

14MeV中子硒同位素反应截面的测量

贺国珠^{1,2} 拓飞¹ 孔祥忠^{1;1)}

1 (兰州大学现代物理系 兰州 730000)

2 (新乡医学院 新乡 453000)

摘要 在14MeV中子能区用活化法测得了 $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81m,g}\text{Se}$, $^{76}\text{Se}(n, 2n)^{75}\text{Se}$, $^{78}\text{Se}(n, p)^{78}\text{As}$, $^{76}\text{Se}(n,p)^{76}\text{As}$, $^{74}\text{Se}(n, p)^{74}\text{As}$ 和 $^{80}\text{Se}(n, \alpha)^{77}\text{Ge}$ 反应截面值, 以 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面为中子注量标准, 并且将测量值和收集到的文献值进行了比较.

关键词 中子反应截面 硒 活化法

1 引言

硒在自然界中有 ^{82}Se , ^{80}Se , ^{78}Se , ^{77}Se , ^{76}Se , ^{74}Se 6个同位素, 其截面的测量对于理解核结构理论有意义, 同时在环境评价中也有要求. 另外, 硒是人体必须的微量元素, 主要分布在蛋白质组织中, 集聚在肝、肾等器官. ^{81m}Se , ^{81g}Se 等一些硒的中子核反应产物的半衰期和主要特征 γ 射线的波长特别适宜于疾病的诊断, 硒也是重要的蛋白标记核素和肝、肾器官的同位素成像核素. 14MeV能区硒的中子核反应截面已经有人进行过测量和推荐, 但是各家数据之间存有明显分歧. 例如, $^{76}\text{Se}(n, p)^{76}\text{As}$ 反应截面的评价数据和实验数据相差有60%, 而 $^{80}\text{Se}(n, \alpha)^{77}\text{Ge}$ 反应截面的评价数据和实验数据相差高达120%. 对于 $^{74}\text{Se}(n, p)^{74}\text{As}$ 反应而言, 不但截面的实验数据和评价数据有差别, 而且两家评价数据之间的差异也很大. 因而我们对硒的中子活化反应截面进行了测量.

2 实验

样品辐照是在兰州大学ZF-300-II强流中子发生器上进行的, 束流参数同文献[1]. 以 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应作中子源, 中子产额为 $3 \times 10^{10} - 4 \times 10^{10}\text{n/s}$, 中子能量分别为13.5, 14.1和14.6MeV, 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^[2]. 硒样品由纯度为99.9%的单质硒粉末压制而

成, 直径20mm, 样品采用三明治包裹法, 每组样品由两片镊夹一片硒组成, 分别放在相对于入射氩离子束不同的角度上. ^{92m}Nb , ^{89}Zr , ^{81m}Se , ^{81}Se , ^{75}Se , ^{78}As , ^{76}As , ^{74}As 和 ^{77}Ge 的 γ 放射性活度是用国产CH8403高纯锗 γ 谱仪测量, 其相对效率为20%, 能量分辨率为3keV(1.33MeV). 为达计数率的要求, 样片放在距离高纯锗探测器表面2cm处测量, 该处探测器效率刻度的误差小于1.5%.

本工作中靶核的丰度、核反应剩余核的半衰期, γ 射线能量和强度等取自同位素表第8版^[3], 且列于表1中.

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	γ 射线能量/keV	γ 射线强度
$^{82}\text{Se}(n,2n)^{81m}\text{Se}$	0.0873	57.28min	103	0.127
$^{82}\text{Se}(n,2n)^{81g}\text{Se}$	0.0873	18.45min	290	0.00565
$^{76}\text{Se}(n,2n)^{75}\text{Se}$	0.0936	119.78d	264	0.585
$^{78}\text{Se}(n,p)^{78}\text{As}$	0.2378	90.7min	614	0.54
$^{76}\text{Se}(n,p)^{76}\text{As}$	0.0936	26.32h	559	0.45
$^{74}\text{Se}(n,p)^{74}\text{As}$	0.0089	17.77d	595	0.594
$^{80}\text{Se}(n,\alpha)^{77}\text{Ge}$	0.4961	11.3h	211	0.308

