

# $^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$ 和 $^{158}\text{Gd}(n, p)^{158}\text{Eu}$ 反应截面测量\*

蒲忠胜<sup>1)</sup> 李智 马军 李维学

(兰州理工大学理学院物理系 兰州 730050)

**摘要** 报道了在13.5—14.6MeV中子能区用活化法测得的 $^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$ 和 $^{158}\text{Gd}(n, p)^{158}\text{Eu}$ 的反应截面值. 中子注量用 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面得到. 由(13.5±0.2)MeV, (14.1±0.1)MeV和(14.6±0.2)MeV中子引起的 $^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$ 反应截面值分别为(1940±83)mb, (2324±92)mb和(1983±77)mb,  $^{158}\text{Gd}(n, p)^{158}\text{Eu}$ 反应截面值分别为(1.9±0.1)mb, (2.1±0.1)mb和(3.5±0.1)mb. 单能中子由T(d, n)<sup>4</sup>He反应获得. 文中还列举了已收集到的数据以作比较.

**关键词** 钷 反应截面 活化法

## 1 引言

核反应截面是核物理的重要研究课题之一, 它能揭示入射粒子和靶核相互作用机制, 加深对核力、核结构的认识, 也是核技术和核能利用的基础数据, 特别是在核反应理论模型的建立和完善, 聚变反应堆的设计、军用核测试数据库的建立以及天体物理方面有重要意义. 在14MeV能区, 对 $^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$ 的反应截面, 除了Kasugai<sup>[1]</sup>是在1997年测量的外, 其余都是在1980年之前完成的<sup>[2-9]</sup>, 各家数据之间有分歧. 对 $^{158}\text{Gd}(n, p)^{158}\text{Eu}$ 的反应截面, 只有Havlik<sup>[7]</sup>在1971年测量过一个能量点的截面, 所以进一步精确测量钷的同位素的反应截面是十分重要的.

## 2 实验过程

样品照射是在中国科学院近代物理研究所T-600型中子发生器上完成的. 以T(d, n)<sup>4</sup>He反应作中子源, 平均氘束能量 $\overline{E_d} = 150\text{keV}$ , 束流强度 $I_d \approx 1\text{mA}$ , 氘-钷靶厚为1.5mg/cm<sup>2</sup>. 中子产额的变化用 $\alpha$ 伴随粒子法监督, 以便对中子注量波动进行修正, 中子产额为(4×10<sup>10</sup>—8×10<sup>10</sup>)n/s. 3组样品分别放在与入射

氘束方向成45°, 90°和135°的角度上照射. 中子能量是用 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 和 $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89m+g}\text{Zr}$ 截面比法测定的<sup>[10]</sup>. 这三处的中子能量分别为13.5, 14.1和14.6MeV. 钷样品是直径为20mm的天然金属圆片, 纯度为99.99%, 而钷样品是纯度为99.9%的氧化物粉末, 首先将氧化物粉末倒入加热的聚乙烯醇中, 搅拌均匀, 放置几天后, 压制不同厚度而直径为20mm的圆片. 每组样品均由两片钷样品夹一片钷样品组成.

$^{159}\text{Gd}$ ,  $^{158}\text{Eu}$ 和 $^{92m}\text{Nb}$ 的 $\gamma$ 放射性活度是用国产CH8403同轴高纯锗 $\gamma$ 谱仪测量, 相对效率为20%, 对1.33keV $\gamma$ 射线的能量分辨率为3keV. 对探测器的 $\gamma$ 探测效率进行了精确刻度. 把美国国家标准局生产的SRM4275(Standard Reference Material 4275)型标准点源放在距高纯锗晶体20cm处进行该处的绝对效率刻度, 得出绝对刻度曲线. 标准源的误差小于1%. 剩余核的半衰期,  $\gamma$ 射线能量和强度以及靶核丰度列于表1中, 这些数据取自文献<sup>[11]</sup>. 很多剩余核的退激有级联辐射产生, 造成和峰效应, 当样品与探测器表面的距离约为2cm时, 对截面测量的影响有时可达10%—30%之多. 而本次测量样品和探测器之间的距离为2cm, 因此级联效应必须修正. 在计算 $\gamma$ 放射性活度时, 对中子注量的波动、 $\gamma$ 射线在样品中的自吸收、

