

# 氧化锌压敏电阻器

王士良 莫以豪

(华中工学院)

压敏电阻器<sup>1)</sup>是一种特殊的半导体非线性电阻器。在它的工作范围内,即使有微量的电压增加,都有可能引起电流的倍增现象,呈现出对电压非常敏感的伏安特性(见图1)。其伏安特性大致可用下式

$$I = \left(\frac{U}{C}\right)^\alpha \quad (1)$$

表示,式中  $I$  为通过压敏电阻器中的电流,  $U$  为相应的端压降,  $\alpha$  为非线性系数 ( $\alpha > 0$ ),  $C$  为材料常数。

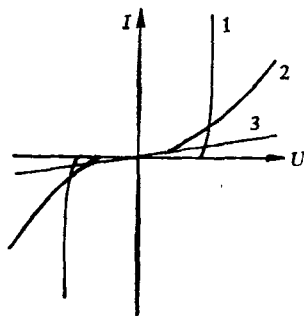


图1 伏安特性

1——氧化锌压敏电阻器; 2——碳化硅压敏电阻器;  
3——线性电阻器

压敏电阻器的品种很多,按其材料的不同可分为氧化锌压敏电阻器、碳化硅压敏电阻器等;按其制造工艺的不同可分为体型压敏电阻器、结型压敏电阻器等;按其伏安特性的不同可分为对称型压敏电阻器和非对称型压敏电阻器。压敏电阻器的品种不同,其技术性能、制造工艺和导电机理均不一样。根据目前情况,最常用的是氧化锌压敏电阻器和碳化硅压敏电阻器,其中又以体型的为主。本文所论及的氧化锌压敏电阻器,就是指体型而言。这类压敏电阻器的材料具有如下优良的电气特性:

- (1) 非线性系数  $\alpha$  大(约 50 左右);
- (2) 脉冲的端压降低,防护性能好;
- (3) 通流密度大(达 3000 安培/厘米<sup>2</sup>);
- (4) 电压温度系数小(达  $5 \times 10^{-4}$  /°C);
- (5) 能量密度大(可达 200 焦耳/厘米<sup>2</sup>);
- (6) 时间响应快(约 50 毫微秒);
- (7) 无持续电流(但耐热性不如碳化硅压敏电阻器好)。

## 一、压敏电阻器的技术参数

从(1)式中看到,决定伏安特性的两个参数 ( $\alpha, C$ ) 是很重要的,现讨论如下:

### 1. 非线性系数 $\alpha$ 的物理意义

将(1)式两边取自然对数,并微分得

$$\alpha = \frac{dI/dU}{I/U} = \frac{G_{动}}{G_{静}} = \frac{\operatorname{tg} \theta_2}{\operatorname{tg} \theta_1} \quad (2)$$

显而易见,  $\alpha$  为动态电导  $G_{动}$  与静态电导  $G_{静}$  的比值。对于线性电阻器,  $dI/dU = I/U$ , 所以  $\alpha = 1$ 。

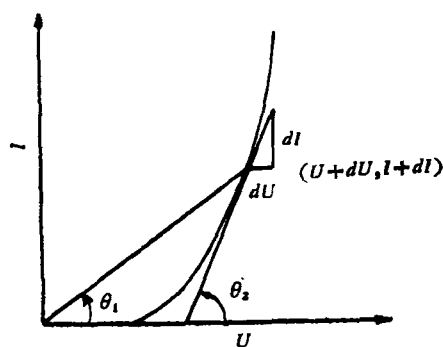


图2 伏安特性的图示分析

从图2中可以看到,  $G_{动}$  为曲线上某一点切线的斜率  $\operatorname{tg} \theta_2$ ,  $G_{静}$  为相应点和坐标系原点连线的斜率  $\operatorname{tg} \theta_1$ 。很清楚,  $\alpha$  的物理意义为动态电导  $G_{动}$  偏离静态电导  $G_{静}$  的程度,同样也为压敏电阻偏离线性电阻的程度。  $\alpha$  愈大,压敏性愈好。

根据(1)式,得

$$\alpha = \frac{d \lg I}{d \lg U} = \frac{\lg I_2 - \lg I_1}{\lg U_2 - \lg U_1} \quad (3)$$

