

# 固体内异常核反应研究进展

朴禹伯 王学智

(兰州大学原子核研究所 兰州 730001)

**摘要** 分析、介绍了固体内异常核反应研究的现状及今后研究的方向。

**关键词** 离子注入法 多体聚变反应 固体内异常核反应 冷聚变

## 1 引言

自1989年 Flieschman 和 Pons 发表所谓“冷聚变”实验结果以来,虽然多数追踪实验未能得到重复性结果,但仍有许多实验得到了积极的结果.从40多起突发性中子脉冲测量结果和异常核反应产物观测结果中看出,极少中子的产生和大量氦的产生,即  $n/T$  比很低,约  $10^{-5} \sim 10^{-7}$ .对观测到 $^4\text{He}$ 和高能带电粒子,用已知的 D-D 聚变反应无法解释.另外,多数研究表明,这些核现象起因于固体内靠近表面的内层中.

对上述实验条件的分析可看出,都以很高的电解电流密度和极高的氦离子吸附率  $D/Pd > 0.85$  为基本条件.

的确, Pd 等金属具有特殊性质.在固体内氦离子密度可达到  $\sim 10^{23}/\text{cm}^3$ .在极高氦离子密度下,在某种外力或等离子体振荡的激发下和在动态过度过程中,可能形成氦离子簇团(cluster),进而发生多体聚变反应<sup>[1]</sup>.

如果这种过度现象存在,且进而发生多体聚变反应,其主要的条件是极高的氦离子密度和超级电子屏蔽以及所要的激发能.

离子注入法可以人工方法极大地提高固体内氦离子密度,并可使氦离子具有不同的能量.用核物理方法彻底研究多体聚变反应以及冷聚变的可能性和机制,这就是固体内异常核反应研究的主要内容.日本等国在近年来发展了用离子注入法研究固体内异常核反应的方法和技术,并取得了积极的结果.

日本已有20多个财团联合组织新氢能基础研究推进委员会,成立了能源综合研究所,拨出相当可观的经费支持这项研究.用离子注入法研究固体内异常核反应是其中主要内容之一.

## 2 研究方法及实验结果

现考虑离子注入到金属薄膜的情况.设氦离子电流密度为  $J$ ,限束光阑直径为  $a$ ,薄膜厚度为  $d$ ,则注入率为  $5 \times 10^{18} Ja^2/d$ .设  $a = 1\text{cm}$ ,  $J = 10\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $d = 10\mu\text{m}$ ,那么,氦离子密度增加率  $d\rho/dt = 8 \times 10^{19}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ .

由此看出,如果薄膜是事先用电解法吸附过氦离子,那么,  $D/Pd > 0.85$  或更高是很容易实现的.

由于带电粒子在固体内电离截面约为  $10^{-16}\text{cm}^2$ ,带电粒子在极薄的表面层中迅速减能,从入射能量  $E_0$  减少到  $10\text{eV}$  左右.

Pd 等金属具有以下重要性质.(1)  $0$  位置或  $t$  位置上可以填充氦离子,金属内氦离子密度接近  $10^{23}/\text{cm}^3$ .(2) 一个 Pd 原子缺陷形成时,该空位中可填充6个氦离子,其结合能约为  $0.5\text{eV}$ .(3) 由于氦离子相对固定在晶格内,电子屏蔽作用使 D-D 反应率比自由粒子状态大10个数量级以上,金属内电子,其量子效应显著,是一种量子等离子体.

然而,在平衡态中,晶格内氦离子之间距离不可能小于  $2.5\text{\AA}$ ,因此,不可能观测到核反应现象<sup>[2]</sup>.

