



十万焦耳 θ -收缩实验装置*

θ -收缩实验小组

(中国科学院物理研究所)

为了研究 θ -收缩 (θ -pinch) 等离子体的物理性质,发展快脉冲、高电压储能放电技术和各种高温等离子体诊断技术,设计和建造了十万焦耳直线型 θ -收缩实验装置。单匝线圈的内径为 8.2 厘米,长 20 厘米,装置的主要参数是:电容量 75 微法拉,最高充电电压 50 千伏,最大峰值电流 1.6 兆安培,最大峰值磁场 82 千高斯,最大磁场上升率 4×10^{10} 高斯/秒,半周期 6.5 微秒,能量转换效率 $\sim 50\%$ 。另外还有 450 千周的预电离与 ± 3.5 千高斯的偏磁场电容器组。在初步的实验中,进行了 D-D 聚变反应中子的探测、高速扫描照相、内部磁探针测量、用软 X-射线吸收比较法测量电子温度以及用巨脉冲激光 Mach-Zehnder 干涉仪测量电子密度等工作。本文主要介绍实验装置,并简要叙述一下几种诊断结果。

一、基本考虑

利用迅速上升的轴向外磁场来产生、加热和约束高温、高密度等离子体,即 θ -收缩实验^[1,2],是探索实现受控热核聚变反应的主要途径之一。在历史上,这种方法最先在实验室条件下得到了热核聚变中子。由于它具有磁场形态简单、对离子的加热有效、稳定性较好等优点,所以十几年来装置技术、实验方法、理论研究等方面都有较大发展。最近又演变成环形 θ -收缩并公认为是有望发展成热核反应堆的途径之一^[3]。

θ -收缩的基本过程是:通过圆柱形单匝放电线圈的脉冲电流产生高频感应电磁场,使包在线圈内放电管中的气体电离,形成温度为几个电子伏特的初始等离子体,这就是预电离。由于越靠近线圈的涡旋电场 E_{θ} 越大,所以电离首先在放电管的管壁附近发生,形成一个 θ -方向的薄电流层即等离子体鞘。此电流层中电流的方向与线圈上的外电流方向相反。随着外电流的上升在线圈内产生迅速上升的轴向强磁场,称为主压缩场。如果等离子体鞘的电导率足够高,则此磁场只能存

在于等离子体外部,透不到等离子体鞘内部。等离子体电流与外磁场间的作用力 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ 即磁压力 $B^2/8\pi$ 使等离子体鞘迅速地向轴心运动(如图 1)。沿着鞘运动的方向等离子体被扫向轴心,使粒子的能量增加,等离子体温度、密度升高,这就是所谓的 θ -收缩等离子体,也叫快磁压缩等离子体。

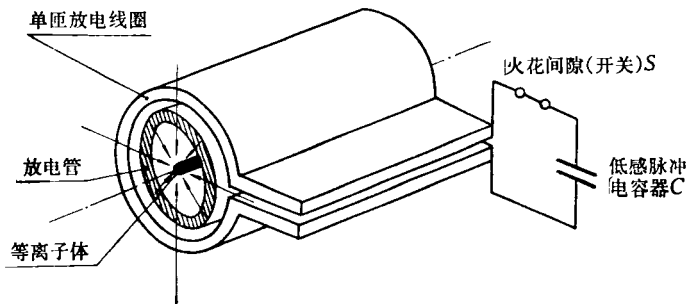


图 1 θ -收缩等离子体示意图

这是一个复杂的击波加热和绝热压缩的物理过程。由于对 θ -收缩等离子体中捕集磁场(主要是与外磁场方向相反的捕集场)的行为进行了大量的研究^[4],使人们想到可以人为地预先外加一个慢变化的弱磁场(称为偏磁场)来改善等离子体的物理特性。偏磁场应当可正可负,并且连续可调。

这样,通常用 θ -收缩方法获得高温等离子体的放电迴路如图 2 所示。利用不同的电容器组经过火花间

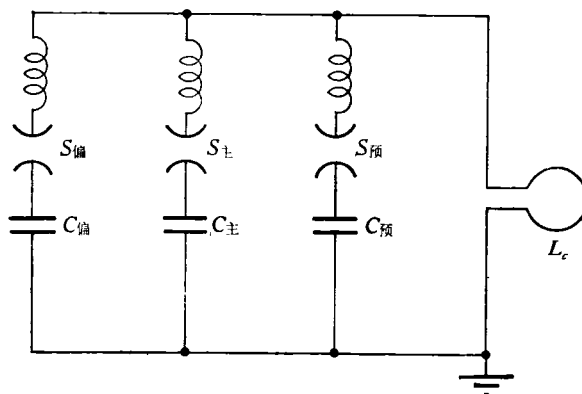


图 2 θ -收缩放电迴路示意图

* 1973 年 4 月 25 日收到。

隙(开关)对负载线圈进行强脉冲放电,把外磁场逐一加入。先是偏磁场,其上升时间是几十微秒,磁场强度为几千高斯。当偏磁场接近最大值时,开始加预电离感应场,其周期为微秒量级。经过几个周期,气体已充

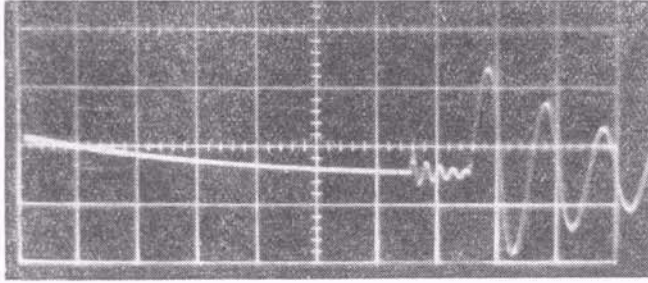


图3 θ -收缩线圈电流示波图(水平标尺:10微秒/格)

分电离,然后加入主压缩磁场。图3是三组电容器按给定的时间顺序对放电线圈放电的电流示波图。

θ -收缩产生等离子体的密度为 10^{16} — 10^{17} /厘米³;并且可以在几个微秒的时间里,用外磁场压缩使离子加热到热核温度。根据外磁场的磁压力和等离子体的动力压强相平衡的关系,即:

$$B^2/8\pi = 2nkT^{(1)} \quad (1)$$

可以估计所要求的主压缩磁场的数量级。式中 B 为磁场强度,单位是高斯; n 为离子密度,单位为个/厘米³(假定是氢或其同位素产生的等离子体); k 是玻耳兹曼常数; T 是温度,单位是 $^{\circ}\text{K}$ 。设 n 为 10^{16} /厘米³, $T = 10^8$ $^{\circ}\text{K}$,则等离子体的动力压强 $p = 2nkT \approx 260$ 巴(大气压), B 约为 100 千高斯。