式中  $I_1, I_2$  分别为通过压敏电阻器中的两个电流,  $U_1, U_2$  为相应的端压降。

1) 压敏电阻器与光敏电阻器、热敏电阻器等,均属于敏感电阻器类。在无线电领域内,根据习惯,我们采用压敏电阻器这个名称。过去,我们曾将此元件称为非线性电阻器 (Nonlinear Resistor), 但此名称往往容易把放电管、硒整流片(反向电阻)、水电阻等包括在内,很不确切。一些国家保留此名称也是属于习惯用语。

为了计算方便,通常令  $I_2 = 10^* I_1$ , (3) 式可简化为

$$\alpha = n / \lg \eta, \quad (4)$$

式中  $\eta = U_2 / U_1$ , 称为电压比。

当氧化锌压敏电阻用作高压稳压元件时,通常  $n = 1$ ,  $I_2 = 10 I_1$ , 相应的  $U_1, U_2$  都是指直流端压降。当氧化锌压敏电阻用作过电压保护元件时,通常  $n > 1$ ,  $U_1$  是指通过直流 1 毫安时的端压降(即压敏电压  $U_{1mA}$ ),  $U_2$  是指被压抑的过电压。这时的电压比  $\eta (n > 1)$ , 又叫做保护比,象征着保护效果的好坏。

从(4)式可以看出,因为  $n$  为常数,所以  $\alpha$  与  $\eta$  是同一概念的不同表达形式而已。图 3 给出了  $n = 1, 2, 3, 4$  时  $\alpha$  与  $\eta$  的关系。通常,  $\eta$  用起来比  $\alpha$  方便。 $\eta$  愈小,压敏电阻器的稳压效果与防护效果均愈好。

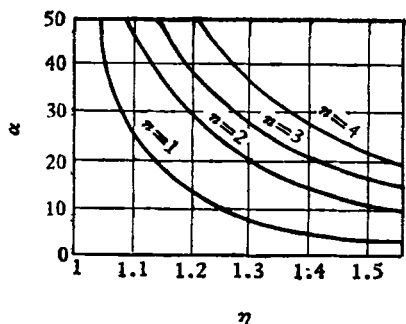


图 3  $\alpha$  与  $\eta$  的关系

## 2. C 值的物理意义

在(1)式中,令  $I = 1$  安,得

$$1 = \left(\frac{U}{c}\right)^\alpha$$

因为  $\alpha \neq 0$ , 所以  $U = c$ 。

$C$  值的物理意义为压敏电阻器通过 1 安培电流时的端压降。因受产品平均功率的限制,  $C$  值通常只能在脉冲电流下测得。不难看出,  $C$  值与  $U_{1mA}$  成正比。所以  $U_{1mA}$  的大小,可定性代表  $C$  值的大小。

显而易见,只有相同伏安特性的压敏电阻器,才能进行串、并联组合。计算表明<sup>[12]</sup>,  $C$  值随着串联数目的增加而增加,而并联后却不影响  $C$  值。同理,压敏电压  $U_{1mA}$ , 也随串联数目的增加而增加,而并联后,对压敏电压  $U_{1mA}$  并无影响。但是,如果通流密度均匀的话,扩大压敏电阻器的并联数,通流量将可按比例地增加。

经验证明,只要氧化锌压敏电阻器的伏安特性接近一致,采用多个压敏电阻器的串、并联方式,将可满足各种不同的需要。

当氧化锌压敏电阻器的成分、含量、工艺

物理

条件一定时,它的单位厚度的压敏电压  $U_{1mA}$  值、单位面积的通流量和单位体积所承受的功率等参数就大致被决定下来。所以,在一定的配方与工艺条件下,控制压制尺寸(厚度和面积),可以得到不同规格的产品。

压敏电阻器,随着用途的不同,对其技术参数的要求也不一样。总的来说,氧化锌压敏电阻器还有许多其他参数,例如标称压敏电压、直流工作电压、交流工作电压、最大允许漏电流、额定功率、额定能量、电压温度系数、电流工作范围、通流量和时间响应等技术参数<sup>[23]</sup>,这里就不再赘述。

## 二、氧化锌压敏电阻器的制造工艺、微观结构与导电机理

### 1. 制造工艺

氧化锌压敏电阻器,是以氧化锌为主要材料,外掺微量的铋等多种金属氧化物,按照典型的陶瓷工艺制备而成(见图 4)。氧化锌压敏电阻器在制造上有一个特点,即它的技术性能对配方、工艺并不那么敏感<sup>[3]</sup>,这给氧化锌压敏电阻器的扩大生产带来了方便。

