

# 13.5—14.6MeV中子能区锗的同位素 反应截面的测量\*

蒲忠胜<sup>1)</sup> 关秋云 马军 严冬

(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 $^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75}\text{Ge}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$ ,  $^{72}\text{Ge}(n, p)^{72}\text{Ga}$ ,  $^{73}\text{Ge}(n, p)^{73}\text{Ga}$ ,  $^{72}\text{Ge}(n, \alpha)^{69\text{m}}\text{Zn}$ 和 $^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$ 的反应截面值. 中子注量用 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 反应截面得到. 单能中子由 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应获得. 同时还列举了已收集到的文献值以作比较.

**关键词** 锗 中子反应 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、核数据库的建立与完善以及天体物理方面有重要意义. 14MeV能区锗的中子反应截面已经有一些人进行过测量和评价, 但数据之间存在较大分歧, 因而我们对锗的中子活化反应截面进行了测量.

## 2 实验过程

样品照射是在兰州大学ZF-300-II强流中子发生器上进行的. 以 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应作中子源, 平均氘束能量 $E_d=135\text{keV}$ , 束流强度 $I_d \approx 400\mu\text{A}$ , 氘-钛靶厚为 $1.35\text{mg}/\text{cm}^2$ . 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 $(3-4) \times 10^{10}\text{s}^{-1}$ . 3组样品分别放在与入射氘束方向成 $0^\circ, 90^\circ$ 和 $135^\circ$ 的角度上照射. 中子能量是用 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 和 $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89\text{m}+\text{g}}\text{Zr}$ 截面比法测定的<sup>[1]</sup>. 这3处的中子能量分别为14.6, 14.1和13.5MeV. 靶样品是直径为20mm的天然金属圆片, 纯度为99.99%, 而

锗样品是纯度为99.999%的金属粉末, 压制不同厚度而直径为20mm的圆片. 每组样品均由两片靶样品夹一片锗样品组成.

$^{69}\text{Ge}$ ,  $^{75}\text{Ge}$ ,  $^{70}\text{Ga}$ ,  $^{72}\text{Ga}$ ,  $^{73}\text{Ga}$ ,  $^{69\text{m}}\text{Zn}$ ,  $^{71\text{m}}\text{Zn}$ 和 $^{92\text{m}}\text{Nb}$ 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%, 1.33MeV  $\gamma$ 射线的能量分辨为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[2]. 很多剩余核的退激有级联辐射产生, 会造成和峰. 当样品与探测器表面的距离约为2cm时, 这

表1 靶核丰度和产物核衰变数据

核反应	靶核丰度(%)	生成核半衰期	$\gamma$ 射线能量/keV	$\gamma$ 射线强度(%)
$^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$	21.23	39.05h	574.11	13.32
$^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75}\text{Ge}$	7.44	82.78min	264.6	11.40
$^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$	20.70	21.14min	1039.2	0.65
$^{72}\text{Ge}(n, p)^{72}\text{Ga}$	27.66	14.10h	834.03	95.63
$^{73}\text{Ge}(n, p)^{73}\text{Ga}$	7.73	4.86h	325.70	11.2
$^{72}\text{Ge}(n, \alpha)^{69\text{m}}\text{Zn}$	27.66	13.76h	438.63	94.77
$^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$	35.94	3.96h	386.28	93

2006-03-07 收稿

\* 甘肃省自然科学基金(3ZS042-B25-026)资助

1) E-mail: puzhongsheng@lut.cn

一效应对快中子反应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,因此必须对级联效应加以修正。在计算 $\gamma$ 放射性活度时,对 neutron 注量的波动、 $\gamma$ 射线在样品中的自吸收、级联效应及测量几何进行了校正。

### 3 实验结果及讨论

反应截面的计算公式如下<sup>[3]</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”分别表示锆样品和铌监督片的值, $\varepsilon$ 为相关的特征 $\gamma$ 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; $\lambda$ 为衰变常数; $T$ 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通量; $\Phi$ 为在 $T$ 时间内入射到样品上的平均中子通量。

测量结果如表2所示, $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 反应截面值取自文献[4]。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%—3.5%,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%—1.6%,靶核丰度0.1%, $\gamma$ 射线强度1.0%。