根据 θ -收缩等离子体实验的这个基本要求,可以考虑一定形状的线圈,具有适当的直径大小与长度,使得在线圈内产生所要求的磁场强度和磁场形态。这就是设计实验装置的基本考虑。

显然,这是一个快脉冲、大电流放电技术的问题。一般来说都是利用高电压电容器储能,然后在极短的时间内把储能加以释放。当然,预电离可以采用 Z -收缩,偏磁场可以采用另外的绕组,但是大多数是用如图2所示的放电回路。这个回路可以简化为如图4所示

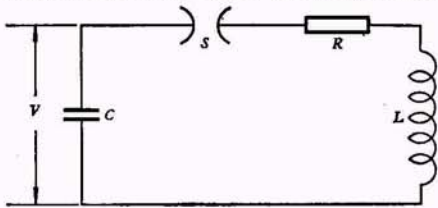


图4 等效线路

的等效回路加以分析。设总电容量为 C ,充电电压 V_0 ,在放电过程中开关的阻抗可以当做常量,因而总电感 L 与总电阻 R 不随时间变化,回路中电流满足方程式

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = 0 \quad (2)$$

在回路参量满足条件

$$R^2/4L^2 < 1/LC \quad (3)$$

时,方程(2)的解是阻尼的正弦振荡,实际的装置大多满足条件(3)。回路诸参量的关系如下:

放电周期

$$T = 2\pi / \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \approx 2\pi\sqrt{LC} \text{ (秒)} \quad (4)$$

振荡电流的第一个极大值

$$i_{\max} = \frac{2\pi}{T} CV_0 e^{-\delta T/4} \approx V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \\ = \sqrt{\frac{2W}{L}} \text{ (安培)} \quad (5)$$

式中 $\delta = \frac{R}{2L}$ 是阻尼系数, $W = \frac{1}{2} CV_0^2$ 是电容器储能。

单匝线圈中间的磁场强度

$$B = 4\pi l/10 \sqrt{l^2 + 4r^2} \text{ (高斯)} \quad (6)$$

式中 l 为线圈长度(厘米), r 为半径(厘米)。

最大磁场上升率

$$\dot{B}_{\max} = \frac{2\pi}{T} B_{\max} \text{ (高斯/秒)} \quad (7)$$

单匝线圈的电感

$$L = 4\pi^2 r^2 l / (l^2 + 4r^2) \text{ (毫微亨)} \quad (8)$$

线圈内径的涡旋电场

$$E_{\theta} = 10^8 \times r_{\text{内}} \dot{B} / 2 \text{ (伏特/厘米)} \quad (9)$$

由此可见,为了获得强磁场,放电电流必须足够大,一般要求在百万安培以上。因为输入等离子体的功率与 BE_{θ} 成正比,所以还应当尽可能加大 E_{θ} 即 \dot{B} 或 di/dt 。因此放电周期要尽可能小,这就要求回路的 L 和 C 小,但是电流 $i_{\max} = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}}$,因此,装置的电容量不能太小,在考虑回路参量时总是要提高电压与减小电感。减小回路电感还直接和提高装置的能量利用率有关,这是因为装置的总储能 W_T 转换为负载线圈能量 W_L 的效率是

$$\eta = W_L/W_T = \frac{1}{2} L_L I^2 / \frac{1}{2} L_T I^2 = L_L/L_T \\ = L_L/(L_{\text{外}} + L_L) \quad (10)$$

其中 L_T 为回路总电感, L_L 为负载线圈电感, $L_{\text{外}}$ 为负载线圈以外放电回路的电感。为了提高 η ,必须减小 $L_{\text{外}}$,这是解决问题的唯一方法,而这与提高 dB/dt 是完全一致的。负载线圈电感一般只有几个至几十毫微亨,这就对放电回路提出了极为苛刻的要求。

根据上述的原理与基本考虑,设计并建造了十万焦耳 θ -收缩实验装置,其原理如图5所示。装置于1969年建成投入运行,其实际性能与原设计基本相符合。试运行时常曾充电至45千伏,使用时一般在30—40

1) 这里假定 $\beta = \frac{2nkT}{B^2/8\pi} \approx 1$ 。

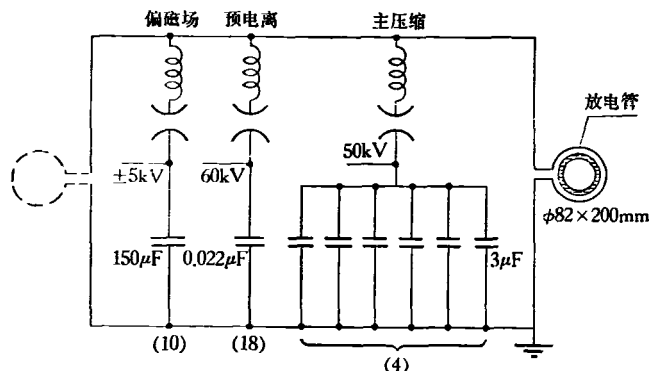


图5 100kJ θ-收缩装置原理图

千伏。初步的实验中已观测到D-D反应产生的中子，说明离子温度已接近千电子伏特。实验装置的基本参数如表1所示。

表1 装置的基本参数

参量(单位)	主压缩	预电离	偏磁场
V_{max} (kV)	50	60	±5
C (μF)	75	0.02×18	$150 \times (10-20)$
W (CJ)	94	0.7	19-38
L (电容器) (nH)*	250/24	300/24	40/10-40/20
L (集电极) (nH)*	4	4	4
L (传输板) (nH)*	17/4	160	—
L (开关) (nH)	40/4	40	40
L (线圈) (nH)	27.5	27.5	27.5
L (总) (nH)	56	250	—
η (%)	50	9.3	—
Γ/t (μS)*	3.2	0.5	100
I_{max} (kA)	1640	62	—
B_{max} (kG)*	82	3	±3.5
B_{max} (G/S)	4×10^{10}	8×10^7	—
$E_{\theta max}$ (kV/cm)	0.7	0.14	—

