

自旋极化的原子核表面谱法

叶 慧
(复旦大学)

摘 要

利用极化的原子束可以获得自旋极化的原子核。研究极化核和表面的相互作用,可以探测表面的电磁场分布。这是八十年代发展起来的一种新技术,称为自旋极化的原子核表面谱法。应用这一技术,能直接描述表面的电场梯度,从而知道表面电荷的微观细节,既能分析表面结构,又可用来研究表面动力学机制。本文介绍了自旋极化的原子核表面谱学的理论,以及三种典型的实验,即核自旋弛豫实验、核能级混合实验和核磁共振实验。阐明实验的原理、方法和结果,并讨论了该技术将来发展的方向。

我们考虑的粒子束,具有核自旋 I (如 ${}^6\text{Li}$, $I = 1$; ${}^7\text{Li}$, ${}^{23}\text{Na}$ 等, $I = 3/2$)。由于空间量子化,它应该有 $(2I + 1)$ 个磁次能级,每一个磁次能级用磁量子数 m_l 来表示 ($-I \leq m_l \leq I$)。粒子处于 m_l 的几率(或者说在 m_l 能级上粒子的布居数)用 N_m 表示。 $\sum_m N_m = 1$ 。如果 N_m 和粒子数平均值 $(2I + 1)^{-1}$ 之间有差别,我们就说这束是极化了。

为了简便起见,一般不用一组粒子布居数来表示极化,而是用它们的线性组合和不同阶的张量分量来表示。常用的有球张量 t_{kq} (阶 $k \leq 2I$)。球极化张量 t_{kq} 和密度矩阵元 $\rho_{mm'}$ 之间的关系可表示为

$$t_{kq} = \sqrt{2I + 1} \cdot \sqrt{2k + 1} \\ \times \sum_{mm'} (-1)^{I-m-q} \\ \times \begin{pmatrix} I & I & K \\ m & -m & q \end{pmatrix} \rho_{mm'}, \quad (1)$$

对角的密度矩阵元 ρ_{mm} 相当于在原子核的磁次能级 m 上的相对粒子数 N_m , $\begin{pmatrix} I & I & K \\ m & -m & q \end{pmatrix}$ 表示的是 Clebsch-Gordon 系数。

表 1 表示极化度和 m 能级上粒子数 N_m 的关系。

七十年代,西德汉堡大学有人研究过 ${}^6\text{Li}$ 的极化离子源。当 ${}^6\text{Li}$ 原子束经过一个六极磁铁时,由于空间磁场的均匀性,产生电子自旋极化。电子自旋的极化通过超精细作用的耦合,再加上射频场的作用,就可以获得极化的核。当时,为了更好地加速极化束,必须把原子束电离成离子束。他们用了—个加热的钨带作为表面电离器,把 Li 原子束中价电子剥掉。结果,他们偶然地发现了固体表面会引起原子核自旋的退极化的现象。

八十年代,西德海德堡大学有人用同样的方法研究 ${}^7\text{Li}$ 极化离子源,发现从表面电离器上脱附的离子的原子核极化度降低得更多。经过研究认识到,如果表面电离器材料的温度一定,则退极化的速率与核的四极矩和其周围的电场梯度相互作用有关。 ${}^7\text{Li}$ 的核四极矩大于 ${}^6\text{Li}$ 的四极矩,所以 ${}^7\text{Li}$ 退极化的现象显著。

以上事实,使人们意识到,极化了的原子核可以作为—种有效的探针,用来探测表面的电磁场分布。

传统的表面技术大部分用来分析表面的结构和成分,而用自旋极化的原子核表面谱法(简称 SPNSS 法)则能直接描述表面电场梯度,从而知道表面电荷的微观细节,用它既能分析表面结构,又可研究表面动力学机制。