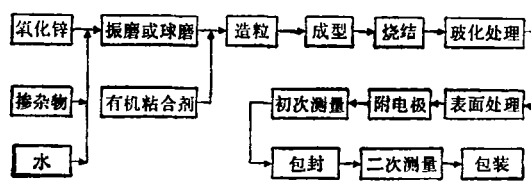


图 4 氧化锌压敏电阻器的工艺流程

### 2. 微观结构

含有多种金属氧化物的氧化锌压敏电阻器,其微观结构是比较复杂的,如图 5 所示。从图中可以看出,氧化锌压敏电阻器包含三种相成分。现以外掺  $Bi_2O_3, MnO_2, CoO, Sb_2O_3$  等附加成分的氧化锌压敏电阻器<sup>[4]</sup> 为例,具体分析如下:

#### (1) 主晶相

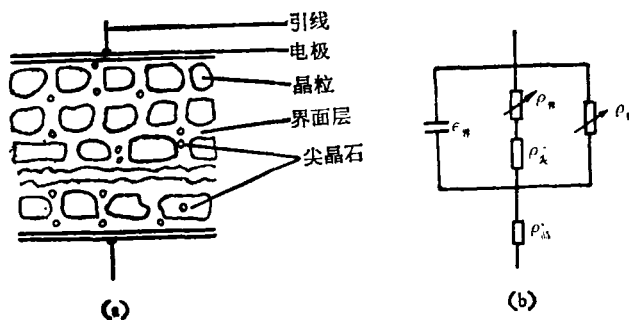


图 5 微观结构 (a) 与等值电路 (b)

由掺  $\text{Co}^{2+}$  的导电氧化锌 ( $\text{ZnO}$ ) 的晶粒组成,  $\text{Co}$  离子位于氧离子组成的四面体中心, 此晶粒的电阻率  $\rho_{\text{晶}}$  约为 1 欧姆·厘米。

## (2) 晶界相

晶界相是指存在于两个或多个氧化锌晶粒之间的间隙中的相。在高温下, 晶界相呈现液相, 其化学组成为  $\text{Bi}_2(\text{Zn}4/3, \text{Sb}2/3)\text{O}_6$  的阴离子缺位的焦绿石结构, 其中 A 位置由  $\text{Bi}^{3+}$  离子占据, B 位置由  $\text{Zn}^{2+}$  离子和  $\text{Sb}^{3+}$  离子占据。在 Zn 位置上还有  $\text{Mn}^{2+}$  离子和  $\text{Co}^{2+}$  离子替位形成替位固溶体。这种固溶体的结构为链状的三维网络, 有很高的电阻率, ( $\rho_{\text{晶}} = 10^{13}$  欧姆·厘米), 它与压敏性的产生有密切的关系。

## (3) 第三相

这里所说的第三相是指在氧化锌晶粒之间以及氧化锌晶粒内部还存在着一种尖晶石相, 其化学成分为  $\text{Zn}(\text{Zn}4/3 \text{ Sb}2/3)\text{O}_4$ , 在 Zn 位置上还存在  $\text{Mn}^{2+}$  离子和  $\text{Co}^{2+}$  离子的替位。这些尖晶石相也是一种绝缘体。但其电阻率  $\rho_{\text{尖}} \ll \rho_{\text{晶}}$ , 所以它对压敏性没有贡献, 它的存在影响电流分布, 影响通流量, 另外, 它还有抑制氧化锌晶粒生长的作用。

根据过去的习惯, 我们总是把晶粒间的晶界相与尖晶石相的混合结构叫做界面层。

综上所述, 氧化锌晶粒是一种导电性良好的  $n$  型半导体, 而界面层 (晶界相) 却是一种电阻率很高和介电系数较大的绝缘薄层。因此在低压下, 氧化锌压敏电阻器呈现绝缘状态, 通过其中的电流极小 ( $< 1$  微安)。但当压敏电阻器上的端电压达到某一数值时,  $\rho_{\text{晶}}$  突然下降, 电压的微增将引起电流的高次方倍增。压敏电阻器的微观结构及其相应的等值电路如图 6 所示。