带*者为测量值

二、电容器组、传输系统、集电极和负载系统

(一) 电容器

实验装置所用的电容器有三种：

(1) MY-50-3 脉冲油浸高压电容器，直流工作电压50千伏，电容量3微法拉，其单台内电感不大于250毫微亨。

(2) MY-5-150，单台内电感不大于40毫微亨。

(3) MY-110-0.022。

这三种电容器并不是专门为θ-收缩实验装置而设计的，前两种可以短路放电使用，后一种内电感较大，不是作短路放电用的。但因为其额定工作电压较高(110千伏)，降低电压作脉冲放电使用，以保证足够寿命。

多个电容器并联使用，可以大大减小回路的电感，但是并联使用电容器又必须考虑防爆的问题。如果电容器组中有一个击穿而未及时发现，则在实验过程中，可能发生其他电容器对它放电因而形成破坏性事故。为了防止这类事故，实验装置中的24台主压缩电容器分为四组，每组六个。组内六个电容器用平行板并联，只是利用每个电容器内原有的保险元件而未加保险隔离装置。组与组之间则采用了如图6所示的分组隔离措施。

在图6中 C_1 与 C_2 分别代表两个电容器组，分别通过电阻 R_1 与 R_2 和保险丝 f_1 及 f_2 充电。如果电容器发生故障或火花间隙未同时点火而引起组与组间倒灌充电时， R_1 与 R_2 可以限制和消耗倒灌的能量，即起隔离作用。为此 R_1 与 R_2 都是用硫酸铜的水溶液做成的电阻。在倒灌时 f_1 与 f_2 也可能被熔断而起保险断路的作用。考虑要求迅速灭弧， f_1 与 f_2 是用直径0.1毫米、长40厘米的细铜线当保险丝，外面套有机玻璃管。采用这样的分组隔离保险措施后，电容器组一直在安全工作。

(二) 传输板与集电极

对于这两者共同的要求是电感尽可能小，电导好，机械强度高，能承受反向电流之间的巨大排斥力。此外绝缘强度高，没有沿面电闪现象。

平行板传输线的电感可按下式计算：

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} t / W \text{ (亨利/米)} \quad (11)$$

式中 t 为两平行板间距离， W 为板宽，单位都是米。

两板间的磁致斥力为：

$$P = 2\pi \left(\frac{I}{W} \right)^2 \cdot 10^{-12} \text{ (大气压, 巴)} \quad (12)$$

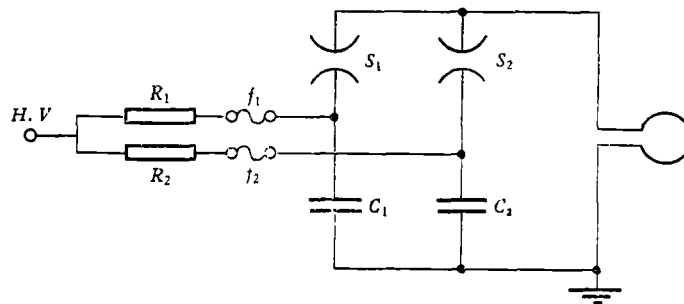


图6 主电容器组的隔离示意图

式中 I 为流过板上的电流,单位是安培。

在主压缩电容组里,每六个电容器用一块传输板并联然后再接开关。这个传输板采用三层夹心式,中间是高压板,上下各为一块铝制接地板。这种夹心传输板的电感比两层的平行板又低一半。实际上每一组约为 17 毫微亨。高压板与接地板之间用多层聚酯薄膜绝缘并把高压板重迭包裹,以获得良好的密封绝缘。

(三)集电板

因为各组电容器的能量最后都通过集电板送到负载线圈上,所以集电板设计得比较大,如图 7 所示。经计算若装置全部能量加上时,两板间的斥力为 17 公斤/厘米²,故两板用槽钢及螺栓夹紧。在集电板与负载线圈之间有一过渡的梯形,它将改善集电板至负载线圈之间的电流密度分布,使其均匀流过负载线圈,因而也改善了线圈内的磁场形态。但在此区域内机械斥力可达 630 公斤/厘米²,当然此斥力是瞬时的。考虑到要使用各种测量设备,为缩短实验周期,集电板两头都可以接负载线圈。

(四)负载系统

包括线圈和放电管和真空系统。线圈是用锻压紫铜板制作的。放电管用重结晶氧化铝管,内径为 70 毫米左右。为了配合高速照相和激光干涉测量,放电管两端都封有光学平面窗口,并把放电管的长度延长到 2 米以上。在窗口附近加入横向直流磁场用来偏转带电粒子,以避免带电粒子轰击窗口造成沾污。图 8 即放电线圈、放电管以及直流磁场线圈的照片。真空系统包括抽真空与充气充入设备。充气前真空度达到 10^{-3} 毫米汞柱以上,纯净充气通过钡过滤器充入放电管内。放电线圈与集电板连接的侧视图见图 9。

放电时流过线圈的电流达到百万安培以上。由于脉冲电流的趋肤效应的结果,电流将集中在两个导电板的表面,因此线圈与集电板必须紧密连结,否则由于接触不良而形成接触电阻,当大电流通过时将产生瞬时电位差,引起打火并把接合处的金属烧蚀。我们采用图 9 的方式,接合处形成斜面用螺栓锁紧。中间夹以银箔或铜箔。但是经过多次大能量使用后依然烧蚀,图 10 (a) 即接触面烧蚀的状况,经过检查,清除或更换烧蚀部分 [见图 10 (b)] 仍可使用。

(五)充电系统、接地及测量屏蔽

充电采用了全波不可逆式快速磁放大器作

恒流充电。高压电源的总功率只有 10 千瓦,采用恒流充电后可在 45 秒时间内充入近十万焦耳的能量。图 11 为恒流充电的原理图。

在实验室内、外用七根 4 米长的钢管打入地下构成地线桩阵,上端用一条铜带接在一起,装置与铜带只在一点连结。

θ -收缩实验是大电流脉冲放电,许多参量的测量与监视都要用示波器,但是在放电实验室内干扰电平太大,所以专门为测量电磁讯号建造了一个双层的屏蔽笼,两层都用 10 孔/吋的镀锌铁丝网。所有测量探头都经仔细屏蔽并且用铜管与屏蔽笼连在一起。铜管