表 1

极化度	$I = 1$	$I = 3/2$
ϵ_{10}	$(3/2)^{1/2}(N_1 - N_{-1})$	$(9/5)^{1/2}[(N_{3/2} - N_{-3/2}) + \frac{1}{3}(N_{1/2} - N_{-1/2})]$
ϵ_{20}	$(1/2)^{1/2}(1 - 3N_0)$	$(N_{3/2} + N_{-3/2}) - (N_{1/2} + N_{-1/2})$
ϵ_{30}	1	$(9/5)^{1/2}[\frac{1}{3}(N_{3/2} - N_{-3/2}) - (N_{1/2} - N_{-1/2})]$

自 1982 年至今,从事 SPNSS 工作的典型实验基本上有三种,即核自旋弛豫实验(简称 NSR)^[1]、核自旋混合实验(简称 NLM)^[2] 以及核磁共振实验(简称 NMR)^[3]。

目前这方面工作尚处于开始阶段,仅限于用极化了的碱金属原子核打在加热的金属表面上,探测脱附粒子的极化度,以研究金属表面的电场梯度。毫无疑问,这项技术完全可以用于研究半导体和绝缘体的表面。探测核种类也不限于碱金属,可以是卤素原子,奇 A 数的稀有气体,或氢和氘的同位素原子等。这项新技术的推广应用一定会对表面物理,表面化学等提供新的信息。

一、极化原子核和表面相互作用的理论

1. 实验的一般情况

SPNSS 实验如图 1 所示。核自旋极化的碱金属原子束以热运动速度打在样品表面上,大部分探测原子被吸附。由于原子核具有磁偶极矩和电四极矩,它们和表面的磁场、表面电场梯度或任何外加的电磁场相互作用。根据探测核的偶极矩和四极矩的相对大小,这些作用可分为表面磁场作用、表面电场梯度作用,或二者兼而有之。

实验中可以用各种方法使被吸附的原子脱附(以原子或离子形式脱附),测量脱附粒子的极化度可以得出表面的电场梯度或磁场。

2. 极化原子核和表面相互作用的理论

极化原子核和表面的相互作用可归结为具有多极矩 M_{kq} 的原子核和表面上的一定的电荷分布相互作用。这种电荷分布的效应可用多

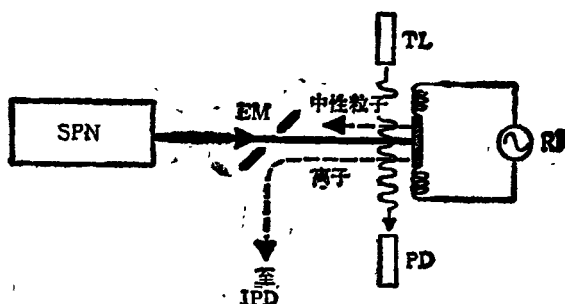


图 1 SPNSS 实验的一般原理图^[4]

SPN——从原子束中得到的自旋极化原子核; EM——静电反射镜; TL——可调谐激光器; RF——射频源,供进行 NMR 实验; PD——光探测器以探测中性粒子的极化度; IPD——离子极化度探测系统

极场 V_{kq} 来描述。通常把与表面相互垂直的导向磁场方向定义为 z 轴方向,则 xy 平面为表面所在平面。

探测核和其周围的表面场相互作用的哈密顿量可表示为 $H(t)$,

$$\begin{aligned}
 H(t) &= \sum (-1)^q V_{kq}(t) M_{k-q} \\
 &= V_{00}M_{00} + V_{10}M_{10} - V_{11}M_{1-1} \\
 &\quad - V_{1-1}M_{11} + V_{20}M_{20} \\
 &\quad - V_{21}M_{2-1} + V_{22}M_{2-2} \\
 &\quad + \dots,
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中 M_{kq} 为核多极矩算符,其第一项只包括原子核的电荷,不包括自旋效应。

$k = 1$ 时为磁偶极作用。偶极项和一阶张量有关。

$$\left. \begin{aligned}
 V_{1\pm 1} &= \mp \frac{1}{\sqrt{2}} (B_x \pm iB_y), \\
 M_{1\pm 1} &= \pm \mu l_{\pm} / (\sqrt{2}l), \\
 V_{10} &= B_z, \quad M_{10} = -\mu l_z / l,
 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