3 实验结果及讨论

3.1 实验结果

反应截面的计算公式如下:

2006 - 02 - 17 收稿

1) E-mail: kongxz@lzu.edu.cn

$$\sigma_x = \frac{[\varepsilon I_\gamma NKMD]_m [\lambda AFC]_x}{[\varepsilon I_\gamma NKMD]_x [\lambda AFC]_m} \sigma_m,$$

各物理量的含义同文献[1], 其中 K 为中子注量波动校正因子. $F = f_s \times f_o \times f_g$, 为总的 γ 活度校正因子, 其中 f_s , f_o 和 f_g 分别是样品自吸收校正因子, γ 射线级联加合效应校正因子和几何校正因子. D 为测量收集因子,

$$D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}.$$

测量过程中的主要误差有统计误差, 探测器效率误差, 标准截面误差, 样品质量误差, 自吸收, 级联效应, 时间测量误差等, 结果中的总误差是根据误差传递公式计算得到的.

反应截面测量结果如表 2 所示, 本实验测量结果与文献比较如图 1—7 所示.

表 2 本实验反应截面测量值

核反应	各中子能量(MeV)处的核反应截面(mb)		
	$E_n=13.5\pm 0.3$	$E_n=14.1\pm 0.2$	$E_n=14.6\pm 0.3$
$^{82}\text{Se}(n,2n)^{81m}\text{Se}$	805 ± 48	896 ± 49	1002 ± 50
$^{82}\text{Se}(n,2n)^{81g}\text{Se}$			39 ± 20
$^{76}\text{Se}(n,2n)^{75}\text{Se}$	519 ± 31	610 ± 37	
$^{78}\text{Se}(n,p)^{78}\text{As}$	16.1 ± 1.0		18.3 ± 1.1
$^{76}\text{Se}(n,p)^{76}\text{As}$			58 ± 4.6
$^{74}\text{Se}(n,p)^{74}\text{As}$			96.3 ± 6.0
$^{80}\text{Se}(n,\alpha)^{77}\text{Ge}$	2.9 ± 0.3	3.5 ± 0.3	

