

硅单晶辐照中子注量测量的反应截面 影响研究

王云波 操节宝 吴清丽 陈浩 李延鹏 邹鹏 刘荣
唐锡定 邓才玉 王万金
(中国核动力研究设计院 成都 610005)

摘要 活化法测量硅单晶中子嬗变掺杂的辐照热中子注量时,由于活化探测器与硅的目标反应截面随中子能量的变化曲线存在一定差异,导致测量值可能存在较大偏差。为了抑制反应截面差异引入的测量影响,基于Stoughton-Halperin约定关系,确立了二元一次方程组求解法和线性最小二乘拟合法,并使用多种活化探测器进行了实验。结果表明:同一位置的不同探测器测量值存在显著差异,基于合理的探测器组合,采用上述方法能够显著减小测量值偏差,偏差可达3%以内。因此,两种方法均能有效抑制截面差异引入的测量影响,并且方程组法仅需要两种探测器,相比最小二乘法更有一定的优势。此外,该方法还适用于其他热中子辐照样品。

关键词 硅单晶, 中子嬗变掺杂, 热中子注量, 活化法, 反应截面

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110502

Study on measurement influence of reaction cross-section for irradiated neutron fluence in single-crystal silicon

WANG Yunbo CAO Jiebao WU Qingli CHEN Hao LI Yanpeng ZOU Peng LIU Rong
TANG Xiding DENG Caiyu WANG Wanjin
(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610005, China)

Abstract [Background] When the activation method is used to measure the irradiated thermal neutron fluence of single-crystal silicon neutron transmutation doping, the measured value may have a certain deviation due to the difference in the curve shapes of the target reaction cross-section as a function of neutron energy between activated detector and silicon. [Purpose] This study aims to suppress the measurement influence caused by reaction cross-section difference between activation detector and silicon, and to reduce the measurement deviation. [Methods] Based on the Stoughton-Halperin convention relation, the binary first-order equations solution method and a linear least-squares fitting method were established. A variety of activation detectors and their combinations were applied to experimental measurement to verify their feasibility. These activation detectors were placed in the irradiation facility and irradiated in the Minjiang test reactor at Sichuan province. Finally, all of detectors were taken out from the reactor, and the radioactive activity was measured by high purity germanium γ spectrometer. [Results] The results show that obvious differences exist in the measurement values of different activated detectors at the same position, and the measurement deviation based on suitable detector combination is greatly reduced to be less than 3% by using

中国核动力研究设计院核技术应用基金(No.JJXM-HJSY-2004)资助

第一作者: 王云波, 男, 1984年出生, 2015年于兰州大学获博士学位, 研究领域为反应堆物理实验

收稿日期: 2021-06-15, 修回日期: 2021-10-25

Supported by Nuclear Technology Application Foundation of Nuclear Power Institute of China (No.JJXM-HJSY-2004)

First author: WANG Yunbo, male, born in 1984, graduated from Lanzhou University with a doctoral degree in 2015, focusing on reactor physics experiment

Received date: 2021-06-15, revised date: 2021-10-25

above two methods. [Conclusions] The two methods proposed in this study can effectively suppress the influence of the reaction cross-section difference on measurement. The equation method has certain advantages over the least-square method with only two kinds of compulsory detectors, it can also be applied to other thermal neutron irradiation samples.

Key words Single-crystal silicon, Neutron transmutation doping, Thermal neutron fluence, Activation method, Reaction cross-section

反应堆进行硅单晶中子嬗变掺杂时,为了精确控制产生杂质 ^{31}P 的浓度,通常会采用活化法或自给能中子探测器对中子注量进行测量或监测^[1-9],以确保硅体辐照热中子注量准确达到目标值。其中,活化法具有探测器体积小、灵活性高、对中子场干扰小、抗 γ 射线干扰等优点,是一种普遍使用的测量方法,并且通常会采用一种活化探测器(如Au、Co和Zr等)进行测量^[1-8]。但探测器目标核素与硅靶核 ^{30}Si 的俘获反应截面曲线形状存在或大或小的差异,导致活化法测量值与实际值会存在一定偏差,尤其当超热中子对 ^{30}Si 反应率贡献越大时。其中,Zr目标核素 ^{24}Zr 与 ^{30}Si 的截面形状最为近似,但该探测器热中子反应截面很小,远远小于其他探测器,甚至小于 ^{30}Si 的截面,且截面和同位素丰度不确定度也较大。目前,仅有韩国的先进高通量中子应用堆在使用^[7-8]。因此,为使活化法准确确定与硅单晶目标反应率对应的辐照热中子注量率,需有效抑制反应截面差异引入的测量影响。