$B_i (i = x, y, z)$ 为表面磁场在直角坐标系中的

分量, I, I_{\pm} 和 I_z 相当于核自旋角动量算符、其升降算符和 z 分量。

$K = 2$ 时为电四极作用, 即二阶(四极)场 V_{2q} 和二阶核矩 M_{2q} 作用, 其中 M_{2q} 正比于核的电四极矩 eQ 。

$$\left. \begin{aligned} V_{2\pm 2} &= \frac{1}{2\sqrt{6}} (V_{xx} - V_{yy} \pm 2iV_{xy}), \\ V_{2\pm 1} &= \frac{1}{\sqrt{6}} (V_{xz} \pm iV_{yz}), \\ V_{20} &= \frac{1}{2} V_{zz}, \\ M_{2\pm 2} &= \frac{\sqrt{6}}{4I(2I-1)} eQ I_{\pm}^2, \\ M_{2\pm 1} &= \frac{\sqrt{6}}{4I(2I-1)} eQ (I_z I_{\pm} - I_{\pm} I_z), \\ M_{20} &= \frac{1}{2I(2I-1)} eQ [3I_z^2 \\ &\quad - I(I+1)], \end{aligned} \right\} (4)$$

$V_{ij}(i, j = x, y, z)$ 相当于以直角坐标表示的电场梯度。它可以包括电场梯度涨落部分或包括电场梯度以核的拉莫尔进动周期 $1/\omega_L$ 缓慢变化成分 ($\omega_L = g\mu B/\hbar$)。这里要指出, V_{kq} 是时间的函数。

可以应用密度矩阵的公式推导出探测粒子系综的极化度作为粒子和表面相互作用时间的函数的一般表示式。

密度矩阵元 $\rho_{mm'}$ 的运动方程式为

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{mm'}(t) &= i\omega_{mm'} \rho_{mm'}(t) \\ &\quad - \frac{i}{\hbar} \langle Im' | [V_{kq}(t), \rho(t)] | Im \rangle \\ &\quad + \sum R_{m'n'n'm'} \rho_{n'n'}(t), \end{aligned} \quad (5)$$

第一项表示不受微扰时的自旋系统作简谐变化; 第二项表示原子核和外加“静态”场的作用, 以拉莫尔进动周期缓慢地变化; 第三项表示原子核和表面原子不可逆的相互作用, 描述自旋弛豫的效应。

目前, 实验分两大类: (1) 核自旋弛豫实验 (NSR)^[4], 即极化的原子核被表面吸附, 在表面上有一段居留时间, 这时因受到无规涨落的电磁场以及电场梯度的作用而退极化。在这情况

下, (5) 式中的第二、第三项都起作用。(2) 核能级混合实验 (NLM) 和核磁共振实验 (NMR), 即探测核在表面居留的时间十分短, 虽然弛豫效应对它有影响, 但不是主要的。主要还是受外加场的作用引起退极化。外场引进的拉莫尔进动频率比极化核自旋进动的特征频率慢, 在计算时, (5) 式中的第三项可略去, 主要考虑平均多极场引进的效应。

二、实验的原理及仪器

SPNSS 实验是从研究极化离子源项目发展过来的, 所以设备和当时的工作有关。

1. 实验的原理

在实验中用导向磁场 B_0 (一般为 0.1—0.3 T) 使原子核在飞向表面的过程中自旋保持不变。

极化原子核打在表面上被表面吸附, 该原子和表面相互作用的时间由表面的温度决定。可用 Arrhenius 关系表示:

$$\tau = \tau_0 \exp(E_d/k_B T), \quad (6)$$

其中 τ_0 为特征时间, E_d 为脱附粒子的激活能量, k_B 为玻耳兹曼常数, T 为温度。

脱附粒子中呈离子状态的比例为

$$N_+/N_0 = \frac{1}{2} \exp[-(I - \phi)/k_B T], \quad (7)$$

其中 ϕ 为表面的功函数, I 为探测原子的电离能。可以应用束箔光谱学的方法, 测量快速离子穿过碳箔后退激辐射的光的偏振性来定出核的极化度^[5]。对于中性的脱附粒子, 其极化度可以应用激光诱发荧光法 (LIF) 来测量^[6,7]。

