为工业用的脉冲 X 射线源或脉冲中子源, 用小装置就可能满足要求. 如果是进行某些物理研究, 则常用中等规模的装置. 不同装置的参数相差很大, 例如, 储能范围为 $1.4\text{kJ} \sim 2.5\text{MJ}^{[1 \sim 4]}$, 电压为 $16\text{kV} \sim 3\text{MV}$, 电流为 $150\text{kA} \sim 15\text{MA}$. 表 2-1 列出了一些国家和地区的 HHMP 装置.

表 2-1 一些国家和地区的 HHMP 装置的一览表

装置名称和装置所在地点	功率 (TW)	能量 (MJ)	电压 (MV)	电流 (MA)	年 份
Double Eagle 美国 Phys. Lab. Int.	8			3	1983
Blackjack-5 美国 Maxwell Lab.	10	2.5	3.0	4.6	1986
Pithon 美国 PI	5		1.5	3	1979

续表 2-1

装置名称和装置所在地	功率 (TW)	能量 (MJ)	电压 (MV)	电流 (MA)	年 份
Proto I 美国	3	0.22	0.8	3.5	1986
美国 Sandia	10		1.1	3—4	
PBFA-I 美国 Sandia	70	2.8	12	15	
Gamble I 美国 Naval RL	1			1.5	1986
Sidonix 法国 Fr. CEA	0.5				1983
ZAPP 美国 LLNL	0.2			0.6	1987
Shiva 美国 AFWL	1	1.3	0.10	10	1983
Poseidon 德国	0.5	0.5	80kV	3.6	
Nessi 德国 Stuttgart Uni.		40kJ	16kV	390kA	
Speed I Speed II 德国 Dusseldorf Uni.		30kJ 180kJ	200kV 300kV	800kA 4MA	
Saturn 美国 Sandia	30	1.4		10.5	1989
HDZP 美国 LANL			3.5	1.2	
美国 Marayland Uni.			500kV	20kA	
德国 Darmstadt T. H.		1.3kJ	20kV	259kA 2.8×10^8 , 30x scaling law	
Plamaya 前苏联		0.7	50kV	4MA	
DPF-36 DPF-200 Gas-Puff Z-Pinch 中国清华大学		35kJ 200kJ 20kJ	30kV 45kV 40kV	570kA 380kA 20kA moved to Xian 300kA	
中国台湾省		0.7	25kV	6	
PF-30 PF-150 Soltan Inst. 波兰		20kJ 150kJ 360kJ	20kV 30kV 50kV	2.8	
YIPO 波兰 EFFREMOBA		400kJ	40kV	1.3	

若要产生 HHMP,就要求设备提供大的脉冲电流.为了提高设备的输出电流,必须尽量减小放电回路的电感,减小电容器、传输线和开关(火花间隙)等元件的电感,目前人们把电容器的电感已从过去的 100nH 左右减小到了 10~20nH,甚至更低.并联多个电容器或传输线等也是减小回路电感的常用方法.有些国家曾采用并联众多电容器的方法来建立大的 HHMP 装置,以获得高中子产额,但没有达到预期的目的.后来人们在试验中发现,对于同一储能装置,用较高的电压和较小的电容量,较之用低电压、大电容量能输出更大的电流,这是一个重要的发现.为了产生 HHMP,人们希望在短时间内将大能量输入到等离子体中,这不但要求装置产生的电流大,而且要求电流上升陡度(di/dt)快.由于一般放电回路的振荡频率决定于 $1/\sqrt{LC}$,欲在短时间内将能量输入到等离子体中,就要求回路的电感及电容都必须小.这在大装置上实现会有一定的困难,因为大装置要求电容量大以满足储能的需要,而大电容量的回路电感比较大,采用形成线是解决该问题的一种方法.这种方法是利用在形成线上的波过程来缩短脉冲电压的持续时间,提高电压的上升陡度.这样,在负载上可以得到短脉宽的强电流,消除了一般 LC 回路中电流幅值及周期受回路电感的限制.用这种方法可以将电流脉冲压缩到几十纳秒.这是近年来的一项新发展.此外,在实际应用中,常常要求所产生的脉冲中子或 X 射线是多次重复的.这一要求目前尚不能完全得到满足,特别是对于较大的装置,脉冲中子或 X 射线的多次重复主要取决于电容器的充放电耐受能力和火花间隙的耐受能力.目前,小能量的装置可以得到约千赫兹的放电重复率,大能量装置的问题尚待解决.