本文选用多种活化探测器在岷江实验堆(Minjiang Test Reactor, MJTR)上进行实验,以确定不同反应截面差异的探测器对测量值的影响。为减小测量值偏差,基于Stoughton-Halperin约定关系和两种活化探测器的组合方式,确立了二元一次方程组求解法,并根据共振积分和0.025 3 eV热中子反应截面的比值差异,形成了多组探测器组合,比较并分析了通过该方法得到的实验结果。此外,为进一步验证方程组法的可靠性,还形成了基于三种及以上探测器组合方式的线性最小二乘拟合法,并对两种方法的实验结果进行比较。

1 测量方法

1.1 基本原理

当硅单晶或活化探测器在堆内辐照时,不同能量中子对其目标反应率均具有贡献。但快中子反应截面非常小,可忽略不计,只需要考虑热中子和超热中子贡献即可。根据Stoughton-Halperin约定关系,热中子和超热中子贡献的总反应率可表示为^[10]:

$$R = \phi_0 g \sigma_0 G_{\text{th}} + \phi_c g \sigma_0 \left(f_1 + \frac{w'}{g} + \frac{I_0 G_{\text{res}}}{g \sigma_0} \right) \quad (1)$$

式中: R 为单核反应率(可通过与活化探测器辐照后活度的关系式确定^[11]), s^{-1} ; ϕ_0 为对应于热中子能区的等效0.025 3 eV热中子注量率, $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; ϕ_c 为超热中子注量率, $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; σ_0 和 I_0 分别为0.025 3 eV热中子俘获反应截面和共振积分, cm^2 ; G_{th} 和 G_{res} 分别为热中子和超热中子自屏修正因子; g 为热能区中子反应截面偏离 $1/v$ 规律的修正因子; w' 为 $5kT$ (k 为玻尔兹曼常数, T 为中子温度)至镉切割能范围内反应截面偏离 $1/v$ 规律的修正因子; f_1 为该能区超热中子对反应率的贡献因子(室温下数值约为0.468)。

常用热中子活化探测器在较宽能区服从 $1/v$ 规律,参数 w' 可近似为0。 G_{th} 和 G_{res} 可根据活化探测器尺寸(如片状探测器厚度,丝状探测器直径等)及反应截面等相关参数计算得到^[12-13]。将式(1)等号两边除以 $g\sigma_0$,便可得到与热中子和超热中子反应率总和 R 对应的等效热中子注量率 ϕ_{equ} :

$$\phi_{\text{equ}} = \frac{R}{g\sigma_0} = G_{\text{th}}\phi_0 + \phi_c \left(f_1 + \frac{I_0 G_{\text{res}}}{g\sigma_0} \right) \quad (2)$$

由式(2)等号右边项可知,当不同活化探测器的 $I_0/g\sigma_0$ 值不同时,其 ϕ_{equ} 值可能有明显差异。尤其当 ϕ_c 与 ϕ_0 值越接近时,式(2)右边第二项对 ϕ_{equ} 值的贡献将越大,使得不同探测器的 ϕ_{equ} 值相差越大。由于活化探测器体积较小,将多个探测器布置在堆内相同位置时,可近似认为,其对应的 ϕ_c 和 ϕ_0 值分别相同。因此,只要将活化探测器布置在辐照样品适当位置,并确定测量位置的未知参数 ϕ_c 和 ϕ_0 ,再将其值及样品目标核素的对应参数值代入式(2)右边项后,便可以得到与样品目标反应率对应的 ϕ_{equ} 值。显然,根据式(2)的线性关系,可建立二元一次方程组或者通过线性最小二乘拟合得到 ϕ_c 和 ϕ_0 值。