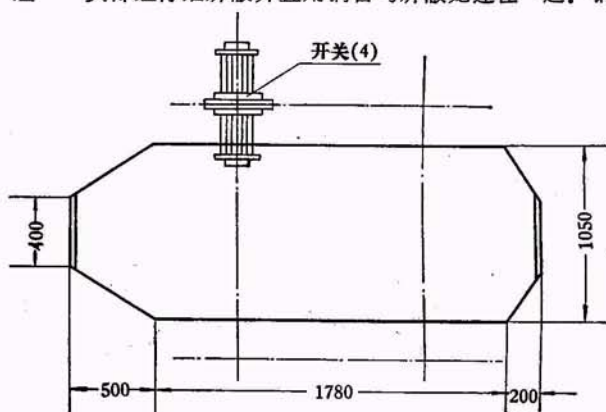


图 7 集电板(图中数字单位是毫米)

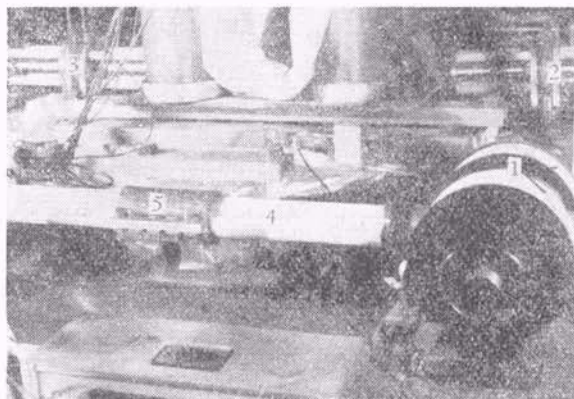


图 8 线圈和放电管

1. 直流磁场线圈; 2, 3. 叠联开关;
4. 氧化铝放电管; 5. 单匝放电线圈

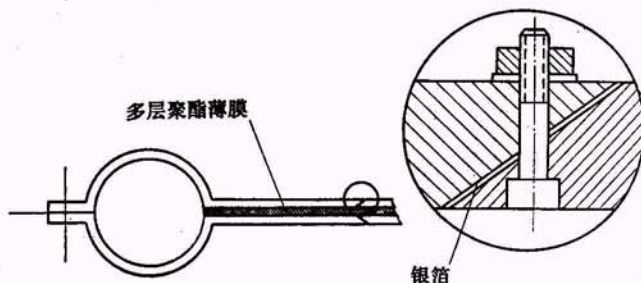
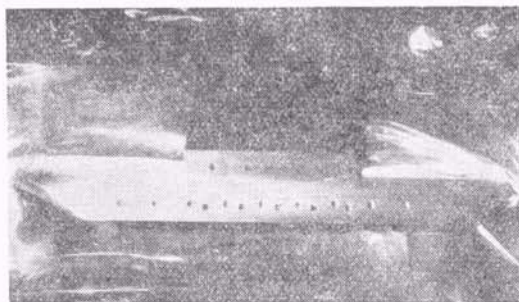


图 9 线圈与集电板连结侧视图



(a) 通过大电流放电几百次后烧蚀的情况

(b) 修复后的接触面

图10 线圈与集电极的接触面

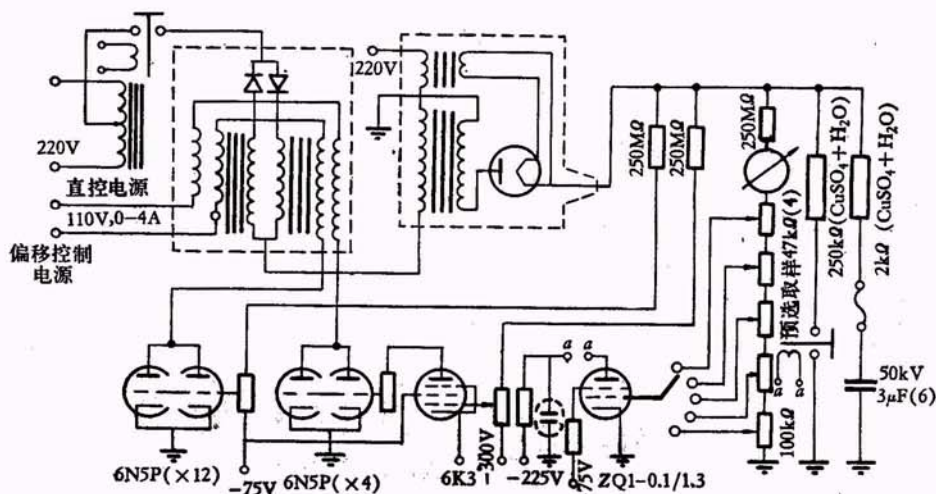


图11 快速磁放大器控制电路原理图

与屏蔽套管与放电实验室内任何导体都不接触。探头所用电源全部都用电池或由笼内供给。两层笼只在一一点连结,即钢管的入口处,笼的接地也就是这一点。笼内的交流供电也从这口导入并先经过低通滤波器。

间的距离 dx 与 dy 就是不锈钢内圈与钢管间的距离,因此同心度极为重要。中间电极的电压用高阻值的电

三、开关组及其同步触发

(一) 开关

主压缩电容器组采用如图12的级联开关^[5],又称棒环状均匀场开关。互相平行的两块黄铜环构成高压电极与负载电极,中间是有机玻璃板绝缘。在环中心贯穿一根 $\phi 40 \times 550$ 毫米的不锈钢管作中间电极兼作触发电极。铜环内镶有不锈钢圈以耐烧蚀。在这种结构中电极