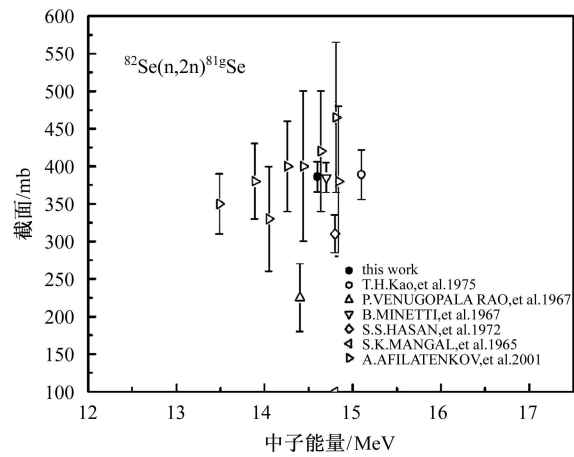


图 2 $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81g}\text{Se}$ 核反应截面

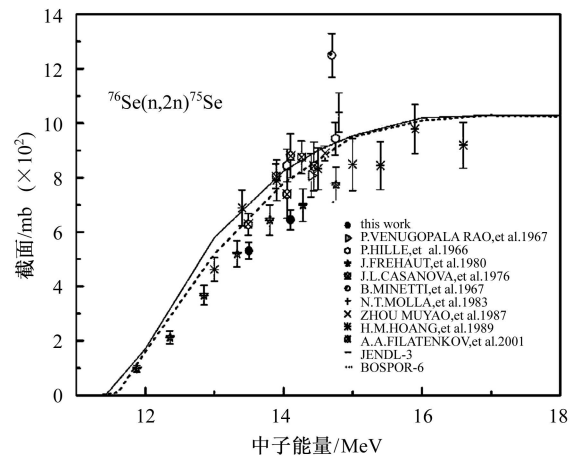


图 3 $^{76}\text{Se}(n, 2n)^{75}\text{Se}$ 核反应截面

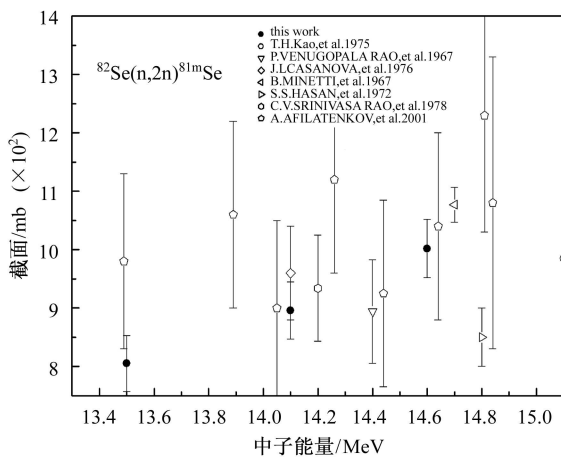


图 1 $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81m}\text{Se}$ 核反应截面

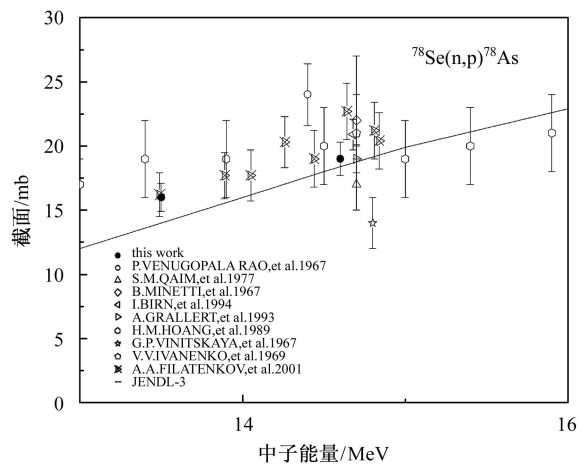
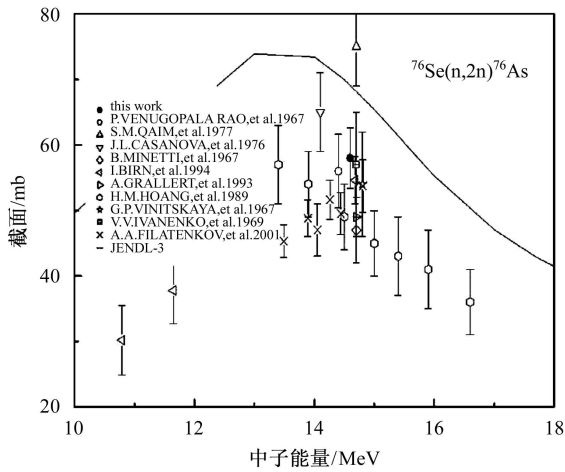
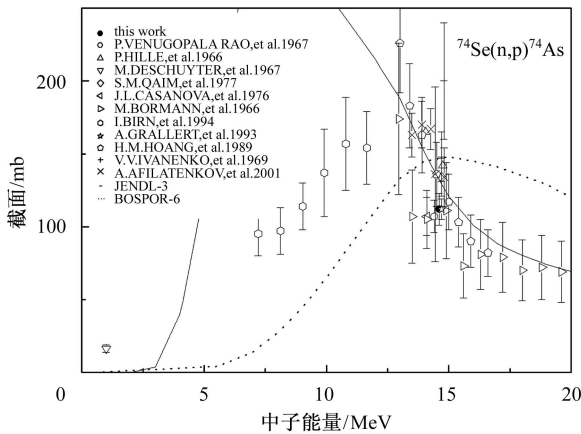
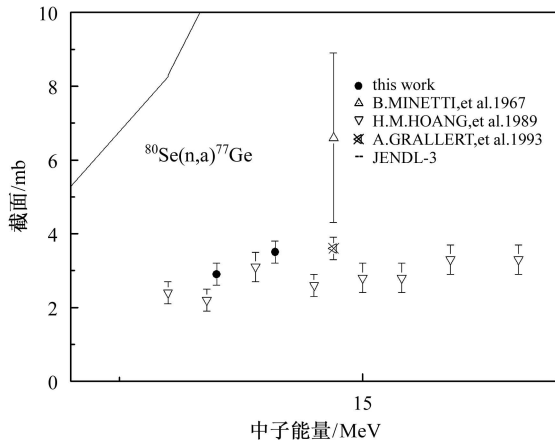