表2 本工作的反应截面测量值

核反应	各中子能量处(MeV)的核反应截面值(mb)		
	$E_n = 13.5 \pm 0.3$	$E_n = 14.1 \pm 0.2$	$E_n = 14.6 \pm 0.3$
$^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$	$273 \pm 47$	$340 \pm 52$	$401 \pm 60$
$^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75}\text{Ge}$	$1079 \pm 88$	$1217 \pm 102$	$1139 \pm 92$
$^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$		$126 \pm 16$	
$^{72}\text{Ge}(n, p)^{72}\text{Ga}$	$26 \pm 3$	$29 \pm 3$	$28 \pm 3$
$^{73}\text{Ge}(n, p)^{73}\text{Ga}$		$21 \pm 3$	$27 \pm 3$
$^{72}\text{Ge}(n, \alpha)^{69\text{m}}\text{Zn}$	$5.7 \pm 0.5$	$6.2 \pm 0.5$	$6.5 \pm 0.5$
$^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$	$2.2 \pm 0.2$	$2.4 \pm 0.3$	$2.8 \pm 0.3$

本实验测量结果与文献[5—20]比较如图1—图7所示。图1中,我们的数据在误差范围内和Okumur<sup>[7]</sup>, Birn<sup>[9]</sup>, Molla<sup>[12]</sup>的数据符合得很好,但Paul<sup>[5]</sup>的数

据明显比各家数据偏高,13.5—14.6MeV中子能区 $^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75}\text{Ge}$ 反应截面随中子能量增加先增大后减小。图2中,本工作测得的 $^{170}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$ 反应截面随中子能量增加而增大,在误差范围内本工作与Hoang<sup>[16]</sup>的数据一致。图3中,我们的数据(在 $E_n = 14.1 \pm 0.2\text{MeV}$ 处)在误差范围内和Hoang<sup>[16]</sup>的一致。图4中,我们的数据在误差范围内和Qaim<sup>[19]</sup>的一致,但比其他几家数据低一些。图5中,我们的数据在误差范围内和Qaim<sup>[19]</sup>, Molla<sup>[12]</sup>, Hoang<sup>[16]</sup>的一致,而Rieppo<sup>[20]</sup>, Birn<sup>[9]</sup>的数据比我们的和其他几家的数据偏低一些。图6中,我们的数据在误差范围内和Hoang<sup>[16]</sup>的一致,13.5—14.6MeV中子能区 $^{72}\text{Ge}(n, \alpha)^{69\text{m}}\text{Zn}$ 的反应截面随中子能量增加而增大, Rippo<sup>[20]</sup>的数据比我们的和其他几家的数据偏高。图7中,13.5—14.6MeV中子能区 $^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$ 的反应截面随中子能量增加而增大,我们的数据比其他几家的数据偏低一些。