1.2 二元一次方程组求解法

选择两种 $I_0/g\sigma_0$ 参数值相差较大的活化探测器,将其余相关参数代入式(2)后,便可建立求解探测器所在位置 ϕ_c 和 ϕ_0 的二元一次方程组:

$$\begin{cases} \phi_e = \frac{G_{th}^2 \phi_{equ}^1 - G_{th}^1 \phi_{equ}^2}{G_{th}^2 \left(f_1 + \frac{G_{res}^1 I_0^1}{g^1 \sigma_0^1} \right) - G_{th}^1 \left(f_1 + \frac{G_{res}^2 I_0^2}{g^2 \sigma_0^2} \right)} \\ \phi_o = \frac{\phi_{equ}^2 \left(f_1 + \frac{G_{res}^1 I_0^1}{g^1 \sigma_0^1} \right) - \phi_{equ}^1 \left(f_1 + \frac{G_{res}^2 I_0^2}{g^2 \sigma_0^2} \right)}{G_{th}^2 \left(f_1 + \frac{G_{res}^1 I_0^1}{g^1 \sigma_0^1} \right) - G_{th}^1 \left(f_1 + \frac{G_{res}^2 I_0^2}{g^2 \sigma_0^2} \right)} \end{cases} \quad (3)$$

式中：上标1和2表示探测器种类。通过式(3)得到

$$\begin{cases} \phi_e = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{G_{th}^i} \cdot \left[f_1 + \frac{G_{res}^i I_0^i}{g^i \sigma_0^i} \right] \cdot \left[\frac{\phi_{equ}^i}{G_{th}^i} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\phi_{equ}^j}{G_{th}^j} \right]}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{G_{th}^i} \cdot \left[f_1 + \frac{G_{res}^i I_0^i}{g^i \sigma_0^i} \right] \cdot \left[\frac{1}{G_{th}^i} \cdot \left(f_1 + \frac{G_{res}^i I_0^i}{g^i \sigma_0^i} \right) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{G_{th}^j} \cdot \left(f_1 + \frac{G_{res}^j I_0^j}{g^j \sigma_0^j} \right) \right]} \\ \phi_o = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\phi_{equ}^i}{G_{th}^i} - \phi_e \sum_{i=1}^n \frac{1}{G_{th}^i} \cdot \left(f_1 + \frac{G_{res}^i I_0^i}{g^i \sigma_0^i} \right) \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中：上标*i, j*表示探测器种类；*n*表示种类数目。与二元一次方程组解法类似，通过式(4)得到的 ϕ_e 与 ϕ_o 值，便可确定与硅单晶目标反应率对应的 ϕ_{equ} 值。

2 实验

实验时，将活化探测器布置在如图1所示的辐照装置内，该装置主要由外靶桶、支撑架和样品架组成。其中，支撑架和样品架均为三层，每层间距100 mm，样品架每层有4个孔，中心位置1个孔，外围3个孔，并呈120°夹角。实验前，将种类相同的探测器分别放入1根密封靶管内，并布置在样品架的T06、T07和T09位置(图1)。

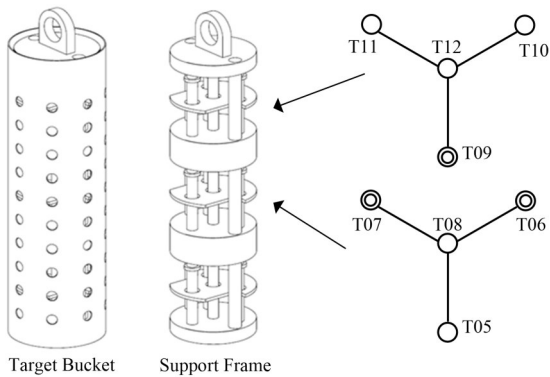


图1 辐照装置及探测器位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of irradiation equipment and detector location