2005-03-21 收稿

\* 甘肃省自然科学基金(ZS-011-A25-007)资助

1) E-mail: puzhongsheng@lut.cn

级联效应及测量几何进行了校正。

表 1 靶核丰度和产物核衰变数据

靶核丰度(%)	反应道	半衰期	$E_\gamma/\text{keV}$	$I_\gamma(\%)$
21.86	$^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$	18.479h	363.543	11.4
24.84	$^{158}\text{Gd}(n, p)^{158}\text{Eu}$	45.9m	944.15	25
100	$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$	10.15d	934.43	99.07

### 3 实验结果及讨论

反应截面的计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$\sigma_x = \frac{[\varepsilon \cdot I_\gamma \cdot \eta \cdot K \cdot S \cdot M \cdot D]_0 \cdot [\lambda \cdot A \cdot F \cdot C]_x}{[\varepsilon \cdot I_\gamma \cdot \eta \cdot K \cdot S \cdot M \cdot D]_x \cdot [\lambda \cdot A \cdot F \cdot C]_0} \cdot \sigma_0,$$

其中下标“X”和“0”分别表示钷样品和铌监督片的值,  $\varepsilon$  为所测的特征  $\gamma$  射线全能峰效率;  $I_\gamma$  为特征  $\gamma$  射线的强度;  $\eta$  为所测核素的同位素丰度;  $S = 1 - e^{-\lambda T}$  表示剩余核的生长因子;  $\lambda$  为衰变常量;  $T$  是总的中子照射时间;  $M$  为样品质量;  $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$  为测量收集因

子,  $t_1$  为从照射开始到测量开始的时间间隔,  $t_2$  为从照射结束到测量结束的时间间隔;  $A$  为样品元素的原子量;  $C$  为实测的全能峰面积;  $F$  为总的  $\gamma$  活度校正因子, 其中主要包括  $\gamma$  射线在样品中的自吸收校正和几何校正.  $K$  为中子注量波动校正因子, 其表达式为:

$$K = \left[ \sum_{i=1}^l \Phi_i \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) \cdot e^{-\lambda T_i} \right] / \Phi S,$$

其中  $l$  为将照射时间分成的段数;  $\Delta t_i$  为每段的时间间隔;  $\Phi_i$  为在  $\Delta t_i$  内入射到样品上的平均中子注量;  $\Phi$  为在  $T$  时间内入射到样品上的平均中子注量.

测量结果如表 2 所示,  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$  反应截面取自文献[13]. 截面测量的主要误差来源有  $\gamma$  探测效率 1.5%, 计数统计 0.2%—4.8%, 自吸收校正 1%, 测量几何校正 1%, 标准截面 1.5%, 样品称重 0.15%, 确定平均中子能量的误差 2.0%, 级联效应修正 1%—1.8%.

表 2 本工作的反应截面测量值

核反应	反应截面值/mb		
	$E_n = (13.5 \pm 0.2)\text{MeV}$	$E_n = (14.1 \pm 0.1)\text{MeV}$	$E_n = (14.6 \pm 0.2)\text{MeV}$
$^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$	$1940 \pm 83$	$2324 \pm 92$	$1983 \pm 77$
$^{158}\text{Gd}(n, p)^{158}\text{Eu}$	$1.9 \pm 0.1$	$2.1 \pm 0.1$	$3.5 \pm 0.1$
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ <sup>[13]</sup>	$452.4 \pm 5.7$	$459.1 \pm 5.6$	$459.9 \pm 5.6$

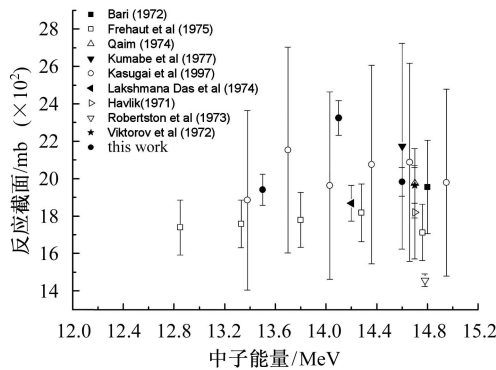


图 1  $^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$  的反应截面

$^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$  和  $^{158}\text{Gd}(n, p)^{158}\text{Eu}$  的反应截面值随能量的变化表示在图 1, 2 中, 图中还包括了已收集到的其他作者的反应截面数据. 从图 1 可以看出, 在 13.5—14.6 MeV 中子能区  $^{160}\text{Gd}(n, 2n)^{159}\text{Gd}$  反应截面随中子能量增加先增大后减小, 在误差范围内

本工作与 Kasugai 的数据符合得很好. 从图 2 可以看出, 本工作测得的  $^{158}\text{Gd}(n, p)^{158}\text{Eu}$  的反应截面随中子能量增加而增大.