2. 实验装置

这里介绍西德 Marburg 实验室中的装置 (见图 2)。

在实验中, 锂或钠放在小的不锈钢炉里加热致蒸发, 蒸气经过喷嘴和 Skimmer 组合装置成为束, 进入六极磁场, 该磁场使电子自旋为某一方向的原子聚焦, 而使电子自旋处于相反方向的原子散焦。六极磁场的后面, 有一静磁场和射频场。表面样品 ($\phi \sim 1\text{cm}$) 被用丝吊

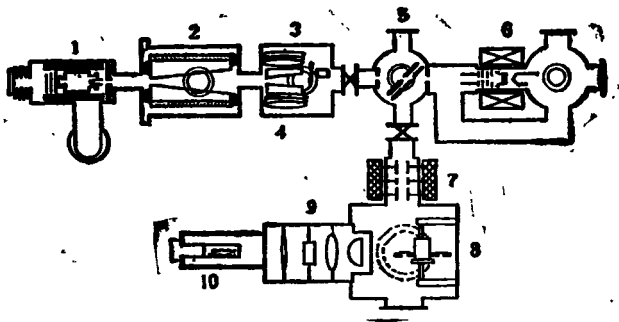


图2 Marburg 实验室的以极化碱金属原子束进行的 SPNSS 实验示意图^[4]

1—炉子；2—六极磁铁；3—截流转盘；4—射频跃迁部分；5—静电反射镜；6—磁场螺线管（在表面加一磁场）；7—用于加速和聚焦的离子透镜系统（10—20keV）；8—碳箔；9—探测离子极化度的光学系统；10—光电倍增管

在钽的支架上，在样品背面用电子枪轰，使表面加热，让被吸附的粒子脱附。

做 NMR 实验时，样品置于两个线圈之间，以使表面处于一交变的微扰电场中。整个装置又处于一个大的螺线管磁场中，以得到约 300 mT 的导向磁场，为束的极化提供量子轴的方向。

极化束和表面作用后，脱附的离子被一静电透镜组加速，又受一静电反射镜的作用，因而偏转 90°。在这里离子加速到 15—20keV，然后通过一薄的碳箔。离子离开碳箔时往往俘获电子成为激发态的中性原子。当它衰变时，会发光。测量光的偏振性即可了解原子核的极化情况。有关这方面的技术，可参考复旦大学快离子束光谱组的工作^[8-10]。

三、具有代表性的 SPNSS 实验

1. 核自旋弛豫实验 (NSR)

图 3 反映极化的 ²³Na 原子核和 Ir 表面作用的极化度随温度变化的情况。可以看到，用不同方法制备的 ²³Na 束打在用不同方法制备的多晶 Ir 表面上，测量 ²³Na 的矢量极化度 ϵ_{10} 对温度的关系。发现：当温度低时，高度极化的原子核在表面居留时间长，由于原子核和表面上的涨落电场大量地相互作用，以致可以完全

退极化。而当温度高时，极化核在表面居留的时间短，极化的原子尚未完全退极化时就可被电离以致脱附，这时脱附离子可以保持相当高的核极化度。

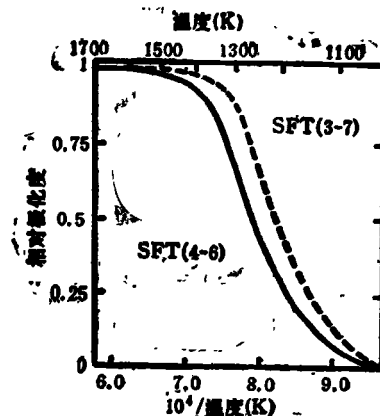


图3 极化的 ²³Na 原子核和 Ir 表面作用时，矢量极化度随温度变化的关系
(二条曲线表示原子束极化的情况不一样)