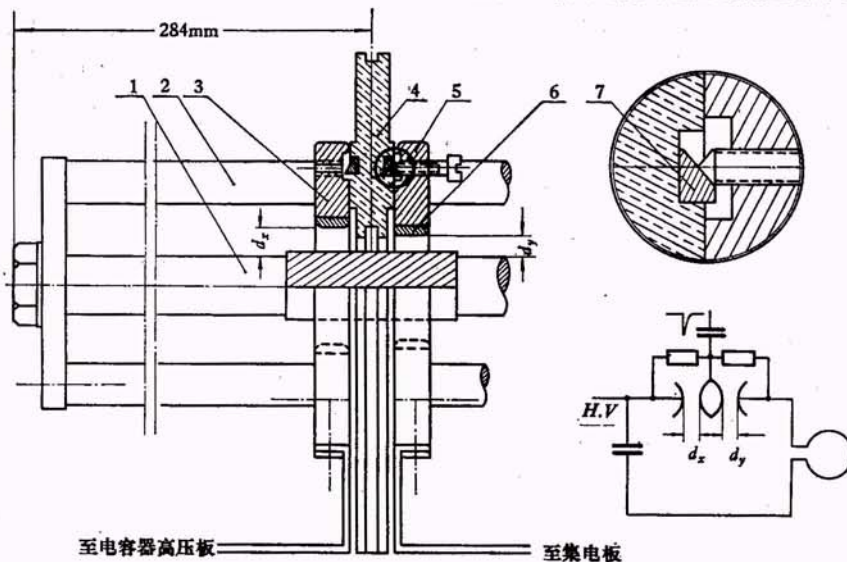


图12 级联开关: 1—中间电极(钢); 2—隔离棒(玻璃钢); 3—高压电极(铜); 4—隔板(有机玻璃); 5—负载电极(铜); 6—衬圈(不锈钢); 7—调整环(不锈钢)

阻分压器取得。高压电极与棒间距离 d_x 对负载电极与棒间距离 d_y 的比是 3:2 而不是 1:1, 这样的电极配置不对称性将减小击穿时间。

这种开关的优点是比普通针球间隙开关的放电通道大, 因而相应的电感就小, 而且每次放电的通道并不固定在钢圈与钢管的某一点上, 因此耐烧蚀性能较好, 使用寿命与允许通过的电流都比针球开关长得多和大得多。每个开关约可承受 300 千安培的脉冲电流和 20 千焦耳以上的能量。此外, 开关在 30 千伏至 50 千伏电压范围内使用时不须另加调整。自装置建成以来, 这种开关只要定期检修, 一直可以正常使用。

(二) 触发与同步

主电容器组共有四个级联开关。关于这些开关的同时点火即同步触发问题, 我们根据装置上四个开关的实际配置情况, 考虑了电磁波在两个开关间导体中传播所需的时间, 即所谓“隔离”时间的要求, 得出开关的点火同步要求在 10 毫微秒左右。因此着重研究了影响级联开关的击穿时间和各开关点火分散度的因素。结果表明, 触发脉冲的上升前沿越陡和电压幅度越大, 则开关的击穿时间越短, 击穿时间的分散度也小, 而级联开关的电极间距离的不对称配置也保证了开关的同步点火特性。

在开关结构确定之后, 另一个问题就是制作一个同步触发脉冲发生器。参照文献[5]的方法我们采用了如图 13 所示的回路。先将电容器 C_1 充电到 $u=24\text{kV}$, 当外触发输入时使间隙 G_1 击穿, C_1 经过 G_1 和 L_1 对同轴电缆进行脉冲充电。由于 C_1 的电容量远大于电缆的总电容量以及 L_1 电感的存在, 电缆上所得到的充电电压将高于 C_1 上的电压 u , 理论值可达 $2u$ 。在电缆的充电过程中, 充电脉冲的频谱中主要是低频成分。而对于低频 $L_1 C_1$ 的串联阻抗远小于耦合电容 C_0 的阻抗, 因而使充电过程中 M 点的电位保持不变, 不受充电脉冲的影响。当电缆充到一定电压时, 充气开关 G_2 自行击穿(其击穿电压可以事先调节), 这时电缆的这一端经 G_2 放电, 即被短路。电缆的另一端的 M 点上产生一负脉冲加到级联开关的中间电极上。因为这个脉冲主

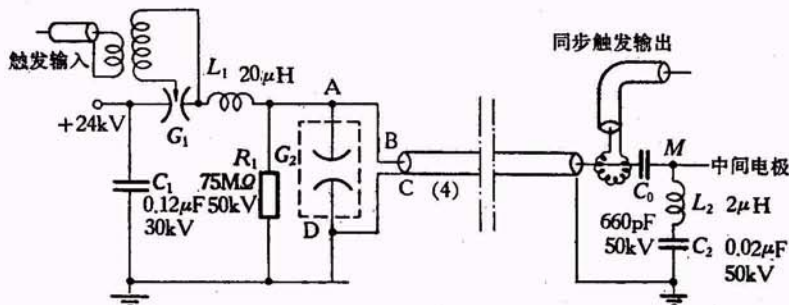


图 13 同步触发线路原理

要是超高频成分, 对于 $L_1 C_1$, 其阻抗远大于 C_0 的阻抗, 这就保证了 M 点获得陡度很大的脉冲输出。其理论值最大可达 $4u$ (当终端完全开路时)。 R_1 的作用是使同轴电缆的剩余电压泄放, 否则在下次工作时, 由于 G_1 的右端的电位不是零, G_1 间隙电位差减小可能造成 G_1 无法击穿的情况。

负脉冲的陡度取决于 Z_0/nL , Z_0 是单根电缆的波阻抗, n 是并联的电缆数。在我们装置中 $n=4$, L 是充气开关的等效电感, 其中包括电缆终端短路回路 $ABCD$ 的电感。 Z_0/nL 越大, 输出脉冲越陡。因此在电缆选定以后, 应在保证绝缘的同时, 尽量缩小 $ABCD$ 的

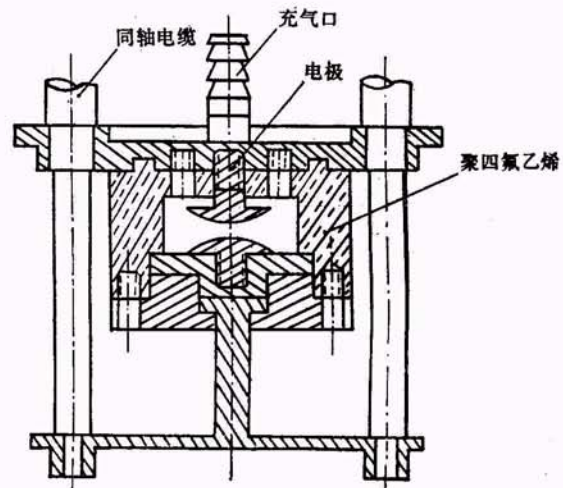


图 14 充气开关截面图

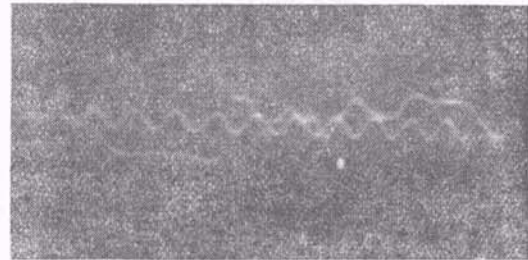


图 15 触发极电压示波图(电容器充电电压 35 千伏, 时标 100 兆周, 讯号反向表示触发极与高压极击穿)