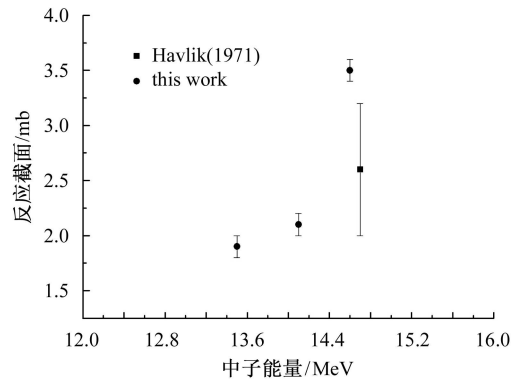


图 2  $^{158}\text{Gd}(n, p)^{158}\text{Eu}$  的反应截面

感谢兰州大学现代物理系孔祥忠教授提供的实验条件和有关资料, 以及对本工作给予的重要帮助.

## 参考文献(References)

- 1 Kasugai Y, Ikeda Y, Uno Y. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Techn. Trieste, 1997. 635
- 2 Bari A. Dissertation Abstracts B (Sciences), 1972, **B32**: 509
- 3 Frehaut J et al. 5th Sem. on Interact. of Fast Neutrons. Gaussig, 1975. 858
- 4 Qaim S M. Nuclear Physics, 1974, **A224**: 319
- 5 Kumabe I, Kotake E, Nagahama F J. of Nuclear Science and Technology, 1977, **14**: 319
- 6 Lakshmana Das N, Srinivase Rao C V, Thirumala Rao B V et al. 17th Nucl. and Solid State Physics Symp. Bombay, 1974. 105
- 7 Havlik E. Acta Physica Austriaca, 1971, **34**: 209
- 8 Robertston J C, Audric B, Kolkowski P. Journal of Nuclear Energy, 1973, **27**:531
- 9 Viktorov D V, Sjablin V L. Yadernaya Fizika, 1972, **15**(6): 1099
- 10 Levis V E, Zieba K J. Nucl. Instrum. Methods, 1980, **174**: 141
- 11 Brone E, Firestone R B. Table of Radioactive Isotopes (Eighth Edition). New York: John Wiley and Sons, 1996
- 12 WANG Yong-Chang, YUAN Jun-Qian, REN Zhong-Liang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1991, **15**: 73(in Chinese)  
(王永昌, 袁俊谦, 任忠良等. 高能物理与核物理, 1991, **15**: 73)
- 13 Filatenkov A A, Chuvaev A V, Aksenov V N et al. RI-252, 1999

## Measurements of Cross Sections for $^{160}\text{Gd}(n, 2n)$ $^{159}\text{Gd}$ and $^{158}\text{Gd}(n, p)$ $^{158}\text{Eu}$ Reactions at the Neutron Energies of 13.5, 14.1 and 14.6MeV\*

PU Zhong-Sheng<sup>1)</sup> LI Zhi MA Jun LI Wei-Xue

(Department of Physics, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract** The cross sections for (n, 2n) and (n, p) reactions were measured on Gadolinium isotopes at the neutron energies of 13.5—14.6MeV using activation technique. The cross section data for the reactions of  $^{160}\text{Gd}(n, 2n)$   $^{159}\text{Gd}$  and  $^{158}\text{Gd}(n, p)$   $^{158}\text{Eu}$  were reported. The cross sections of  $^{160}\text{Gd}(n, 2n)$   $^{159}\text{Gd}$  reaction are (1940±83)mb, (2324±92)mb and (1983±77)mb at (13.5±0.2)MeV, (14.1±0.1)MeV and (14.6±0.2)MeV, respectively. The cross sections of  $^{158}\text{Gd}(n, p)$   $^{158}\text{Eu}$  reaction are (1.9±0.1)mb, (2.1±0.1)mb and (3.5±0.1)mb at (13.5±0.2)MeV, (14.1±0.1)MeV and (14.6±0.2)MeV, respectively. The neutron fluences were determined by the cross sections of  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)$   $^{92m}\text{Nb}$  reaction. The comparison was made between the present results and the previously published data.

**Key words** gadolinium, cross section, activation technique

Received 21 March 2005

\*Supported by Natural Science Foundation of Gansu Province (ZS-011-A25-007)

1) E-mail: puzhongsheng@lut.cn