极化度随温度的变化，反映出极化度随作用时间长短的关系。这一关系基本上可用下式描述：

$$P^i(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} P^i(t) \exp(-t/\tau) dt$$

$$= \frac{P_0^i}{\alpha^i \tau + 1}, \quad (8)$$

其中 P^i 为极化度 i 成份， α^i 为弛豫速率， τ 为居留时间。

我们可以从理论计算中导出一组各阶极化度变化率的耦合方程^[1]。如果我们只讨论矢量极化度的情况，则方程为

$$(\hbar^2/2\tau_c) \dot{\epsilon}_{10}$$

$$= -\epsilon_{10} \left[\frac{4}{9} \mu^2 |\overline{V_{11}}|^2 + \frac{1}{5} (cQ)^2 \right]$$

$$\times (|\overline{V_{21}}|^2 + 4|\overline{V_{22}}|^2)$$

$$+ \epsilon_{20} \frac{4}{\sqrt{15}} \mu c Q R_c (\overline{V_{21}} \overline{V_{11}}^*)$$

$$- \epsilon_{30} \left(\frac{2}{5} \right) (cQ)^2 (|\overline{V_{21}}|^2 - |\overline{V_{22}}|^2).$$
(9)

假如我们所用的探测核具有很大的四极矩,如 ^{23}Na ,则含磁矩平方项 μ^2 和含四极矩平方 $(eQ)^2$ 的项相比,前者可忽略不计。另外在制备极化束时,可以使二阶极化度 r_{20} 很小,因此通过测量各极化束的退极化的变化率,可以得到相对的 V_x 和 V_y 强度,它们分别对应涨落的电场梯度在表面平面与不在表面上的分量[参看(4)式]。

如果相关时间 τ_c 决定了,则可以精确地得到电场梯度在表面平面上与不在平面上的分量的绝对值。

2. 核能级混合实验 (NLM)

NSR 实验是极化的原子核在加热表面上快速地作扩散运动,引起退极化效应,测量脱附粒子极化度的变化,得到涨落的电场梯度的均方值。

NLM 和 NMR 实验是考虑另一领域中的情况,即退极化场的时间标度比原子核在磁场中的拉莫尔进动周期 $1/\omega_L$ 长。在做实验时,通常选取较高的表面温度,这样可以忽略弛豫效应。这类实验测量的不是涨落的场梯度,而是原子核经受到的平均场的梯度。

如果一个粒子在表面上受“静态”场的作用,其哈密顿量中包含两个部分:偶极作用部分 H_D (即一阶相互作用)与四极作用部分 H_Q (二阶相互作用),即

$$H = H_D + H_Q = \sum_q (-1)^q V_{1q} M_{1-q} + \sum_q (-1)^q V_{2q} M_{2-q}. \quad (10)$$

在轴对称的情况下,只有 $q = 0$ 的项有贡献。

$$\left. \begin{aligned} M_{10} &= -\mu I_z / I & V_{10} &= B_z, \\ M_{20} &= eQ[3I_z^2 - I(I+1)] / & & \\ & 2I(2I-1) & V_{20} &= V_{zz}/2, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

实验时,用 ^{23}Na ($I = \frac{3}{2}$)的极化粒子束打

在不同的钨的表面上。如果所加外磁场的方向和电场梯度张量的最大主轴方向一致,则有关

$I = \frac{3}{2}$ 的粒子和表面作用,在磁场中能级分裂的情况,以及极化度和外场的关系可见图4。

从图4(a)可看到,当 $B_0 = 0$ 时, $m = \pm \frac{3}{2}$ 和 $m = \pm \frac{1}{2}$ 分别简并,但是它们之间分裂,这一分裂是四极作用引进的。随着磁场的增加,塞曼能量增大,简并消失。在这种情况下,在 $B_0 = 3\omega_Q I / \mu$ 和 $B_0 = 6\omega_Q I / \mu$ 处会出现能级交叉,其中 ω_Q 为四极频率。 $\hbar\omega_Q = (eQ)V_{zz} / [4I(2I-1)]$ 。