## 3. 导电机理

虽然, 氧化锌的压敏电阻器的压敏性与界面层有

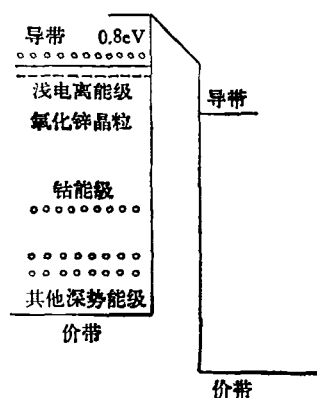


图6 隧道效应模型

关, 但关于界面层导电机理的解释, 各种理论之间却是相互矛盾的, 和实验结果也有很大的出入。到目前为止, 还没有举世公认的导电机理。现将四种比较流行的导电机理简介如下:

## (1) 雪崩理论

这种理论认为, 氧化锌压敏电阻器的导电机理, 与一般二极管的雪崩效应相似。载流子在外加电场作用下获得能量, 与晶格碰撞后由于碰撞电离而产生新的载流子, 新的载流子经电场加速后又产生新的碰撞。多次碰撞后就产生雪崩的倍增现象, 导致电流的急速增加, 得到很高的  $\alpha$  值。根据雪崩理论, 电压温度系数是正值<sup>[5]</sup>, 但实验结果与其相反。可见在氧化锌压敏电阻器中, 雪崩理论的解释碰到难以克服的困难。

## (2) 空间电荷饱和电流 (SCLC) 理论<sup>[6]</sup>

这种理论假定在氧化锌压敏电阻器的界面层中有许多深势阱能级存在。在低压时, 注入的导电电子通过界面层的绝大部分被这些势阱俘获。当外加电压  $U$  到达某一临界值  $U = U_{\text{临}}$  时, 深势阱为注入电荷填满。如果电压继续增加, 注入电荷急速增加, 产生很高的  $\alpha$  值。

按照 SCLC 理论, 氧化锌压敏电阻器的起始工作电压 (临界值) 为

$$U_{\text{TFL}} = 2\pi e L^2 N_T / \epsilon, \quad (5)$$

式中  $e$ ,  $L$ ,  $\epsilon$  分别为电荷、界面层的厚度与介电系数,  $N_T$  为界面层的势阱密度。

试验证明,  $L, \epsilon$  随成分和工艺不同而变化不大, 如果略去它们的影响, 不难看出,  $U_{\text{TFL}}$  与  $N_T$  成比例。我们知道, 随着氧化锌压敏电阻器的成分与工艺的不同,  $N_T$  发生几个数量级的变化是常见的。但实践证明,  $U_{\text{TFL}}$  的变化最多不过 10 倍左右, 两者不相符合, 因此 SCLC 理论动摇了。

## (3) 肖特基发射理论

肖特基发射理论<sup>[7]</sup>是假定氧化锌压敏电阻器的晶粒表面彼此接触, 由于表面态的电子发射而产生压敏性。但纯氧化锌 (不含有附加成分) 制成的烧结体总是呈现欧姆性。只有当附加成分含量超过 0.1 克分子百分比以上, 才能产生压敏性。这是肖特基发射理论无法解释的。根据肖特基发射理论,  $\alpha$  与  $T$  的关系为

$$\alpha = E_0 / 2KT, \quad (6)$$

式中  $E_0$  为逸出功,  $K$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为绝对温度。

## (4) 隧道效应

1975 年, Levinson 等人<sup>[8]</sup>提出的一种隧道效应

的模型(见图6)。按照这种模型,在低电场下,电子受热激发越过高度约为0.8电子伏的势垒(晶粒与界面层之间)的导电电子是不多的。这相当于低电场下的漏电流。在高电场下,由于能带的倾斜,势垒变薄,电子越过薄势垒的隧道效应能显示出来,呈现压敏性。

产生隧道效应的电场大于  $10^6$  伏/厘米,此数据相当于界面层的厚度  $t = 100$  埃。现今势垒高度  $\varphi_0 \approx 1$  电子伏,电场强度  $E \approx 2 \times 10^6$  伏/厘米,电流密度  $J = 10^{-3}$  安培/厘米<sup>2</sup>,按理论计算,

$$\alpha = \ln 3.39 \times 10^2 \frac{E}{\varphi_0} - \ln J \approx 33.$$

此结果较实验值略小,目前  $\alpha_{\max}$  可达 100 以上。

最近使用高分辨率的电子显微镜的测量,产生压敏性的焦绿石的膜状结构的平均厚度约为 200 埃,有些地方可能接近 50 埃<sup>[9]</sup>。这一测量结果给隧道效应以有力的支持。但总的来说,此模型尚不够完善,与实验结果还有距离,要使理论模型与实验现象相符合,还有待于进一步努力。