实验共选择了6种对热中子敏感的活化探测器，分别为高纯金属Zr和Fe，以及合金材料CoAl(Co含量1wt%)、AuAl(Au含量0.1wt%)、AgAl(Ag含量0.1wt%)和ScAl(Sc含量2wt%)，相关参数见表1(反应截面参数来自文献[15-16])。其中，考虑到

的 ϕ_e 与 ϕ_o 值，以及与 ^{30}Si (或其他辐照对象的目标核素)相关的 $I_0/g\sigma_0$ 值代入式(2)后，便可得到与硅单晶目标反应率对应的 ϕ_{equ} 值。

1.3 线性最小二乘拟合法

选择三种及以上活化探测器，并根据线性最小二乘法原理^[14]，对式(2)进行变换处理，便可得到 ϕ_e 和 ϕ_o 的拟合值：

Zr目标核素与 ^{30}Si 的反应截面曲线形状比较近似，二者 $I_0/g\sigma_0$ 值相差较小(表1)，因此，将以Zr测量值作为对比值，以验证本文方法的可行性。辐照装置在MJTR的5#孔道进行了入堆辐照，辐照期间堆运行功率为5 MW，冷却剂温度约25 °C。辐照时间约120 min后，将装置出堆并取出活化探测器，并使用高纯锗 γ 谱仪收集了放射性活度计数。

3 结果及讨论

3.1 不同探测器测量结果

通过高纯锗谱仪收集的活化探测器辐照后的特征 γ 射线放射性计数、谱仪的探测效率、活化探测器目标核素的总核数及辐照时间、目标产物的衰变常数及 γ 射线发射强度等，得到各活化探测器对应的单核反应率 $R^{[11]}$ ，再代入式(2)得到的等效热中子注量率 ϕ_{equ} 测量值(表2)。其中，测量值不确定度主要由活化探测器的质量、目标核素反应截面和丰度、目标产物半衰期和特征 γ 射线发射强度及放射性计数、合金材料的目标金属含量，以及谱仪探测效率等不确定度分量合成得到。

由表2数据可知，同一测量位置的不同探测器 ϕ_{equ} 值具有明显差异，随着 $I_0/g\sigma_0$ 值的增大而逐渐变大。以Zr测量值为对比值，各探测器测量值与其偏差如图2所示， $I_0/g\sigma_0$ 值相差越大，对应的偏差越大。尤其AuAl(或AgAl)对应的 $I_0/g\sigma_0$ 值是Zr的3倍，对应的偏差已接近25%。对于不同反应堆，或者堆内不同位置，由于其中子能谱不同，式(2)中 ϕ_e 与 ϕ_o 相对比值不同，上述探测器测量值偏差也将不同。

表1 活化探测器相关参数
Table 1 Relevant parameters of activation detectors

探测器材料 Detector material	形状 Shape	尺寸 Size / mm	目标反应 Target reaction	$\sigma_0 / 10^{-24} \text{ cm}^2$	$I_0/g\sigma_0$
Si	—	—	$^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si}$	0.107±0.002	5.886±0.301
Zr	圆片 Circular foil	直径/厚度 Diameter/thickness 6/0.2	$^{94}\text{Zr}(n,\gamma)^{95}\text{Zr}$	0.049 4±0.001 7	5.362±0.355
Fe	圆片 Circular foil	直径/厚度 Diameter/thickness 6/0.2	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	1.32±0.03	1.135±0.059
CoAl	方片 Square foil	长度/宽度/厚度 Length/width/thickness 3/3/0.2	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{61}\text{Co}$	37.18±0.06	1.990±0.054
AuAl	细丝 Fine wire	长度/直径 Length/diameter 1/1	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	98.65±0.09	15.628±0.283
AgAl	细丝 Fine wire	长度/直径 Length/diameter 1.5/1	$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110m}\text{Ag}$	4.12±0.105	16.394±0.848
ScAl	细丝 Fine wire	长度/直径 Length/diameter 2/1	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$	27.2±0.2	0.445±0.019

表2 不同探测器的等效热中子注量率测量值
Table 2 Measured values of the equivalent thermal neutron fluence rate for different detectors