如果同一个表面电场梯度张量为非轴对称的,则能级也会交叉,此时 $q = \pm 2$ 的项将有贡献

$$\left. \begin{aligned} M_{2\pm 2} &= \{eQ \sqrt{6} / [4I(2I-1)]\} I_{\pm}^2, \\ V_{2\pm 2} &= (V_{xx} - V_{yy}) / 2 \sqrt{6} = \eta V_{zz} / 2 \sqrt{6}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

η 称为非对称参数, $\eta = (V_{xx} - V_{yy}) / V_{zz}$ 。这一作用仅影响 $\Delta m = 2$ 能级的交叉。

如果表面的法线和电场梯度张量最大主轴间相互倾斜,则 $q = \pm 1$ 的项将有贡献。 $V_{2\pm 1}$ 的存在将影响 $\Delta m = 1$ 能级的交叉(电场梯度张量主轴和外磁场方向一致)。

实验是在倾斜角为 5.2° 时进行的。可以看到,随着磁场的变化,出现了两个“峰”。在 $B_0 = 3\omega_Q I / \mu$ 处,发生了 $\Delta m = 2$ 的能级交叉,测到了一个峰。另一个峰出现在 $B_0 = 6\omega_Q I / \mu$ 处,在那里发生了 $\Delta m = 1$ 的能级交叉。

实验可测得 B_0 。已知 I 和 μ ,即可通过 ω_Q 求得电场梯度张量中轴对称的部分 V_{zz} 。由图4(b)中可以看到,对于洁净的,或有氧覆盖的表面,“共振”发生在相同的磁场强度处。这意味着对这两种表面来说 V_{zz} 是相同的。在磁场较高处,测到的能级交叉点,不仅磁场相同,而且共振形状类似。在磁场较低处,“共振”形状有明显区别。这表示加了氧后,电场梯度张量的非对称参量有明显的改变。应用数据拟合法,得到清洁的和有氧覆盖的W(110)表面,其非对称参量 η 分别为0.08和0.02。

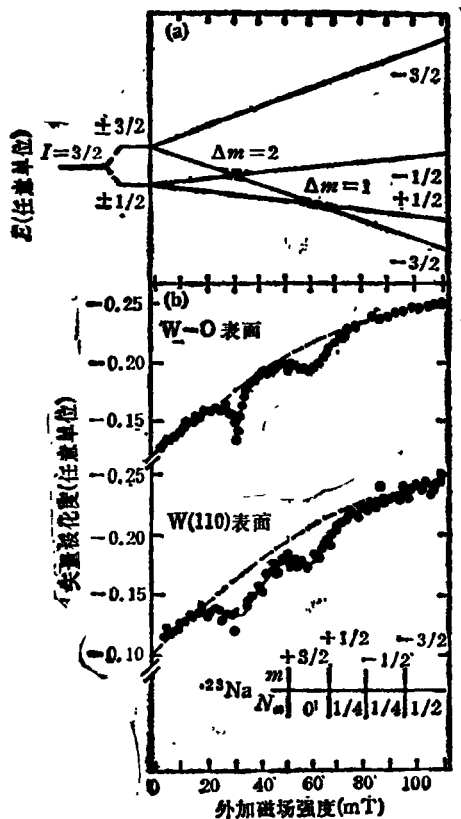


图4 (a) 当电场梯度存在并有四极作用时的 $I = \frac{3}{2}$ 粒子的塞曼能级图; (b) 分别从清洁的, 或覆盖了氧的钨 W(110) 表面脱附的 ^{23}Na 离子的矢量极化度与外加磁场强度的函数关系图(图下方插入的表, 表示入射束在各磁次能级上的相对布居数^[43])