另外,一些实验证明,产生压敏性的势垒层在氧化锌晶粒与膜状焦绿石结构的界面上,而不是在界面层全部,这一事实本身就进一步否定了 SCLC 理论。

### 三、压敏电阻器的发展概况

我们知道,高压电器、电缆由于绝缘裕度较小,因此雷过电压的保护问题就非常迫切,早在二十年代末期,就有人研究了高压避雷器阀片<sup>[10]</sup>。直到四十年代,硅、锗点接触的半导体二极管相继问世,由于它们的耐压能力很差,促使人们在高压阀片的基础上去研究低压碳化硅压敏电阻器。在 1948—1958 年间,随着面接触的半导体二极管、三极管、高频管、场效应管以及可控硅的相继出现,促成了碳化硅压敏电阻器的大量投产。同时,充气放电管、硒整流片等也都用作过电压保护元件。但是,由于碳化硅压敏电阻器以及其他过电压保护元件的技术性能均很不理想,因此,早在 1951 年,就有人<sup>[11]</sup>开始对氧化锌压敏电阻器进行研究,但一直在摸索中徘徊<sup>[12]</sup>。直到 1968 年,日本松下电气公司在此问题的研究上有所突破,第一次成功地试制了氧化锌压敏电阻器<sup>[6]</sup>。此新型元件优越的电气性能,很快赢得了人们的广泛注意。美国 1970 年开始了这项研究工作<sup>[13]</sup>,随后其它国家也开始了这类工作。我国是 1971 年开始试制这类产品的。

氧化锌压敏电阻器的用途很多,但大致用于过电压保护和高压稳压两方面。尽管黑白电视中作高压稳压用的氧化锌压敏电阻器在 1972 年就已投产<sup>[14]</sup>,但是采用这类高压稳压元件后,功率消耗加大了,行末级输出管的功率不够,又反过来限制了这类高压稳压元件的发展。然而氧化锌压敏电阻器在用于过电压保护方面,

发展却很迅速,特别是在降低氧化锌本体电阻率  $\rho_{\text{本}}$  方面有所突破,制成了高压无间隙避雷器。这一事实使人们对此新型元件的兴趣更大了。新型无间隙避雷器投入运行,将能降低高压输电网络的绝缘水平。这是一个巨大进展。氧化锌压敏电阻器的另一分支是高能氧化锌压敏电阻器<sup>[15,16]</sup>。

## 四、应用

压敏电阻器的应用问题正在不断地发展,涉及的面也很宽。目前主要用于过电压保护方面,下面作简要的介绍。

### 1. 过电压保护的原理

雷击(直接雷与感应雷)引起的大气过电压是很清楚的。但是,在各种电气设备和无线电设备中,大量存在的还是操作过电压。所谓操作过电压,即电路的工作状态突然变化,其等值参数急速改变,电路的能量状态急速过渡,由一种能量状态向另一种状态过渡,在过渡过程中引起过电压。造成这种过电压的原因很多,例如正常的操作,继电器与可控硅的动作,保险丝的熔断等,都可以引起过电压。

我们知道,压敏电阻器的用途不同,对其电参数的要求也就不一样。但是,根据氧化锌压敏电阻器的特点,用于大气过电压和操作过电压的保护是非常合适的。

过电压保护的本质,就是将过电压的能量转化成电流,此电流在压敏电阻器本体中消耗掉,过电压被抑制在一定范围以内。图 7 清楚地说明了保护的原理。在图 7 中,等负载线的斜率取决于安装压敏电阻器的等效阻抗;等负载线在坐标轴上的截距的大小,取决于过电压的能量。等负载线与伏安特性曲线上交点的纵坐标,代表通过压敏电阻器中的电流,相应的横坐标代表被抑制后的过电压幅值。 $U_1, U_2, U_3$  分别代表三种不同过电压能量的空载(不接压敏电阻器)过电压。

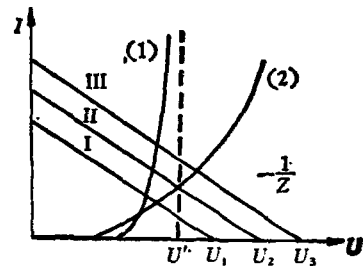


图 7 保护效果的图示分析  
(1)——氧化锌压敏电阻器;  
(2)——碳化硅压敏电阻器

令  $U'$  为被保护设备的绝缘水平。等负载线 I 在碳化硅和氧化锌两种压敏电阻上被抑制的过电压均小

于  $U'$ , 设备有效地得到了保护。等负载线 II 和 III, 在氧化锌压敏电阻器上被抑制的过电压均小于  $U'$ , 设备有效地得到了保护, 而在碳化硅压敏电阻上被抑制的过电压却大于  $U'$ , 设备无法得到保护。