探测器 Detector	测量值 Measured value / $10^{12} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$			不确定度 Uncertainty / %
	T06	T07	T09	
ScAl	4.608	4.614	3.562	2.6
Fe	4.509	4.560	3.646	3.6
CoAl	4.708	4.797	3.751	3.3
Zr	4.905	5.021	3.918	4.6
AuAl	5.966	6.051	4.717	2.6
AgAl	6.058	6.190	4.737	3.9

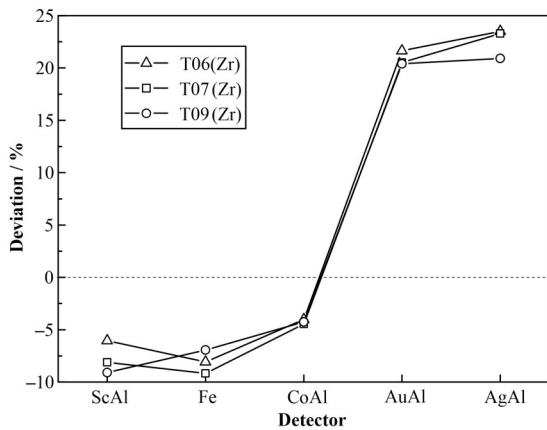


图2 不同探测器与Zr测量值偏差

Fig.2 Deviation of the measured value between different detectors and Zr

3.2 二元一次方程组法结果

如表3所示,以 $I_0/g\sigma_0$ 值相差较大的两种探测器为1组(不包括Zr探测器),共分为6组进行方程组法求解。将各组探测器的 ϕ_{equ} 测量值代入式(3)得到 ϕ_e 与 ϕ_0 值,并与Zr对应的 $I_0/g\sigma_0$ 值一起代入式(2)后,确定的与 ^{94}Zr 反应率对应的 ϕ_{equ} 值如表3所示,与表2中Zr的 ϕ_{equ} 测量值偏差见图3(a),偏差基本小于3%。因此,通过合理的探测器组合,二元一次方程组法能够有效抑制反应截面差异引入的测量影响,大幅减小测量偏差。

为进一步验证方法的适用性,再选择与Zr的

$I_0/g\sigma_0$ 值有较大差异的Fe和AuAl测量值进行比较。利用表3中探测器组合(不含Fe或AuAl的组合)确定的 ϕ_e 与 ϕ_0 值,以及Fe(AuAl)对应的 $I_0/g\sigma_0$ 值,得到与 ^{58}Fe (^{197}Au)反应率对应的 ϕ_{equ} 求解值,与 ϕ_{equ} 测量值的偏差见图3(b)。对于Fe探测器,各探测器组合对应偏差基本在3.5%以内。对于AuAl探测器,对应偏差基本在1%以内。因此,综合而言,本方法具有很好的普适性,能够满足不同辐照对象的热中子注量率测量。

表3 不同探测器组合的方程组法确定值
Table 3 The determined value of equations method for different detector groups

探测器组合 Detector group	确定值 Determined value / $10^{12} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$		
	T06	T07	T09
A1组 A1 Group (Co-Al/AuAl)	5.044	5.132	4.009
A2组 A2 Group (Co-Al/AgAl)	5.048	5.148	4.000
A3组 A3 Group (Sc-Al/AuAl)	5.085	5.118	3.967
A4组 A4 Group (Sc-Al/AgAl)	5.092	5.139	3.954
A5组 A5 Group (Fe/AuAl)	4.987	5.048	3.999
A6组 A6 Group (Fe/AgAl)	4.991	5.066	3.988

3.3 线性最小二乘法结果

如表4所示,将 $I_0/g\sigma_0$ 值相差较大的探测器分为7组进行了最小二乘法拟合。其中,有6组为3种探测器组合,1组为除Zr以外的5种探测器组合。将通