2.2 强脉冲电流装置

2.2.1 强脉冲电流装置的组成部分

要得到高温度高密度磁化等离子体,必须用强大的脉冲电流来压缩等离子体,使它达到高温度高密度.所以产生强脉冲电流是获得 HHMP 的基本条件,也是一项重要的技术.这项技术的基本原理是,用较长的时间将能量储存起来,然后突然将能量释放出来,产生强大的电流.能量的储存可以采用以下几种方法:

(1)将能量储存在电容器的电场中.对电容器进行长时间充电,然后让它进行瞬时放电,以获得很大的脉冲电流.这是一种常用的方法.

(2)将能量储存在线圈的磁场中.当电源连接线圈时,线圈中的电流将建立磁场,能量储存于其中.然后将线圈从电源迅速断开,这时会引起线圈中磁场的迅速变化,产生高的电压,将连接线圈与放电室之间的火花间隙击穿,使大电流进入放电室.这种方法的主要缺点是在放电回路中引入了线圈的大电感,使放电电流周期变长,这是不希望有的.

(3)利用炸药的能量.开始时,令一电流通过一个圆的薄金属筒,产生轴向磁场.然后点燃金属筒四周均匀设置的炸药,迫使金属筒迅速向中心压缩.由于筒所包围的磁通不能突然变化,磁场强度 B 将迅速增高,促使金属筒中的电流也迅速增高.用这种方法可以将初始电流放大几十倍,甚至上百倍.由于这是一种带破坏性的、一次性的方法,所以只在特殊情形下才采用它.在上述三种方法中,电容器储能的方法是一种常用的方法.

进行强脉冲电流试验用的设备主要包括以下几部分:真空系统、充气系统、充电系统及接地系统、放电系统、控制系统和同步系统.图 2-1 所示为清华大学建造的 200kJ 等离

子焦点装置的放电室及真空系统部分,图 2-2 是该设备的示意图。

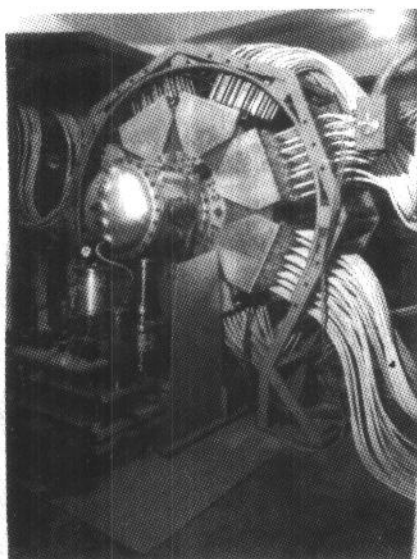


图 2-1 200kJ 等离子体焦点装置

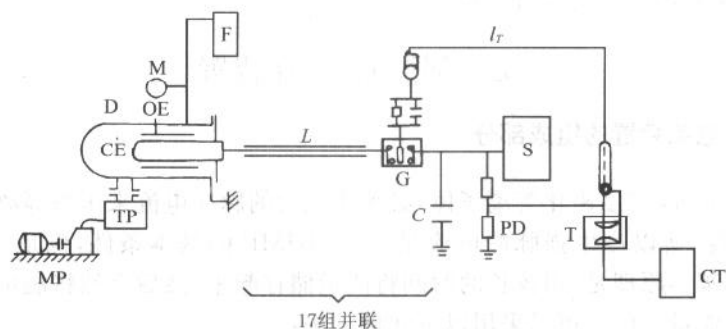


图 2-2 等离子体装置的示意图

图中:

MP——机械式真空泵

F——储气容器

S——充电装置

G——火花间隙(开关)

D——放电室

OE——外电极

T——触发间隙

CT——触发柜

TP——湍流分子泵

M——气压计

C——储能电容器

L——传输线

CE——中心电极

I_T ——触发电缆

PD——分压器

真空系统 要使等离子体达到高温,并且发射中子,必须尽量减少放电室中的杂质,以得到洁净的等离子体。为此要预先清洁放电室,例如去除吸附气体等。具体做法是用