面积, 这是提高输出脉冲陡度的关键。我们采用图 14 所示的充气开关。放电室用聚四氟乙烯制成, 放电在两个球形电极间形成。室内充氮气, 压力为 5 公斤/厘米², 调节压力可以改变击穿电压。输出脉冲的极性是负的, 幅度 50 千伏左右。上升时间约 10 毫微秒。每条电缆的长度为 6 米。图 15 是中间电极上电压讯号的示波图。

四、触发的时间顺序控制

装置的正常运行要求按一定的时间顺序依次使偏磁场、预电离和主压缩电容器组放电。各组都有各自的开关,所以从控制放电的角度来看,要求一个具有几级延迟的触发电路,每级延迟时间应连续可调。各级的启动可以用手控或由诊断设备(如高速照相或激光诊断等)给出的触发讯号控制。为了触发下一级触发器和各种测量仪器,各级触发器又应给出与开关点火同步的触发讯号。

在大电流、快脉冲放电的环境中,各组回路中的电流与电流变化率 di/dt 都很大,而一般回路中感生电压与其周围的 dB/dt (由 di/dt 产生的) 成正比,因此通常的电子回路如不采用一些特别措施,很难在这样的环境中正常工作。由于放电装置本身就是极强的干扰源,无法使其干扰降低,因此只有采用使触发回路加以屏蔽或是提高其抗干扰能力的办法。根据实际情况,我们采取抗干扰能力较高的电路并把三组开关的触发器装在一起,不另加屏蔽。

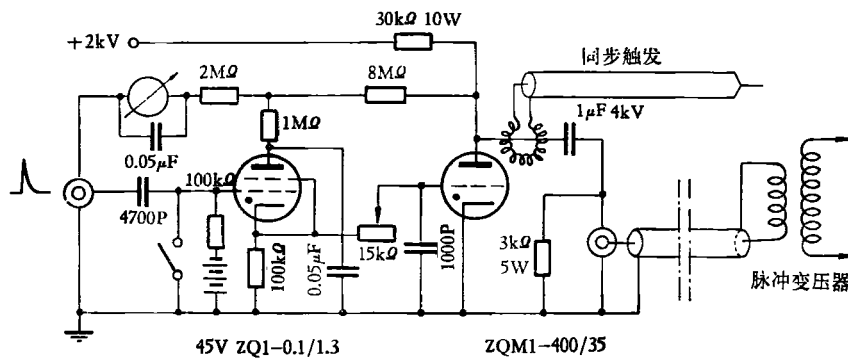


图 16 延迟触发控制线路原理图

图 16 是单级触发延迟电路的原理图,主要是一个脉冲氩气闸流管,在它的板极回路中有一个小的储能触发电容器 C 和脉冲变压器的初级。闸流管和电容器 C 装在一起,脉冲变压器则放在针球开关附近,中间用同轴电缆连结。脉冲变压器次级接在开关低压电极与触发极上,这样,脉冲变压器也起着隔离的作用。某一级闸流管的触发讯号是从前一级闸流管放电回路中的 di/dt 感应讯号取得的。所以各闸流管触发器之间都没有直接的导线连结,而且各级的脉冲变压器都远离延迟电路,消除了相互之间电磁耦合形成的干扰。当前面一级开关点火时,由于干扰大,下一级触发器可能因为感应而自行触发,预定的延迟时间得不到保证。为此,在闸流管回路中板极电压加至 2 千伏以上,这样干扰振幅与板压的比值就小了。同时选用栅极导电电压较高的氩闸流管,这也提高了抗干扰能力。触发的延迟主要靠一个 RC 回路,其中电容器 C_1 正好接在闸

流管的栅极,形成高频旁路。这个措施更进一步提高了氩闸流管的抗干扰能力。 RC 回路输入端的小闸流管是为了手动或外触发输入而设置的。

上述的延迟触发回路比较简单,可靠,但缺点是延迟时间不够精确。如采用多圈线绕可变电阻时,延迟时间可控制在 0.2 微秒左右。

下面用高速照相机、激光干涉仪和放电装置联合运行为例说明触发的时序控制。等离子体的激光干涉测量通常用巨脉冲红宝石激光器作为光源。因为事先调好的最佳激光单脉冲输出是在闪光灯激励后的一定时刻打开晶体开关而得到,闪光灯发光时间是毫秒级,所以放电装置的启动必须由激光器部分来控制。高速转镜照相机要根据转速来确定一个触发装置放电的提前角,再由传感器送出一个触发脉冲。当联合运行时首先开动高速照相机,从传感器发出的触发脉冲点燃闪光灯,同时触发激光器部分的毫秒延迟电路,经延迟 1.5 毫秒后输出一触发讯号启动装置的第一级触发器,此后三组电容器按给定时间顺序放电。当主压缩磁场的开关被触发以后,从它又引出一个脉冲回到激光器部分,用来触发一个微秒级的延迟电路,这个延迟

电路与上面的相似,只是氩闸流管的板压更高,用来打开晶体开关得到激光输出,从而获得主压缩放电开始后一定时刻的等离子体干涉图。经过这段时间,高速照相机的转镜,正好使等离子体的像落入底片盒中。激光出现的时间可用一光电倍增管和示波器监视。

五、几种诊断结果

在装置投入运行后,用几种诊断方法对 θ -收缩等离子体的各种参量进行初步测量,现简单介绍如下:

(一)中子的探测

要判断中子的起源,观察中子发射的时间过程是首要的问题。我们用塑料闪烁体和光电倍增管组成的闪烁计数器,沿放电管的轴向和径向同时进行测量,两个方向中子出现的时间相同。为了防止 γ -光子引起计数讯号,在等离子体与计数器之间用铅板隔开。另外,如放电管内换充氢气则中子讯号消失,这表明探测到的是 $D-D$ 反应产生的中子。图 17 是主压缩场 60 千高斯、偏磁场 -3.4 千高斯、初始氩气压 90 微米汞柱时径向探测的中子讯号示波图。因为加了预电离,