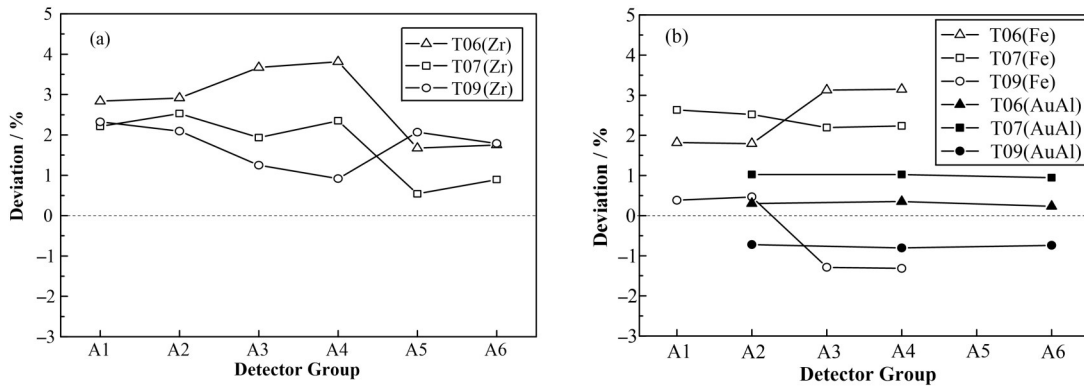


图3 方程组法确定值与测量值的偏差 (a) 与Zr测量值比较,(b) 与Fe(AuAl)测量值比较
 Fig.3 Deviation between the determined value of equations method and the measured value
 (a) Comparison with Zr measured value, (b) Comparison with Fe(AuAl) measured value

过式(4)得到的 ϕ_e 与 ϕ_0 值,以及Zr的 $I_0/g\sigma_0$ 值代入式(2)后,确定的对应 ϕ_{equ} 值如表4所示,与表2中Zr的 ϕ_{equ} 测量值偏差见图4,偏差基本在3%以内。将B7组与其余组结果比较可知,使用5种探测器的组合相对3种没有明显优势,因此,使用最小二乘法时,

选用 $I_0/g\sigma_0$ 值相差较大的3种探测器组合即可。此外,对比图3(a)和图4可知,方程组法与最小二乘法结果相近,进一步证明了方程组法的可靠性。虽然两种方法均能有效抑制反应截面差异引入的测量影响,但方程组法仅需要两种探测器,因此,优先推荐使用方程组法。

表4 不同探测器组合的最小二乘法确定值
 Table 4 The determined value of least square method for different detector groups

探测器组合 Detector group	确定值 Determined value / $10^{12} n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$		
	T06	T07	T09
B1组 B1 Group (Co-Al/Sc-Al/AuAl)	5.066	5.124	3.986
B2组 B2 Group (Co-Al/Sc-Al/AgAl)	5.071	5.143	3.975
B3组 B3 Group (Fe/Sc-Al/AgAl)	5.043	5.103	3.970
B4组 B4 Group (Fe/Sc-Al/ AuAl)	5.037	5.084	3.982
B5组 B5 Group (Fe/AuAl/Co-Al)	5.014	5.088	4.004
B6组 B6 Group (Fe/AgAl/Co-Al)	5.018	5.105	3.994
B7组 B7 Group (5种探测器 Five types of detectors)	5.042	5.108	3.985

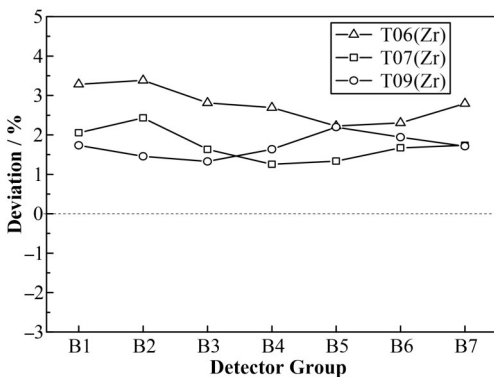


图4 最小二乘法确定值与Zr测量值偏差
 Fig.4 Deviation between the determined value of least square method and Zr measured value