图 4 $^{78}\text{Se}(n, p)^{78}\text{As}$ 核反应截面

图5 $^{76}\text{Se}(n, p)^{76}\text{As}$ 核反应截面图6 $^{74}\text{Se}(n, p)^{74}\text{As}$ 核反应截面图7 $^{80}\text{Se}(n, \alpha)^{77}\text{Ge}$ 核反应截面

3.2 讨论

(1) 从图1可以看出, 在中子能量为14MeV附近, $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81\text{m}}\text{Se}$ 反应的截面随着中子能量增加而增

加. 本测量值和Fitalenkov^[4]及Casanova^[5]的结果在误差范围内一致. 对于能量为103keV的那条特征 γ 射线, Kao^[6]和Venugopala Rao^[7]分别使用了0.101和0.119作为它的强度, 比第8版分别小了20%和6%, 对他们的结果按8版进行调整, 结果趋于一致. Hasan^[8]用的是NaI(Tl)探测器; Mangal^[9]使用了液闪探测器; Paul通过测量 β^- 射线得到的结果, 这些早期截面测量中使用的探测器的分辨能力受到限制, 在多同位素同时存在、多反应道同时开放的情况下, 能谱的交迭干扰在所难免, 他们结果的准确度受到限制.

(2) 对于 $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81\text{g}}\text{Se}$ 反应, 我们可以发现, $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81\text{m}}\text{Se}$ 反应截面是 $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81\text{g}}\text{Se}$ 反应截面的数倍, $^{81\text{m}}\text{Se}$ 和 $^{81\text{g}}\text{Se}$ 这两个生成核的半衰期都在分钟数量级, 且前者比后者长, 因此, 怎样合理安排辐照和测量时间, 最大限度的减小 $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81\text{m}}\text{Se}$ 反应对 $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81\text{g}}\text{Se}$ 反应的影响, 是准确获得 $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81\text{g}}\text{Se}$ 反应截面的关键, 而不能把希望过于寄托在后期的数据处理上. 我们选择的辐照时间是20min, 并且停机后马上进行测量, 在数据处理中也考虑和去除了来自 $^{81\text{m}}\text{Se}$ 的影响. 我们测量结果的准确度明显提高.

(3) 对于 $^{76}\text{Se}(n, 2n)^{75}\text{Se}$ 反应, 我们的结果和Frehaut^[10]在误差范围内一致, 比文献[4]的测量值、JENDL-3^[11]和BOSPOR-6^[12]两家的评价价值明显偏低.

(4) 对于 $^{78}\text{Se}(n, p)^{78}\text{As}$, 我们的测量结果和Filatenkov, Hoang^[13]及Grallert^[14]以及评价价值JENDL-3符合较好.