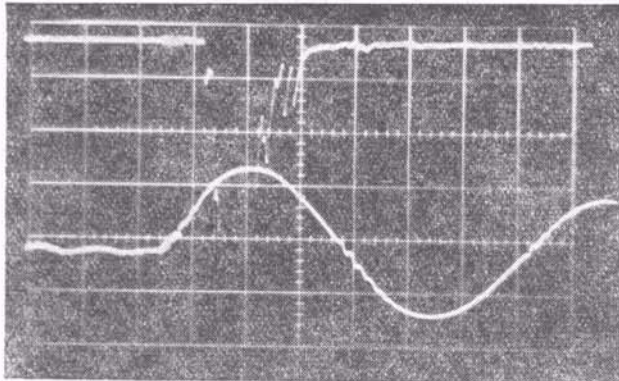
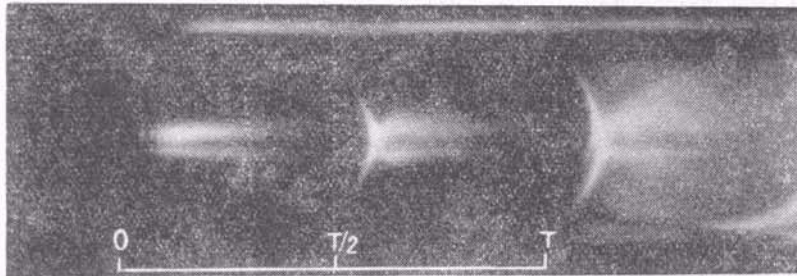


图 17 中子讯号示波图(主压缩场 60 千高斯, 预电离 2.8 千高斯, 偏磁场 -3.4 千高斯, 充氙气压 90 微米汞柱; 上线: 中子计数器讯号; 下线: 压缩磁场; 水平标尺: 2 微秒/格)

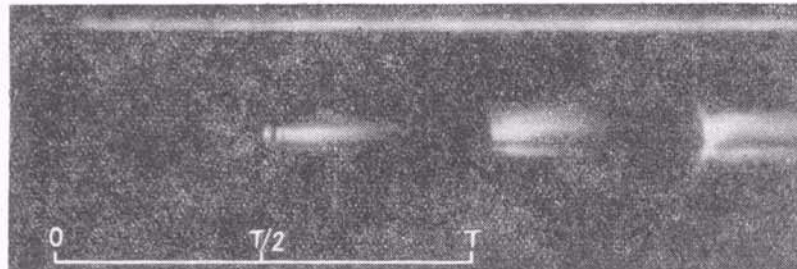
所以中子出现在第一半周期, 仔细看就可以注意到, 中子讯号的峰值出现在压缩磁场的峰值之前。此外用银激活法初步测量每次放电的中子产额约为 10^4 个。

(二) 高速扫描照相

使用 GSJ-65 型高速转镜照相机, 采用扫描工作方式, 转镜最大转速为 60000 转/分。图 18(a) 是沿放电管端面狭缝拍摄的等离子体扫描照片, 照片上部的光带是主压缩电容组开关放电发的光, 在此作为时间参考。中央部分的暗区是由于磁探针造成的。从图中可以看出, 在主压磁场开始后, 出现了频率约为 8 兆周的径向振荡。然后, 在第一半周期内, 等离子体柱有历时 4.5 微秒的稳定压缩。图 18(b) 是没有加预电离时的



(a) 加预电离 2.7 千高斯



(b) 未加预电离, 条件同 (a)

图 18 高速扫描照相(主压缩场 57 千高斯, 偏磁场 -3.5 千高斯, 充氙气压 138 微米汞柱, $T/2 = 6.5$ 微秒)

照片, 其他条件与图 18(a) 相同。可以看到放电的第一半周期不发光, 即没有电离, 这个结果表明预电离是有效的。

(三) 软 X 射线吸收比较法测量电子温度

在放电管的两端各加入一套软 X 射线的探测装置, 包括针孔、吸收膜、薄膜闪烁体和光电倍增管等。讯号在双线示波器上显示。图 19 是一张典型的软 X 射线讯号的示波图。因为有预电离, 所以软 X 射线讯号在放电的第一、第二半周期都出现。所用的吸收膜一端是铝 (2.61 毫克/厘米²), 另一端是铝 (2.61 毫克/厘米²) 加聚苯乙烯薄膜 (2.5 毫克/厘米²)。塑料闪烁体是掺加第一激活物质对联三苯和第二激活物质 POPOP 的聚苯乙烯塑料。利用这种方法在主压缩场 65 千高斯, 预电离感应场 2.8 千高斯, 初始充氙气压 69 微米汞柱时, 测得等离子体的电子温度在峰值时达到 290 电子伏特。

(四) 激光 Mach-Zehnder 干涉仪测量电子密度

利用巨脉冲红宝石激光器, 拍摄了不同时刻的干涉图(详见另文^[4])。图 20 是充氙气压 45 微米汞柱时的激光干涉图的序列。从图中可以看到压缩的各个阶段以及总粒子数的减少。用这种方法还观察了预电离等离子体的压缩。

(五) 磁探针测量等离子体内部磁场

由于磁探针水晶套管引入等离子体内部, 扰乱了等离子体内的运动过程, 妨碍了等离子体温度的增高, 但是在压缩的初期仍然可以测量等离子体内的磁场。图 21 是在充氙气压 140 微米汞柱时的磁探针讯号示波图。可以看到在压缩的初始阶段, 即爆聚时期等离子体内捕集了反向的磁场并且可以看到几次振荡。由于预加偏磁场, 这个反向场可能是由预电离造成的。在主压缩放电开始后约 1 个微秒, 电流稍破裂, 外磁场透入等离子体, 所以磁探针讯号与压缩场变成一致。若把磁探针从放电管中央沿着轴向外拉, 当离开中央 8 厘米以上时, 则捕获场讯号消失, 由此推测高温