4 结语

本文通过多种活化探测器测量实验,确定了反

应截面差异对活化法测量值具有显著影响。基于Stoughton-Halperin约定关系建立的二元一次方程组求解法,并通过截面差异较大的两种探测器组合方式,能够有效抑制活化探测器与辐照样品种类反应截面差异引入的测量影响,大幅减小测量值偏差,准确得到与辐照样品种类反应率对应的等效热中子注量率。本方法不仅适用于单晶硅辐照热中子注量率的测量,也适用于其他对热中子敏感的样品,并且可选择的探测器种类也较广,不需要考虑活化探测器与样品目标核素的反应截面差异。

参考文献

- IAEA. Neutron transmutation doping of silicon at research reactors (IAEA-TECDOC-1681) [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012.
- 彭光辉, 李范莲. 高通量工程试验堆单晶硅中子嬗变掺

- 杂技术研究[J]. 核动力工程, 1984, **5**(3): 12-18.
- PENG Guanghui, LI Fanlian. The study of neutron transmutation doping (NTD) process of single crystalline silicon on the HFETR[J]. Nuclear Power Engineering, 1984, **5**(3): 12-18.
- 3 徐小琳, 王家英. 影响NTD硅掺杂精度的因素[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1987, **27**(6): 86-93. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.1987.06.012.
- XU Xiaolin, WANG Jiaying. Factors affecting on NTD silicon doping precision[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1987, **27**(6): 86-93. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.1987.06.012.
- 4 Kim H, Pyeon C H, Sakurai Y, *et al.* Effect of axial reflector on radial uniformity in neutron transmutation doping of silicon[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, **38** (11): 2541-2549. DOI: 10.1016/j.anucene.2011.07.038.
- 5 Kim H, Pyeon C H, Lim J Y, *et al.* Effects of silicon cross section and neutron spectrum on the radial uniformity in neutron transmutation doping[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2012, **70**(1): 133-138. DOI: 10.1016/j.apradiso.2011.08.006.
- 6 Komeda M, Kawasaki K, Obara T. A new irradiation method with a neutron filter for silicon neutron transmutation doping at the Japan research reactor No.3 (JRR-3)[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2013, **74**: 70-77. DOI: 10.1016/j.apradiso.2013.01.005.
- 7 Cho D K, Kim M S. Comparison of calculated results with NTD measured data for establishment of burned core model for Monte Carlo simulation of HANARO reactor [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2015, **303**(2): 1629 - 1633. DOI: 10.1007/s10967-014-3784-8.
- 8 Kim M S, Kang G D. Precise control of neutron irradiation fluence in the neutron transmutation doping process at HANARO using SPND and zirconium foils[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, **63**(3): 1625-1629. DOI: 10.1109/TNS.2016.2556718.
- 9 Salhi M, Mohammedi B, Laouar S, *et al.* Conceptual design of irradiation device for silicon neutron transmutation doping around Es-Salam research reactor [J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, **31**(4): 38. DOI: 10.1007/s41365-020-0747-3.
- 10 ASTM E262. Standard test method for determining thermal neutron reaction rates and thermal neutron fluence rates by radioactivation techniques[S]. West Conshohocken, ASTM International, 2017.
- 11 史永谦. 核反应堆中子学实验技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2011: 71-88.
- SHI Yongqian. Nuclear reactor neutronics experimental technology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2011: 71-88.
- 12 Martinho E, Goncalves I F, Salgado J. Universal curve of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils, wires and spheres[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2003, **58**(3): 371-375.
- 13 Martinho E, Salgado J, Goncalves I F. Universal curve of the thermal neutron self-shielding factor in foils, wires, spheres and cylinders[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2004, **261**(3): 637-643.
- 14 沙振舜, 周进, 周非. 当代物理实验手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012: 12-15.
- SHA Zhenshun, ZHOU Jin, ZHOU Fei. Handbook of contemporary physics experiment[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 12-15.
- 15 Mughabghab S F. Thermal neutron capture cross sections resonance integrals and G-factors[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003.
- 16 Mughabghab S F. Atlas of neutron resonances: resonance parameters and thermal cross sections $Z=1\sim 100$ [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.