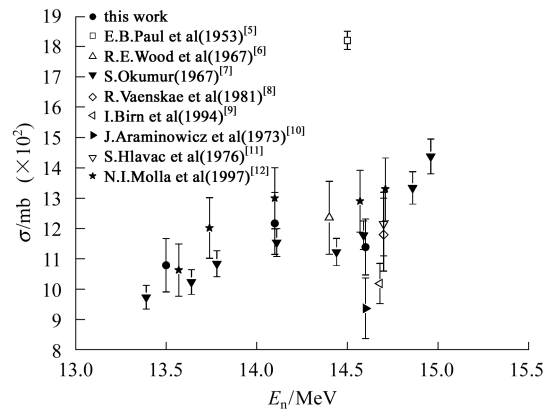


图1  $^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75}\text{Ge}$ 核反应截面值

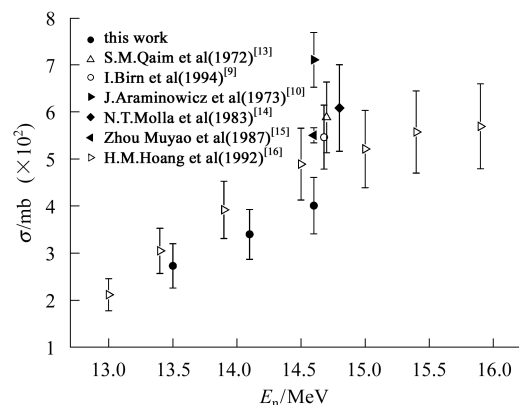


图2  $^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$ 核反应截面值

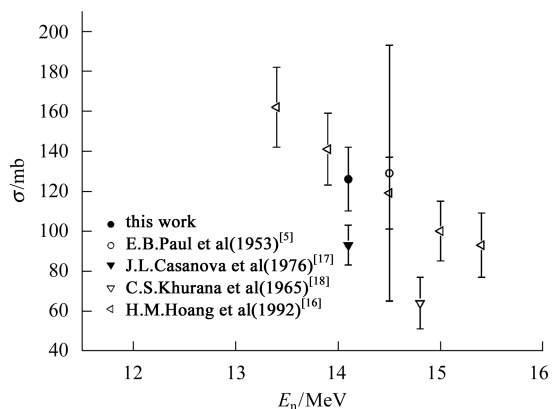


图 3  $^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$  核反应截面值

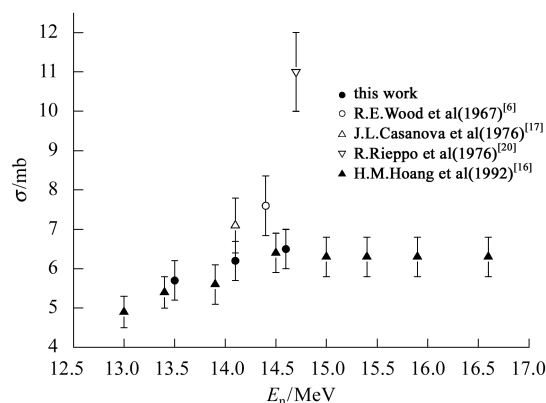


图 6  $^{72}\text{Ge}(n, a)^{69m}\text{Zn}$  核反应截面值

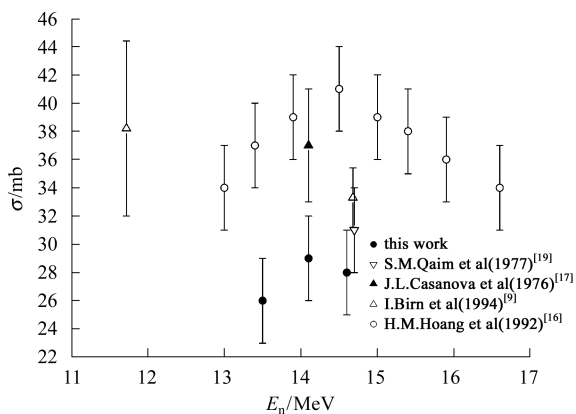


图 4  $^{72}\text{Ge}(n, p)^{72}\text{Ga}$  核反应截面值

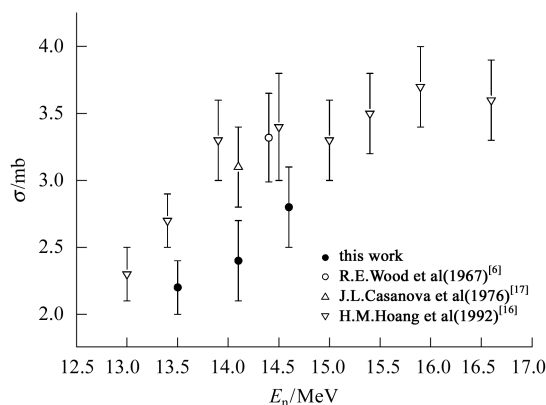


图 7  $^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71m}\text{Zn}$  核反应截面值