(5) 图5、图6和图7中3个反应道的截面数据, 评价价值和测量值都相差很大. 对于 $^{76}\text{Se}(n, p)^{76}\text{As}$ 反应, 我们的测量值在误差范围内和BIRN^[15]和Ivanenko^[16]的一致, 而比JENDL-3评价价值低30%. 对于 $^{74}\text{Se}(n, p)^{74}\text{As}$, JENDL-3和BOSPOR-6两家评价价值分歧明显, 我们的结果和Venugopala Rao, Casanova, Bormann^[17], Birn, Grallert几家测量值在误差范围内一致. 对于 $^{80}\text{Se}(n, \alpha)^{77}\text{Ge}$, 实验测量数据只有6家, 之间分歧明显.

作者非常感谢兰州大学强流中子发生器组同志出色的工作, 感谢卢涵林先生有益的指导.

参考文献(References)

- 1 HE Guo-Zhu, LUO Jun-Hua, LIU Zhong-Jie, KONG Xiang-Zhong. HEP & NP, 2005, **29**: 1057—1060 (in Chinese)
(贺国珠, 罗均华, 刘中杰, 孔祥忠. 高能物理与核物理, 2005, **29**: 1057—1060)
- 2 Levis V E, Zieba K J. Nucl. Instrum. Methods, 1980, **174**: 141—144
- 3 Firestone R B, Shirley V S. Table of Isotopes(8th edition). New York: John Wiley, Sons, 1996
- 4 Filatenkov A A, Chuvaev S V. Leningrad Reports 258, RI, 2001
- 5 Casanova J L, Sanchez M L. Anales de Fisica y Quimica, 1976, **72**: 186
- 6 KAO T H, Alford W L. Nuclear Physics, 1975, **A237**: 11—17
- 7 Rao Venugopala P, Fink R W. Physical Review, 1967, **154**: 1023
- 8 Hasan S S, Prasad R, Seghal M L. Nucl. Phys., 1972, **A181**: 101—105
- 9 Mangal S K, Khurana C S. Nucl. Phys., 1965, **69**: 158—160
- 10 Frehaut J, Bertin A, Bois R, Jary J. PRIV, Frehaut W, 1980
- 11 Shibata et al. Japanese Evaluated Nuclear Data Library (Version-3): JAERI-1319. Janpan, 1990
- 12 Manokhin V N, Pashchenko A B, Plyaskin V I. Technical Reports Series-273. Vienna: IAEA, 1987. 371—372
- 13 Hoang H M, Garuska U, Marcinkowski A et al. Z. Phys., 1989, **A334**: 285
- 14 Grallert A, Csikai J, Buczko Cs M et al. Report INDC(NDS), 1993, **286**: 131
- 15 Birn I, Qaim S M, Strohmaier B et al. Nucl. Sci. Eng., 1994, **116**: 125
- 16 Ivanenko V V, Petrzhak K A. Yadernaya Fizika, 1969, **9**: 258
- 17 Bormann M, Dreyer F, Neuert H et al. Nuclear Data For Reactors Conf., Paris, 1966

(n, 2n), (n, p) and (n, α) Reactions Cross-Sections Measurement on Selenium Isotopes at Neutron Energy of 14MeV

HE Guo-Zhu^{1,2} TUO Fei¹ KONG Xiang-Zhong^{1,1)}

¹ (Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

² (Xinxiang Medical College, Xinxiang 453000, China)

Abstract Cross sections for $^{82}\text{Se}(n, 2n)^{81\text{m,g}}\text{Se}$, $^{76}\text{Se}(n, 2n)^{75}\text{Se}$, $^{78}\text{Se}(n, p)^{78}\text{As}$, $^{76}\text{Se}(n, p)^{76}\text{As}$, $^{74}\text{Se}(n, p)^{74}\text{As}$ and $^{80}\text{Se}(n, \alpha)^{77}\text{Ge}$ reactions have been measured at neutron energy of 14MeV using activation technique. Neutrons were produced by reaction $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ and neutron flux were monitored by reaction $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$. The results of the present work are compared with the previous reported data.

Key words cross-section, selenium, neutron activation technique