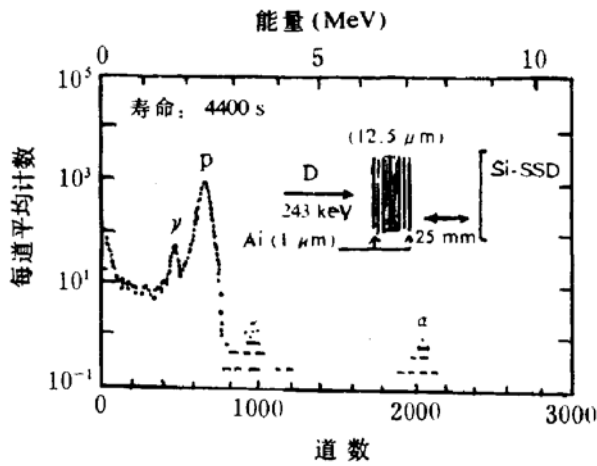


图1 由1.25 $\mu\text{m}$  PdD<sub>x</sub> 中发射的带电粒子能谱

高桥等人提出在非平衡态过度过程中,可能产生多体聚变反应. 其主要论点是:(1) 设晶格内零位置由氘离子填充, 另外一个 t 位置上也填充氘离子, 那么,  $D/Pd > 1.25$ . (2) 被激发的 0 位置上氘离子向 t 位置运动, 并在 Pd 的 4D 上准自由电子也参予电子屏蔽作用. (3) 在 D 离子得布罗意波长范围内形成粒子簇团. (4) 在外部或本身等离子振荡中产生的过度过程中产生多体聚变反应.

这种多体反应模型, 虽从理论上讲不够完善, 但可以解释聚变反应中极少中子的产生和高能带电粒子的产生. 目前, 这一领域内的研究, 集中于检测高能带电粒子产生.

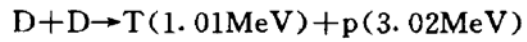
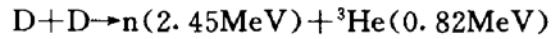
**2.1 大阪大学的实验结果**

大阪大学 Iida 等人利用 OKTAVIAN 强中子发生器, 用 243keV 氘离子脉冲束, 进行固体内异常核反应研究<sup>[3]</sup>. 他们采用的脉冲束流的主要参数是: 脉冲宽度 3ns, 重复频率 2Mc, 平均电流 2~10 $\mu\text{A}$ .

采用的 Ti 薄膜厚度为 3~20 $\mu\text{m}$ , Pd 薄膜厚度为 5~22 $\mu\text{m}$ . 带电粒子的能量由 Si-SSD 来测量, 粒子的种类则用  $\Delta E$  (经特定厚度薄膜后的能量) 以及由偏转板和 MCP 组成的粒子分辨系统来完成. 用 RBS 方法始终观测样品表面的变化. 典型的实验结果见图 1 所示. 其中 3.02MeV 的 p 峰是 D-D 反应产生的. 而 2.7MeV 附近的 p 峰估计为  $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$  反

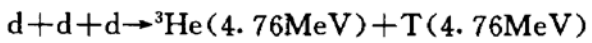
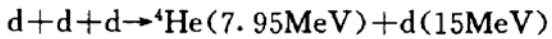
应生的. 在 2000 道附近有峰值, 经粒子辨别, 确认为  $\alpha$  粒子, 其能量为 6.6MeV.

众所周知, D-D 聚变反应, 有以下几种反应道.



其中, 第三种反应的分支比为  $10^{-7}$ , 而前两种各为 50%. 由此看出, 实验中 6.6MeV  $\alpha$  峰是异常的. 很有意思的是有时氘离子注入停止之后,  $\alpha$  计数持续几分钟.

根据多体反应模型, 3 体反应有:



实验中观测到的  $\alpha$  粒子能量一般在 5~8MeV 范围内. 因此, 将此  $\alpha$  峰分析、推测为多体反应产生的.

**2.2 东北大学的实验结果**

日本东北大学笠木等人用 150keV 氘离子束注入到事先吸附氘离子的 Ti 薄膜中, 观测到异常高能带电粒子<sup>[4]</sup>. 通过  $\Delta E-E$  双维谱的测量, 将粒子的全能和粒子种类同时判明. 其实验结果见图 2 和图 3 所示.