3. 核磁共振实验 (NMR)

NMR 实验是 SPNSS 技术中最引人注目的一种。例如, 用自旋 $I = 1$ 的原子核(如 ^6Li) 作为探测核, 其矢量极化度与磁次能级的相对布居数关系为

$$t_{10} = \left(\frac{3}{2}\right)^{1/2} (N_{+1} - N_{-1}).$$

自旋为 1 的系统, 在射频场和磁场的作用下, 当射频场的频率和原子核拉莫尔进动频率 ω_L 一致时, 在正常塞曼效应下会产生一单个共振线。然而, 由于电四极矩的存在和表面电场梯度的相互作用, 这一共振线可以分裂成二个频率分别为 $\omega_+ = \omega_L + 3\omega_Q$ 和 $\omega_- = \omega_L - 3\omega_Q$ 的两个共振线。其中 ω_Q 为四极频率。图 5 为 ^6Li 被 W(O) 表面吸附后的核磁共振谱。

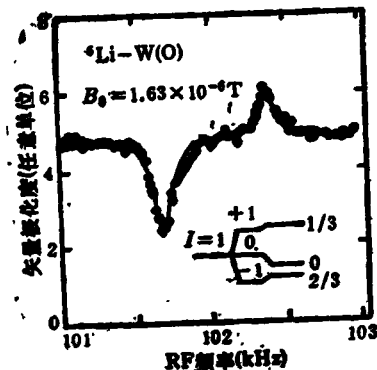


图5 ^6Li 入射原子束在 W(110)-O 表面上的 NMR 谱拉莫尔频率为 102.1kHz; 图下方插图表示入射束核次能级上的相对布居数

从图 5 可看到, 当原子核和静磁场 B_0 以及一个平均的电场梯度相互作用时, 测到如预期的双共振谱。由曲线中测到的分裂为 720Hz, 对应的电场梯度为 $V_{zz} = 3.08(8) \times 10^{15} \text{ V/cm}^2$ (^6Li 的电四极矩 $Q = 0.8 \text{ emb}$)。从图 5 中还可看到, 当射频跃迁发生在 $m=0 \rightarrow m=1$ 之间时, 极化度增加; 当跃迁发生在 $m=-1 \rightarrow m=0$ 之间时, 极化度减小。由此可定出 V_{zz} 的符号。

四、SPNSS 实验将来的方向

SPNSS 实验的优点在于, 这种测量是非损伤性的。可以这一技术的应用, 有助于对表面的磁化、表面化学以及扩散动力学等更深入的理解。

评价 SPNSS 作为一个广义的表面物理谱学潜在的影响时, 可以分别考虑 SPNSS 三个基本的组成部分, 它们分别为: (1) 产生自旋极化的原子核的源; (2) 控制极化核在表面居留的时间的技术; (3) 测量相互作用以后的核极化度的方法。

产生自旋极化的原子核的方法, 不局限于用原子束的方法。针对不同的探测核可以采用不同的极化方法。表 2 列出在表面应用中, 不同极化核源的类别。

控制极化核在表面居留的时间, 除了应用

热脱附法外,还可考虑电子束、光子束以及激光束激励脱附的方法。有关这方面的工作可参考文献[11,12]。

关于核极化度的测量,束箔监察技术是十分有用的。它的优点在于既方便,又省钱,而且操作也容易。然而,这种方法用在 SPNSS 研究表面时,只有在表面的功函数和被吸附的核素的电离能相差不多时才有效。因此,这一技术常用于研究碱金属原子打在金属表面上或打在半导体表面上,而不是对其他各种表面都适用的。