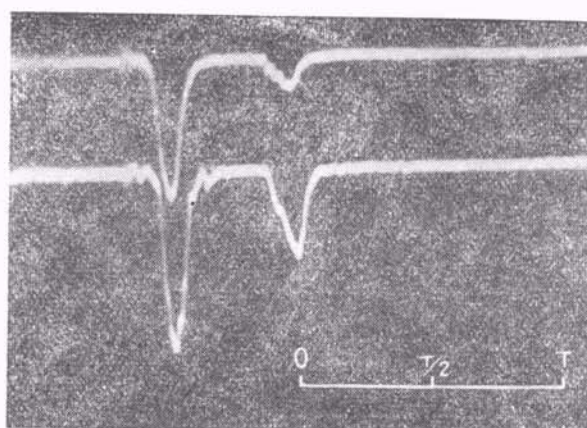


图19 软X-射线讯号示波图(主压缩场 65 千高斯, 预电离 2.7 千高斯, 充气气压 69 微米汞柱, 水平标尺: 3 微秒/格)



(a)



(b)



(c)

图20 激光 Mach-Zehnder 干涉图 [主压缩场 36 千高斯, 预电离 2.7 千高斯, 充气气压 45 微米汞柱, $T/2=5.8$ 微秒(用 12 个电容), 激光延迟时间 t : (a) 0.4 微秒, (b) 1.6 微秒, (c) 2.8 微秒]

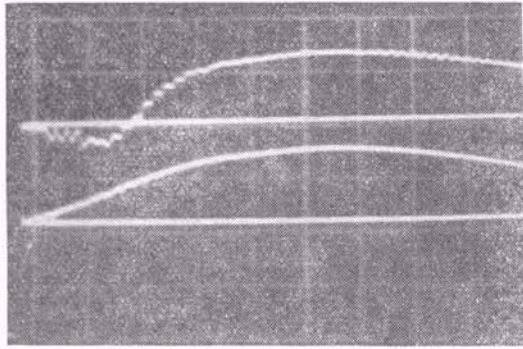


图 21 等离子体内磁探针讯号示波图(上线:磁探针讯号, 38 千高斯/格;下线:压缩磁场;水平标尺: 0.5 微秒/格,主压缩场 56 千高斯,预电离 2.7 千高斯,充气气压 140 微米汞柱)

等离子体存在的区域,其长度约为 16 厘米。

结 束 语

十万焦耳 θ -收缩实验装置建成以后,基本上达到了设计时的目标,虽然有些环节还有待改进和提高;初步的运行已经积累了 θ -收缩实验的经验。各种诊断方法的测量结果进一步考验了装置各部分的功能,如预电离的效果和偏磁场的作用等。几种诊断都表明在磁场达到最大值 ($T/4$) 之前,等离子体的温度、密度都已开始降低,这表明由于线圈短,从两个终端的损失很严重。进一步较为深入的实验研究与基于磁流体模型所做的一维数值计算研究正在进行中。

参 考 文 献

- [1] 卢鹤绂等,《受控热核反应》第八章,上海科技出版社,(1962)。
- [2] H. A. B. Bodin, *Atomkernenergie*, **19** (1972), 175.
- [3] R. L. Hirsch, *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, **15** (1972), 626; F. L. Ribe, 同上, **15** (1972), 627.
- [4] E. M. Little, et al., *Phys. Fluids*, **4** (1961), 711.
- [5] L. M. Goldman, et al., *Rev. Sci. Instr.*, **33**(1962), 1041.
- [6] 中国科学院物理研究所激光干涉研究小组,《以巨脉冲红宝石激光为光源的 Mach-Zehnder 干涉仪应用于 θ 收缩等离子体的研究》,物理学报, **23** (1974), 1.



受控聚变反应

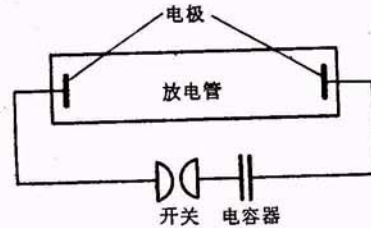
两个带有一定动量的轻原子核(例如氘、氚或锂等)发生碰撞时,在一定条件下,将会结合成较重的原子核,并释放出巨大的能量。这就是聚变反应。由于这种反应往往在温度很高的条件下(例如几千万度以上)进行,所以也叫热核反应。太阳的能量即来自太

阳内部持续不断的热核反应。氢弹爆炸则是人工产生的热核反应,故把氢弹称为热核武器。然而氢弹爆炸的能量不适于人类和平地利用,人们希望热核反应能够有控制地、缓慢地进行,驯服地为人类作功。这就是受控聚变反应,或受控热核反应,迄今受控聚变反应尚未实现,世界各国均在努力研究之中。

在热核反应的温度下,反应物处于等离子体状态下。如何约束和加热等离子体是实现受控热核反应的关键。等离子体中的带电粒子在磁场中受到与其速度和磁场方向垂直的洛仑兹力,因此磁场可以对等离子体施加压力。到目前为止为实现受控聚变反应的探索工作中,多数还是利用强大的脉冲磁场或稳恒磁场来约束等离子体的。

θ -收缩和 Z-收缩

都是利用磁场压缩并加热等离子体的方法。 θ -收缩是通过包在放电管外面的线圈的强脉冲放电,使放电管内的气体产生感应电离并加热到热核温度的。这实际上可看成是感应无极放电,其装置相当于一个脉冲变压器。由于放电管内等离子体的电流层在柱坐标系的辐角 θ 方向上,一般就叫 θ -收缩。 Z -收缩是利用电容器通过放电管两端电极的放电,在放电管内形成等离子体。它的等离子体电流是在柱坐标系的 Z 方向



(即轴向)上,一般就叫作 Z -收缩。其实, θ -收缩和 Z -收缩都是由放电管壁向着管轴的径向收缩。

预 电 离

预电离也叫预加热。为获得几百万度以上的高温等离子体,往往采用一种辅助的方法:先把工作物质(如氘)加热到上万度,形成低温等离子体;然后再把主要的加热手段用上去。任何物质加热到一万度左右的温度下,都已变成主要由离子和电子组成的等离子体,亦即被电离了。所以这种预热的方法又叫做预电离。预电离电容器组即用于此种目的。

软 X 射线吸收比较法测量电子温度

任何物体都会产生辐射。随着温度的升高,辐射的波长向短波方向移动。高温等离子体的辐射大部分落在软 X 射线区,即波长在 2 埃到 50 埃的区域内。若使等离子体辐射通过一块有一定厚度的吸收材料,测量吸收后的辐射强度之比,即可测定等离子体的电子温度。