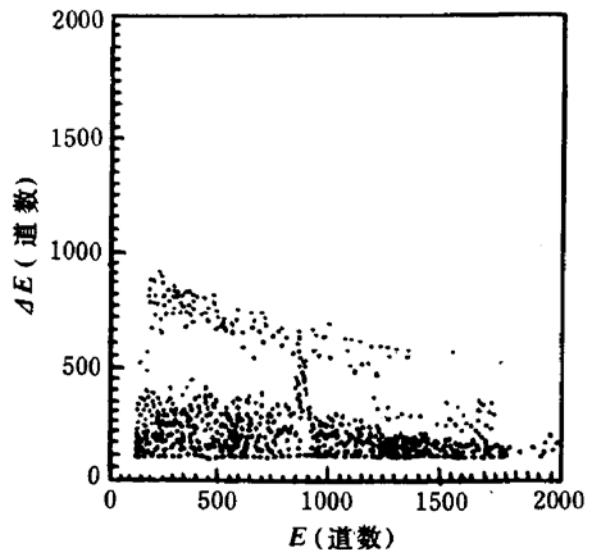


图2 TiD<sub>x</sub> 150keV D<sup>+</sup> 照射下,  $\Delta E-E$  双维谱.  $\alpha$  粒子分布在  $\Delta E: 600 \sim 900$  channel

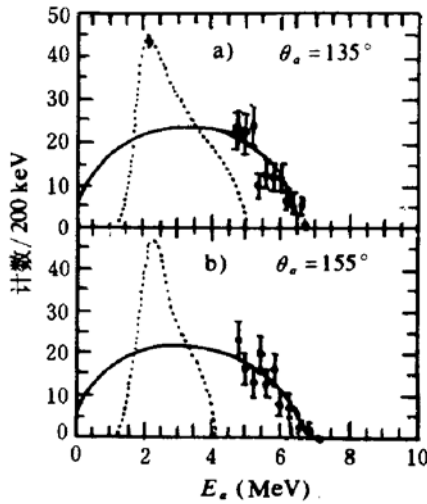


图3  $\alpha$  粒子能谱. 虚线为逐次反应模型计算结果, 实线为3体反应计算结果

实验结果得到两个结论. (1)  $TiD_x$  中存在  $^3He$  异常集中. 通常的逐次反应, 不大可能有如此高的计数. 逐次反应指  $D + D \rightarrow n + ^3He$  和  $^3He + d \rightarrow ^4He (2.87MeV) + p (13.9MeV)$ . 通过  $D-D$  反应产生的  $^3He$ , 在其停止之前的路程上引起第二个反应. (2) 多体反应可能存在. 图3表明  $\alpha$  粒子是按实线分布的.

$TiD_x$  中异常的  $^3He$  的集中和异常  $\alpha$  能谱, 都说明  $TiD_x$  中可能存在某种多体反应.

### 2.3 George 等人的实验结果

美国 George 等人用超低能氘离子束注入到  $Ti$  薄膜中, 观测到异常核反应. 主要的实验条件是: 氘离子能量  $350eV$ , 电流密度  $0.2 \sim 0.4mA/cm^2$ .

实验中观测到氢同位素带电粒子, 其能量为  $5MeV$ , 每对氘离子产生异常带电粒子的几率为  $10^{-16}/s$ . 观测到氢同位素经辨别, 认为是氦.

通常,  $D-D$  反应不可能产生  $5MeV$  氦粒子. 如果  $3D$  聚变反应是可能的话, 如上所述, 有可能产生  $4.76MeV$  氦粒子.

## 3 讨论

如上面所分析, 离子注入法研究固体内异常核反应, 取得了引人注目的实验结果, 观

测到通常所知  $D-D$  聚变反应之外的核反应产物—高能带电粒子. 如果这些实验结果能进一步得到确认, 摆在人们面前的问题是弄清固体内这种异常核反应机制是什么, 进而研究在电解过程中的某些特定的过度过程中有没有可能产生“冷聚变”, 其条件是什么?

作者曾于1994年在日本大阪大学参加过该项研究, 试用更强的氘离子束和分子离子束轰击  $Pd$  或  $Ti$  薄膜, 进一步证实上述实验. 目前, 该实验研究中遇到的主要问题是:

(1) 实验数据的重复性较差. 除了对靶材料的纯度、杂质等复杂因素的精确分析等困难外, 主要是  $D$  密度的提高并不那么容易. 氘在  $Pd$  中扩散, 由分式  $\sqrt{\pi P t}$  来估计. 其中  $P$  为扩散系数, 约  $10^{-8} \sim 10^{-7}cm^2/s$ ,  $t$  为时间. 也就是说, 氘在  $Pd$  中扩散速度为  $1 \sim 10\mu m/s$ . 因此, 若注入时间长, 扩散也严重, 局部形成高密度也变成比较困难. 另外, 扩散随温度升高而迅速增加. 尤其是较强的电流注入时, 靶的冷却是个很大问题, 需要特殊的工艺来解决冷却问题.

(2) 多粒子簇团的形成需要很强的电子屏蔽效应和多粒子聚合同时性要求.

金属中电子气体是一种强耦合电子气体. 金属中强耦合电气体的泊松方程为

$$-\nabla^2\varphi(r) + k_{TF}^2\varphi(r) = 4\pi Ze\delta(r) \quad (1)$$

式中,  $k_{TF} = (4\lambda r_s/\pi)^{1/2}k_F$ , 是托马斯-费米屏蔽常数;  $r_s = (3/4\pi n)^{1/3}(me^2/\hbar^2)$ , 是无量纲系数;  $k_F = (3\pi^2 n)^{1/3}$ , 其中,  $n$  为电子密度,  $m$  为电子质量,  $\lambda = (4/9\pi)^{1/3} = 0.521$ .

泊松方程的近似解为

$$\varphi(r) = \frac{Ze}{r} e^{-k_{TF}r}$$

不难看出, 即使  $Pd$  的  $4d$  层准自由电子都参予屏蔽作用,  $r_s = 1.2$ ,  $k_{TF} = 2.7 \times 10^8 cm^{-1}$ . 因此,  $r < 2.7 \text{ \AA}$  以内, 屏蔽效应并不显著.

动态等离子体集团运动中, 量子化等离子体振荡中的每个等离子体子所得能量为

$$E_p = \hbar\omega_p = 47.1r_s^{-3/2} = 36eV \quad (2)$$

(下转第18页)

# Langevin Fluctuation-dissipation Dynamics of Fusion and Fission Reactions Induced by Heavy Ions

Liu Guoxing

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract** This paper described how Langevin equation is applied to the fusion and fission reactions induced by heavy ions. It includes the transformation of a Fokker-Planck equation to a Langevin equation, Langevin description of heavy-ion induced fusion reaction and a combined dynamical statistical model.

**Key Words** langevin equation nuclear friction statistical fluctuation Monte-Carlo sampling of trajectories combined dynamical statistical model

(上接第36页)

在 QED 等离子体模型中,  $E_d$  能量可以提高到 100eV, 但这仍不能说明有可能产生核反应现象. 是否存在弱耦合机制, 即  $r_s < 1$ , 这需要进行进一步研究.

## 4 今后研究的方向

首先进一步提高注入电流密度, 关键是改进靶的冷却技术. 其次是将注入能量从目前的 100keV 扩展到超低能, 即 5keV ~ 几百 eV. 在 100keV 能区, 增加离子流密度, 继续观测异常高能带电粒子的发射. 在超低能区, 测量 D-D 反应截面, 同时观测高能带电粒子的发射. 日本东北大学正在加紧这方面准备

和研究工作. 第三对强耦合电子气多体问题, 在某种过度过程中, 是否会出现某种弱耦合现象, 需要进一步研究.

总之, 随着固体内异常核反应的研究, 需进一步弄清氦离子在超低能, 极高密度时的异常核反应现象. 这对彻底搞清冷聚变的可能性和开发新氢能源, 具有重大意义.

## 参 考 文 献

- 1 Takahashi A. Proc. Russian Conf. Cold Fusion, 1993
- 2 Fukai Y. Proc. ICCF3, 1992
- 3 Iida T. OKTAVIAN Report, 1993
- 4 笠木, 治郎太. 东北大学研究报告, 1994

# Progress in Study of Anomalous Nuclear Reaction in Solid

Piao Yubo Wang Xuezhong

(Institute of Nuclear Research, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**Abstract** Present status and further research trend in study of anomalous nuclear reaction in solid is reviewed.

**Key Words** ion beam implantation multibody fusion anomalous nuclear reaction in solid cold fusion