表 2 表面应用中极化核素的类别

原子核	I	μ/μ_N	$Q(\text{mb})$	极化类型
^1H	1/2	2.793		原子束
^2D	1	0.857	2.74	光抽运技术
^3T	1/2	2.979		自旋转移
^6Li	1	-0.82	-0.8	原子束
^7Li	3/2	-3.256	-37.6	光抽运技术
^{23}Na	3/2	-2.217	110.0	光抽运技术,原子束
^{14}N	1	0.404	16.0	原子束
^{19}F	1/2	2.627		原子束
^3He	1/2	-2.127		光抽运技术
^{21}Ne	3/2	-0.662	90.0	自旋转移

现在正在积极研究的一种探测极化的有效技术,是在一磁场中测激光诱发的荧光(LI-F)^[6,7]。这一技术直接给出各磁能级上相对的布居数,能以相同的灵敏度直接提供各阶极化度的讯息。而束箔技术测量的是极化度和仪器分析能力的乘积。对所测量到的极化度要用对应的分析能力给以权重。譬如对三阶极化来说,对某一种特定的离子,分析能力十分小或几

乎为零。

另外还可以应用脉冲激光进行多光子共振电离^[13,14],这种技术几乎是通用的,对许多实验几何位形来说,它可能更为有效。

SPNSS 技术是一个核物理、原子物理、表面物理的神秘混合体,它发展成为一个实用的表面谱学是有重要的意义的。因为自旋极化的原子核既有偶极矩又有四极矩,不同的原子核其偶极矩和四极矩之比可以相差很大(见表 2),所以在应用该技术时本能地可以有很宽的选择余地。

SPNSS 无论对多晶表面、无定形材料表面,还是单晶样品表面,都能给出有意义的信息。以它作为表面研究的一种通用手段,前景是十分乐观的。

- [1] B. Horn et al., *Z. Phys. B*, **48-4** (1982), 335.
- [2] E. Koch et al., *Phys. Lett. A*, **109-7** (1985), 355.
- [3] B. Horn et al., *Phys. Rev. Lett.*, **53-4** (1984), 364.
- [4] R. F. Haglund, Jr., *Hyperfine Interactions*, **30-2** (1986), 73.
- [5] H. J. Andra et al., *Z. Phys. A*, **281-1/2** (1977), 15.
- [6] P. G. Pappas et al., *Phys. Rev. A*, **21-6** (1980), 1955.
- [7] H. Jansch et al., *J. Phys. D*, **17-2** (1984), 231.
- [8] B. I. Deutch et al., *原子核物理*, **2-3**(1980), 205.
- [9] B. I. Deutch et al., *Proc. of Int. Conf. on Nuclear Physics, Abstracts, LBL-11118, Lawrence Berkeley Lab., CA Abstracts, (1980), 659.*
- [10] 孙昌年等, *物理*, **10-8**(1981), 479.
- [11] R. F. Haglund, Jr. et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res* **B13** (1986), 525.
- [12] N. H. Toik et al., *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res.*, **B2** (1984), 457.
- [13] M. J. Pellin et al., *Surf. Sci.*, **144** (1984), 619.
- [14] F. M. Kimock et al., *Anal. Chem.*, **56-14** (1984), 2782.

1988 年第 12 期《物理》内容预告

无序系统的分形行为(黄立基等);光电子发射的一百年(陶如玉译);主动光纤(董孝义);原子簇的结构和性质(王广厚);内界面衍射效应(沙维);PTC 热敏半导体的应用(陈光增);离子束增强沉积在材料表面改性和优化方面的应用(郑彦等);利用三光束动力学效应获得衍射相位信息——解决 X 射线相角问题的新

进展(张建中);一种新的 X 射线衍射物相定量法——J 值法(乐秀虎等);脉冲强磁场下的法拉第效应(朱泽智等);光学矩阵运算(III)(陈岩松等);短寿命中子解决了氦丰度问题(许霖译);罕见中微子给“失踪的质量”设置了限值(许霖译);简单的实验,深远的影响(张鹏翔);全息术是怎样发展起来的? (林木欣)