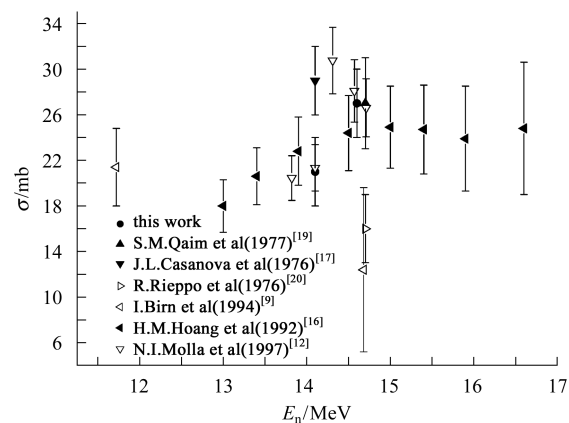


图 5  $^{73}\text{Ge}(n, p)^{73}\text{Ga}$  核反应截面值

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 Levis V E, Zieba K J. Nucl. Instrum. Methods, 1980, **174**: 141
- 2 Firestone R B, Shirley V S. Table of Isotopes (Eighth Edition). New York: John Wiley and Sons, 1996, 1627
- 3 PU Zhong-Sheng, YANG Jing-Kang, Kong Xiang-Zhong et al. HEP & NP, 2003, **27**: 581(in Chinese)  
(蒲忠胜, 杨景康, 孔祥忠等. 高能物理与核物理, 2003, **27**: 581)
- 4 Filatenkov A A, Chuvaev A V, Aksenov V N et al. INDC(CCP)-252. Vienna:IAEA, 1999
- 5 Paul E B, Clarke R L. Canadian Journal of Physics, 1953, **31**: 267
- 6 Wood R E, Cook W S, Goodgame J R et al. Physical Review, 1967, **154**: 1108
- 7 Okumur S. Nuclear Physics, (Section A.) 1967, **A93**: 74
- 8 Vaenskae R, Rieppo R. Nuclear Instrum. and Methods in Physics Res., 1981, **179**: 525
- 9 Birn I, Qaim S M. Nuclear Science and Engineering, 1994, **116**: 125
- 10 Araminowicz J, Dresler J. INR-1464. 1973, 14

- 11 Hlavac S, Kristiak J, Oblozinsky P. *Acta Physica Slovaca*, 1976, **26**: 64
- 12 Molla N I, Miah R U, Basunia S et al. *Conf. on Nucl. Data for Sci. and Techn*, Trieste, 1997, 517
- 13 Qaim S M. *Nuclear Physics, (Section A.)* 1974, **185**: 614
- 14 Molla N T, Mizanul Islam M, Mizanur Rahman M et al. *INDC(BAN)-002*. 1983, 1
- 15 ZHOU Mu-Yao, ZHANG Yong-Fa, WANG Chuan-Shan et al. *Chinese J. of Nuclear Physics*, 1987, **9**: 34
- 16 Hoang H M, Garuska U, Kielan D et al. *Zeitschrift fuer Physik, (Section A.)* 1992, **3**: 283
- 17 Casanova J L, Sanchez M L. *Anales de Fisica y Quimica*, 1976, **3**: 186
- 18 Khurana C S, Govil I M. *Nucl. Phys.*, 1965, **69**: 153
- 19 Qaim S M, Molla N I. *Nucl. Phys.*, 1977, **A283**: 269
- 20 Rieppo R, Keinaenen J K, Valkonen M. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 1976, **38**: 1927

## Cross Section Measurements for (n, 2n), (n, p) and (n, $\alpha$ ) Reactions on Germanium Isotopes at the Neutron Energy around 14MeV\*

PU Zhong-Sheng<sup>1)</sup> GUAN Qiu-Yun MA Jun YAN Dong

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

**Abstract** Cross sections for  $^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$ ,  $^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75}\text{Ge}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$ ,  $^{72}\text{Ge}(n, p)^{72}\text{Ga}$ ,  $^{73}\text{Ge}(n, p)^{73}\text{Ga}$ ,  $^{72}\text{Ge}(n, \alpha)^{69\text{m}}\text{Zn}$  and  $^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$  reactions were measured at the neutron energies from 13.5 to 14.6MeV using activation technique and  $\gamma$ -ray spectrometry. The neutron fluences was determined using the monitor reaction  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$  and the neutron energies were measured by the method of cross section ratios for  $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89\text{m}+\text{g}}\text{Zr}$  to  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$  reaction. The results of present work were compared with data published previously.

**Key words** germanium, neutron nuclear reaction, cross-section, activation technique

---

Received 7 March 2006

\* Supported by Natural Science Foundation of Gansu Province of China (3ZS042-B25-026)

1) E-mail: puzhongsheng@lut.cn