## 2. 应用范围

(1) 目前已做成 500 千伏以下的各类避雷器, 可对电力系统大气过电压和操作过电压有效地进行保护;

(2) 电视和各类电子设备;

(3) 铁路、城市交通和航海的信号装置的过电压保护;

(4) 各类强发送装置中的高压硅堆和阻流圈的过压保护;

(5) 继电器触点火花的消除, 真空开关动作过程中火花的消除等, 并可延长继电器、真空开关的寿命;

(6) 可做超导设备在失去超导电性时的移能装置;

(7) 可消除由于摩擦而引起的静电高压问题。

## 参 考 文 献

[1] 刘鸿运, 无线电技术, 1974 年, 第 4 期, 第 20 页。

- [2] 电子工业技术词典编辑委员会, 电子工业技术词典(电阻、电容与电感部分), 国防工业出版社 (1977), 6-35.
- [3] H. R. Philipp et al., *J. Appl. Phys.*, **48-4**(1977), 1921.
- [4] J. J. Wong, *Appl. Phys.*, **46-4**(1975), 1953.
- [5] K. G. Mchay, *Phys. Rev.*, **94**(1954), 877.
- [6] M. Matsuoka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **10** (1971), 736.
- [7] J. D. Levine, *Crit. Rev. Solid State Sci.*, **5**(1975), 391.
- [8] H. R. Philipp et al., *J. Appl. Phys.*, **46-7**(1976), 3207.
- [9] W. G. Morris, *J. Vac. Sci. Technology*, **13** (1976), 926.
- [10] B. B. 帕塞科夫等著, 非线性半导体电阻及其应用 (1962年版的中文译本), 国防工业出版社, (1964).
- [11] 管他秀三 他, *東芝レビュー*, **6-6**(1951), 75.
- [12] 増山勇, *エレクトロニク、ヤマックス*, **4(通巻29)**-11 (1973), 64.
- [13] J. D. Harnden et al., *Electronics*, **45-21** (1972), 91.
- [14] 永田春一 他, *明電時報*, **6(通巻119)**(1974), 57.
- [15] 松岡雄道, *電子材料*, **16-2**(1977), 57.
- [16] 松岡雄道, *エレクトロニク、ヤマックス*, 夏号, **6(通巻40)**-7(1975), 16.

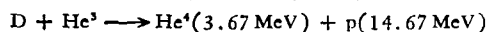
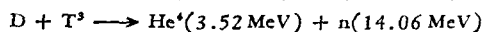
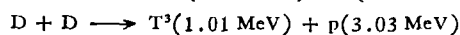
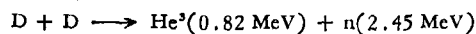
# 受控聚变研究中的表面物理问题

王 龙

(中国科学院物理研究所)

## 一、受控聚变研究的目标

在目前阶段, 受控聚变研究的目标是在反应堆中实现原子核的聚变反应并得到能量输出。这种反应的主要反应式是



在以上各式中, 括号中的量表示反应产生粒子携带的能量, 单位为 MeV。

由于在常温下, 这一反应的截面太小, 一般认为, 这一反应应在五百万到一千万度以上的高温下进行。这时的反应物质处于等离子体态, 反应称为热核反应。

因此, 为实现受控热核反应, 须把反应物约束在一

定的实验装置内, 并且使它达到一定的密度, 加热到一定的温度。这个条件可用反应离子密度  $n$ , 离子温度  $T_i$  和离子的能量约束时间  $\tau$  来表示。若只考虑韧致辐射的能量损失, 并假设一定的能量转换效率, 就得到正能量输出的条件, 又称点火条件。

对于 D-D 反应, 这一临界条件为

$$T_i \sim 100 \text{ keV}, \quad n\tau \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{sec}.$$

对于 D-T 反应

$$T_i \sim 6 \text{ keV}, \quad n\tau \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{sec}.$$

以上条件一般称为劳逊 (Lawson) 条件。

## 二、杂质的影响和来源

以上是非常理想的点火条件, 实际上由于杂质的存在, 使这条件大大提高了。

等离子体中的非反应物均称为杂质。杂质对实现热核反应有以下影响: