

平面阻塞效应测量 $E_p = 1565\text{keV}$ 时

$^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$ 共振反应寿命*

金卫国 赵国庆 邵其鋈 任月华 吴向坚 周筑颖

(复旦大学原子核科学系)

1986年11月4日收到

提 要

采用(111)面阻塞效应测量了 $E_p = 1565\text{keV}$ 共振时 $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$ 核反应寿命。用解析方法分析实验数据。测到的核寿命 $\tau = 17.9 \pm 4.4\text{as}$, 与 $\langle 110 \rangle$ 轴阻塞效应测量结果和文献给出的结果在误差范围内一致。测量了 $E_p = 1183.4\text{keV}$ 时(111)面的 α 粒子的阻塞分布, 并与理论计算作了比较。

一、引 言

带电粒子在晶体内发生的阻塞效应, 是直接测量 $10^{-16}—10^{-18}\text{s}$ 原子核能级寿命的唯一方法^[1]。在实验上, 观察核反应粒子的轴阻塞效应或面阻塞效应来确定核寿命。轴阻塞效应较面阻塞效应显著, 但其实验数据的处理和分析复杂。利用轴阻塞效应或平面阻塞效应测量 $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$ 共振核反应寿命都已有报道^[2-4]。我们曾用 $\text{Al}\langle 110 \rangle$ 轴阻塞效应, 测量了 $E_p = 887.8\text{keV}$ ^[2] 和 $E_p = 1565\text{keV}$ ^[6] 共振时 $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$ 核反应寿命。为了检验轴阻塞效应的实验结果, 本文报道了利用 $\text{Al}\langle 111 \rangle$ 平面阻塞效应测量

$$E_p = 1565\text{keV}$$

共振核反应(对应于 ^{28}Si 13.095 MeV 激发态能级)寿命。

二、实 验 方 法

实验测量装置^[5,6]如图1所示。质子束由复旦大学3MeV静电加速器提供, 经 $\phi 1\text{mm}$ 的小孔准直后打到 Al 单晶上。质子束能量用共振核反应校刻。样品是沿(100)晶面切割的、厚为2mm的 Al 单晶, 其 $\langle 100 \rangle$ 晶轴与样品表面法线的偏角小于 0.5° 。样品的表面处理包括机械抛光、化学抛光和真空热退火^[5,6]。表面处理后的样品经过清洗装在二维定角器上。利用 $\text{Si}(\text{Au})$ 半导体探测器测量 ^4He 离子的背散射产额进行样品晶轴定向, 使 Al 样品的(100)面在束流和水平面内。样品的 $\langle 100 \rangle$ 轴与束流夹角为 50° , 而两个 $\langle 110 \rangle$

* 中国科学院科学基金资助的课题。

轴($\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$), 统称为 $\langle 110 \rangle$)与束流的夹角分别为 5° 和 95° 。采用上海感光胶片厂生产的 $140\text{ }\mu\text{m}$ 厚的醋酸纤维素薄膜作为固体径迹探测器(简称STD), 在两个 $\langle 110 \rangle$ 轴方向同时记录核反应产生的 α 粒子。经蚀刻后, 观察到的 α 粒子阻塞效应的径迹图象(示意图)如图2所示, 它是由 $\langle 110 \rangle$ 轴为中心和过此中心的几组晶面所组成的星状花纹, 其中 (100)

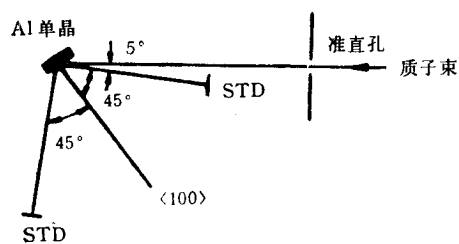
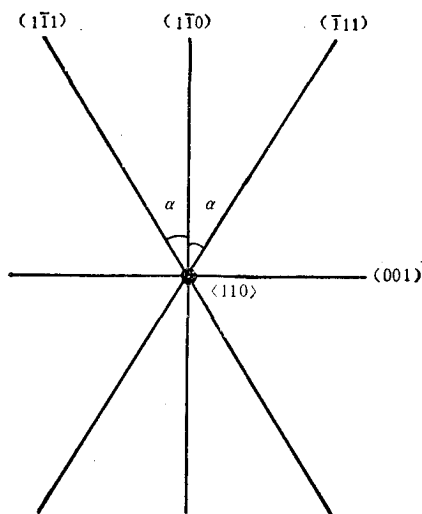


图1 阻塞实验测量装置示意图

图2 $\langle 110 \rangle$ 轴向的阻塞径迹花纹
 $\alpha = 35.26^\circ$

面对应于实验时的水平面。平面阻塞角分布或轴阻塞角分布分析都可给出核反应寿命。

(111) 面间距在 fcc 晶格中最大, 因此常采用 (111) 面的阻塞分布来获得核寿命。图2中的 $(\bar{1}11)$ 面和 $(1\bar{1}1)$ 面是等价的, 统称为 (111) 。复合核 ^{28}Si 的反冲速度 v 在 5° 和 95° 方向沿着垂直于 (111) 面的分量 v_D 分别为 $v \sin 5^\circ \cdot \cos 35.26^\circ \approx 0$ 和 $v \cos 5^\circ \cdot \cos 35.26^\circ$ 。 5° 和 95° 方向测量的分别称为“瞬发”和“延迟”阻塞分布。

测量 $E_p = 1565\text{ keV}$ 共振寿命时, 在径迹探测器前加一 $4\text{ }\mu\text{m}$ 厚的Mylar膜, 把 1565 keV 共振发射的 α 粒子能量从 2.5 MeV 降到 1.5 MeV 左右; 而能量较低的 1438 keV 共振发射的 α 粒子能量从 1.5 MeV 降到 0.35 MeV 以下, 固体径迹探测器对此能量的 α 粒子不灵敏^[7], 从而排除了 $E_p = 1438\text{ keV}$ 共振的干扰。

平面阻塞效应中 α 粒子径迹的读数是取垂直于平面方向间隔为 0.1 mm , 长 9 mm 范围内的累计径迹数, 作为某一角度下的出射 α 粒子产额, 总的读数范围为宽 5 mm 。

三、理论分析

为了定量描写平面阻塞分布, 类似于轴阻塞分布中引入阻塞分布体积参数一样, 我们引入阻塞分布面积 S , 其定义为^[3,4]

$$S = \int_0^{\phi_m} (1 - Y(\phi)/I) d\phi, \quad (1)$$

式中 $Y(\phi)$ 为非归一化的阻塞角分布; I 为随机方向的产额, 称为归一化常数; ϕ_m 为当 $Y(\phi)$ 达到随机值($Y(\phi) = I$)时的角度。两晶面的阻塞分布面积之比 R (称为相对面

积)为

$$R(\nu_D \tau) = S(\nu_D \tau) / S(0), \quad (2)$$

式中 τ 为复合核寿命. $R(\nu_D \tau)$ 与 $\nu_D \tau$ 关系称为定标曲线. 实验上测到的“延迟”分布面积相对于“瞬发”分布面积之比 R 与定标曲线相比较, 就可得到核寿命 τ .

阻塞分布 $Y(\phi)$ 的计算有两种方法, 即 Monte Carlo 模拟法和解析方法. 我们曾用这两种方法对轴阻塞效应做过比较细致的计算^[8,9]. 解析方法比 Monte Carlo 模拟法简单和省时, 本文采用解析方法计算.

忽略电子和核的多次散射效应, $Y(\phi)$ 可写为^[10,11]

$$Y(\phi) = \int dE_D \cdot \pi(E_D) \cdot T(E\phi^2, E_D) \cdot \left(\frac{E\phi^2}{E_D}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中 E 为粒子能量; E_D 为粒子横向垂直能量, 其表达式为

$$E_D = E\phi^2 + U_t(x), \quad (4)$$

式中 $U_t(x)$ 为沟道粒子受到的总的作用势. $T(E\phi^2, E_D)$ 为表面透射因子; $\pi(E_D)$ 为横向能量分布,

$$\pi(E_D) = \int_{x_m}^{d_p/2} p(x) dx \cdot \left(\frac{E_D}{E_D - U_t(x)}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

式中 d_p 为晶面的面间距; x_m 为沟道粒子距晶面的最近距离, 它满足

$$U_t(x_m) = E_D; \quad (6)$$

$p(x)$ 为晶格原子的位移几率, 分两种情况讨论:

1) 复合核无反冲时, $p(x)$ 就是晶格原子在平衡位置作热振动的几率(高斯分布),

$$p(x) = (1/(\sqrt{2\pi} \cdot \rho)) \cdot \exp[-x^2/2\rho^2], \quad (7)$$

式中 ρ 为晶格原子一维热振动振幅的均方根值.

2) 复合核沿着垂直于晶面的方向反冲了 $\nu_D \tau$ 距离时(假定沿着 x 方向反冲), $p(x)$ 应该是复合核热振动分布几率与复合核反冲几率的卷积, 即

$$p(x) = (\exp((-x/\nu_D \tau) + \rho^2/2(\nu_D \tau)^2)/2 \cdot \nu_D \tau) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{\rho}{\sqrt{2} \nu_D \tau} - \frac{x}{\sqrt{2} \rho}\right], \quad (8)$$

式中 $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-z^2} dz$ 称为互补的误差函数.

表面透射因子 $T(E\phi^2, E_D)$ 为

$$T(E\phi^2, E_D) = k(E_D) \cdot \int_{x_m}^{d_p/2} \frac{dx}{d_p} \cdot \left(\frac{E_D}{E_D - U_t(x)}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \delta(E_D - E\phi^2 - U_t(x)), \quad (9)$$

$$k(E_D) = \left(\int_{x_m}^{d_p/2} \frac{dx}{d_p} \cdot \left(\frac{E_D}{E_D - U_t(x)}\right)^{\frac{1}{2}}\right)^{-1}. \quad (10)$$

这样 $Y(\phi)$ 为

$$Y(\phi) = \int_0^{d_p/2} \frac{dx}{d_p} \cdot k(E\phi^2 + U_t(x)) \cdot \pi(E\phi^2 + U_t(x)). \quad (11)$$

计及邻近两个晶面的贡献, 总作用势 $U_t(x)$ 为

$$U_t(x) = U_T(x) + U_T(d_p - x), \quad (12)$$

$U_T(x)$ 为已考虑晶格热振动的单个晶面的连续势,

$$U_T(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x') \cdot dx' \cdot U(|x - x'|), \quad (13)$$

式中 $U(x)$ 为单个晶面静态的连续势, $p(x)$ 如 (7) 式所示。如果沟道粒子与靶原子的作用势取 Moliere 势, 则 $U(x)$ 为

$$U(x) = 2\pi Z_1 Z_2 e^2 \cdot N d_p \cdot a \cdot \left[\frac{0.1}{6} e^{-6x/a} + \frac{0.55}{1.2} e^{-1.2x/a} + \frac{0.35}{0.3} e^{-0.3x/a} \right], \quad (14)$$

式中 Z_1, Z_2 分别为沟道粒子和靶原子的原子序数; e 为电子电荷; N 为靶原子密度; a 为 Thomas-Fermi 屏蔽长度。

我们首先计算了 Al(111) 面的阻塞分布面积 S 与能量 E 的关系, 如图 3 所示。结果表明, 对任何 $v_D \tau$, S 与 E 很好地满足 $S \propto E^{-1/2}$ 关系。

图 4 给出了理论计算的 Al(111) 面的定标曲线, 在计算 $S(0)$ 和 $S(v_D \tau)$ 时, 用了相同的能量, 因而定标曲线与能量无关。

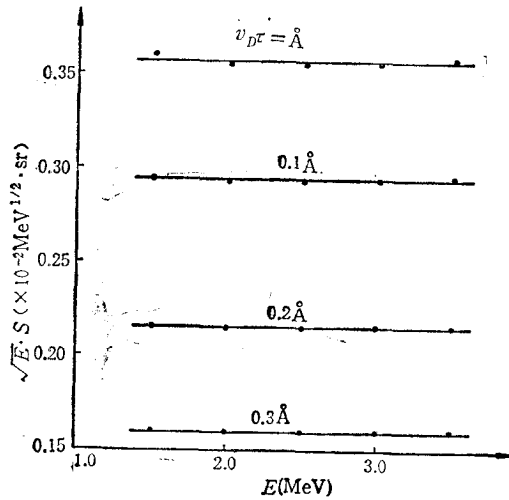


图 3 (111) 面的阻塞分布面积 S 与能量 E 的关系

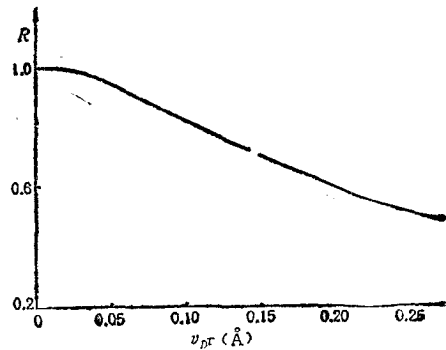


图 4 理论计算的 (111) 面的定标曲线

若考虑实验上 5° 和 95° 方向出射 α 粒子的能量差异, 则根据 $S \propto E^{-1/2}$ 关系, 实验上定义的阻塞分布面积之比 R 应该为

$$R = \frac{\sqrt{E_D} \cdot S_D}{\sqrt{E_p} \cdot S_p}, \quad (15)$$

式中 E_D, S_D 和 E_p, S_p 分别为 95° (“延迟”分布) 和 5° (“瞬发”分布) 方向出射的 α 粒子能量及阻塞分布面积。这样实验上得到的 R 与能量也无关。

四、实验结果

$1\text{MeV}^4\text{He}$ 离子在 Al<100> 轴向的归一化产额角分布极小值的实验结果为 4—4.5%, 这说明单晶样品具有很好的性能。图 5 给出的是在 5° 方向测到的 $E_p = 1183.4\text{keV}$ 共振时 Al(111) 面的 α 粒子阻塞分布, 此共振能级的寿命接近零。入射质子能量

$$E_{in} = 1192 \text{ keV},$$

共振深度 $z = 0.2 \mu\text{m}$, 入射质子总剂量 $Q = 1900 \mu\text{C}$. 归一化的阻塞分布极小值为 42% 左右, 图 5 中还给出了理论计算的结果.

$E_p = 1565 \text{ keV}$ 共振寿命测量的两轮实验结果见表 1, 质子总剂量 Q 分别为 $5300 \mu\text{C}$ 和 $3100 \mu\text{C}$, $E_{in} = 1572 \text{ keV}$, $z = 0.2 \mu\text{m}$. Al(111) 面的“瞬发”和“延迟”阻塞分布的典型实验结果见图 6 ($Q = 5300 \mu\text{C}$). 表 1 中的相对面积参数的平均值 $\bar{R}$ 与图 4 的定标曲线相比就得到核寿命 τ . 此结果与 Al<110> 轴阻塞效应测量结果和 Mass 等人^[12] 给出的共振产额法测量结果的比较列于表 2. 从表 2 中可见, 三种结果在误差范围内是一致的.

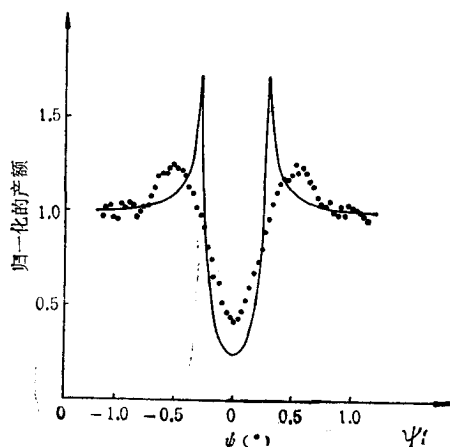


图 5

● 为实验结果; — 为理论计算

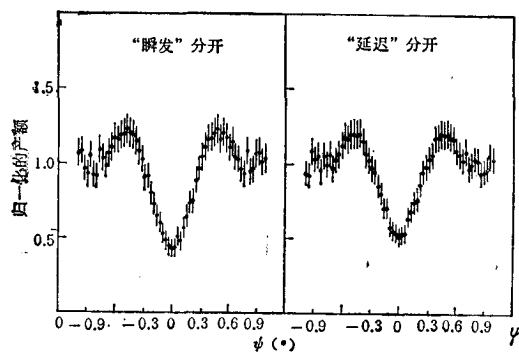


图 6 $E_p = 1565 \text{ keV}$ 共振时 α 粒子在 (111) 面的“瞬发”和“延迟”阻塞分布

表 1 $E_p = 1565 \text{ keV}$ 共振的实验结果

$Q(\mu\text{C})$	$S_p(\times 10^{-2} \text{ sr})$	$S_D(\times 10^{-2} \text{ sr})$	R	$\bar{R}$
5300	0.37 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.83 ± 0.05	0.84 ± 0.05
3100	0.35 ± 0.02	0.28 ± 0.01	0.85 ± 0.08	

表 2 结果的比较

	$\tau(\text{as})$	$\Gamma(\text{eV})$
(111) 面阻塞效应	$17.9^{+4.4}_{-4.0}$	$36.7^{+9.0}_{-8.2}$
<110> 轴阻塞效应 ^[63]	16.3 ± 2.4	40 ± 6
Mass 等人 ^[12]		46 ± 18

因忽略了电子和核的多次散射效应, 本文采用的解析方法是比较粗糙的. 目前, 对轴阻塞效应已成功地考虑了电子和核的多次散射效应^[13], 进行解析方法计算其结果与 Monte Carlo 模拟结果非常一致. 对面阻塞效应, 现在还没有处理电子和核的多次散射效应的完善理论.

本工作是在杨福家教授的指导下完成的。感谢承焕生同志给予的有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] W. M. Gibson, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **25**(1975), 465.
- [2] F. Malaguti *et al.*, *Phys. Rev.*, **C19**(1979), 1606.
- [3] R. B. Alexander *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A279**(1977), 278.
- [4] K. Komaki *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A208**(1973), 545.
- [5] 金卫国等, 原子核物理, **9**(1987), 120.
- [6] 金卫国等, 物理学报, **36**(1987), 819.
- [7] 金卫国等, 核技术, **5**(1986), 24.
- [8] 金卫国等, 原子核物理, 待发表.
- [9] 邵其翥等, 原子核物理, 待发表.
- [10] J. U. Andersen *et al.*, *K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd.*, **36**(7), (1967).
- [11] J. Lindhard, *K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd.*, **34**(14) (1965).
- [12] J. W. Mass *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A301**(1978), 213.
- [13] E. Fuschni *et al.*, *Rad. Eff.*, **53**(1980), 87.

THE LIFETIME MEASUREMENT OF THE $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$ RESONANT REACTION AT $E_p=1565\text{ keV}$ BY THE PLANAR BLOCKING EFFECT

JIN WEI-GUO ZHAO GUO-QING SHAO QI-YUN REN YUE-HUA WU XIANG-JIAN
ZHOU ZHU-YING

(Department of Nuclear Science, Fudan University, Shanghai)

ABSTRACT

The (111) planar blocking effect is used to measure the lifetime of the $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$ resonant reaction at $E_p=1565\text{ keV}$ and analytical methods is used to deduce the lifetime. The (111) planar blocking dip of the $E_p=1183.4\text{ keV}$ resonance in the $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$ reaction is also measured and compared with that calculated by theoretical calculations. The obtained lifetime $\tau=17.9 \pm 1.4$ as is in good agreement with that obtained by the $\langle 110 \rangle$ axial blocking effect and that reported in the literature within the range of errors.