

文章编号: 2095-4980(2015)06-1000-06

## 快中子临界装置辐射损伤等效性实验测量

邹德慧<sup>b</sup>, 周 静<sup>a</sup>, 邱 东<sup>a</sup>, 鲁 艺<sup>a</sup>, 荣 茹<sup>a</sup>, 李俊杰<sup>a</sup>

(中国工程物理研究院 a.核物理与化学研究所; b.中子物理学重点实验室, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** CFBR-II 堆是中子辐照实验指定模拟辐射源, 某快中子临界装置在辐射效应研究中的作用越来越重要, 为了准确评价利用上述平台开展的辐射效应研究结果, 需要确定二者的辐射损伤等效系数。利用双极晶体管直流增益倒数与中子注量的线性关系, 开展辐射损伤等效性研究。分析了辐射损伤等效系数的影响因素, 从实验原理和工程实现的角度建立了效应参数和场量参数的控制方法, 采用损伤常数平均的方式进行数据处理, 首次获得了快中子临界装置与 CFBR-II 堆的辐射损伤等效系数为 1.19, 不确定度为 3.53%, 满足了应用需求。

**关键词:** 辐射效应; 等效; 注量; 能谱

中图分类号: TN32

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201506.1000

## Radiation damage equivalent experimental measurement for fast neutron critical assembly

ZOU Dehui<sup>b</sup>, ZHOU Jing<sup>a</sup>, QIU Dong<sup>a</sup>, LU Yi<sup>a</sup>, RONG Ru<sup>a</sup>, LI Junjie<sup>a</sup>

(a. Institute of Nuclear Physics and Chemistry; b. Key Laboratory of Neutron Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** China Fast Burst Reactor-II is the specified radiation source for neutron irradiation experiments, while the fast neutron critical assembly becomes more and more important in the study of radiation effect. The radiation damage equivalent coefficient between the two ones should be determined in order to accurately evaluate the radiation effect by using the fast neutron critical assembly. The silicon bipolar transistors are used as displacement damage monitors to obtain the damage constants of different neutron fields, according to the liner relationship between the reciprocal gain and neutron fluence. The factors influencing the radiation damage equivalent coefficient are analyzed. The experimental methods of controlling the effect parameters of semiconductor devices and the field parameters of the radiation source are established from experiment principle and engineering practice. The radiation damage equivalent coefficient averaging 1.19 between fast neutron critical assembly and CFBR-II is obtained for the first time by data processing, with the uncertainty of 3.53%, which meets the application requirements.

**Key words:** radiation effect; equivalence; fluence; energy spectrum

CFBR-II (China Fast Burst Reactor-II) 堆是国内唯一在役的快中子脉冲堆, 是核爆辐射场的最佳模拟装置, 也是电子元器件和电子系统抗辐射加固验收的专用辐射源。2010 年, 邱东、林东生等人<sup>[1]</sup>开展了 XAPR (Xi An Pulse Reactor) 堆与 CFBR-II 堆典型辐照工位的辐射损伤等效性研究, 得到了等效系数; 2012 年, 邱东、鲁艺、邹德慧等人<sup>[2]</sup>开展了 CFBR-II 堆不同辐照工位的辐射损伤等效性研究, 得到了不同工位辐射损伤没有显著差异的结论。在美国圣地亚实验室, SPR-III (Sandia Pulse Reactor-III) 脉冲堆和 ACRR (Annular Cardiac Research Reactor) 装置多年以来担负着电子系统和电子器件的辐射效应测试任务, SPR-III 的中心辐照腔位置和 ACRR 的 Pb-B<sub>4</sub>C 桶位置是半导体位移损伤效应测试应用最频繁的辐照工位, 在 SPR-III 关闭以前, J G Williams 等人<sup>[3]</sup>利用 2N2222A 三极管开展了二者的辐射损伤等效性研究, 得到了 ACRR (Pb-B<sub>4</sub>C) 相对于 SPR-III 的等效系数为 1.42±0.05, 相关研究方法作为重要档案保存, 随着 SPR-III 关闭以后, ACRR 发展成为模拟武器辐射效应和鉴定部件的指定装置。根

收稿日期: 2015-07-10; 修回日期: 2015-09-14

基金项目: 中国工程物理研究院中子物理学重点实验室基金资助项目(2013BC01)

据近年来中子辐射损伤等效性研究的趋势来看<sup>[4-5]</sup>, 精确获得关注辐照工位的辐射损伤等效系数是行业纵深发展的需求。随着中子物理实验室的快中子临界装置投入应用, 其在辐射效应研究中的作用日趋凸显, 需要建立与CFBR-II堆的辐射损伤等效系数。本文综合分析等效性研究的要素, 开展了快中子临界装置与CFBR-II堆的辐射损伤等效性实验测量。

## 1 实验原理

中子与半导体材料发生作用, 在其内部引入缺陷和缺陷群, 使得其少数载流子寿命降低, 纯搀杂质浓度和迁移率等降低, 这些微观参数的变化引起半导体器件宏观电参数变化, 因此可以利用半导体器件的中子辐射效应开展等效性研究。早期, 采用的实验模式主要是用相同品种的半导体器件分别在2个或几个辐射源上开展实验, 调整辐照中子注量至规定值, 比较器件关注效应参数的变化; 或者是让器件的效应参数达到同样的损伤程度, 比较辐照中子注量的差异。随着实验技术的发展, 效应参数在线测试成为一种趋势, 采样率可以达到MHz, 容易通过数据拟合得到损伤常数<sup>[6]</sup>, 采用这种实验模式, 具有连续能谱分布的不同辐射源间的等效系数 $R$ 可描述为:

$$R = K_1 / K_2 \quad (1)$$

式中 $K_1$ 和 $K_2$ 分别为辐射源1和2对指定半导体器件的损伤常数。

等效性实验研究中比较常用的器件有三极管、整流二极管、PIN二极管、发光二极管, 其中具有里程碑意义的实验是20世纪70年代Verbinski等人采用2N2222硅三极管在多种快脉冲堆和热堆上开展的研究, 1979年他公布2N2222的直流增益在多种中子环境中发生变化, 并证明了三极管直流增益倒数的变化与入射到器件上的1MeV等效中子注量成比例的重要观点。在随后的研究中, 三极管成为等效性研究中应用最广的器件。

中子辐照三极管后, 因少子寿命降低, 导致直流增益降低; 因载流子去除效应, 导致集电极发射极饱和电压增大; 因集电结势垒区非平衡载流子寿命大幅度下降, 导致基极集电极漏电流增加。在上述3个参数中, 直流增益是最重要的电参数, 也是最受关注的电参数。在常规辐照实验条件下, 直流增益倒数变化量与辐照中子注量有如下线性关系<sup>[7]</sup>:

$$\Delta(1/h_{FE}) = 1/h_{FE}(\phi) - 1/h_{FE}(0) = K \cdot \phi \quad (2)$$

式中:  $\Delta(1/h_{FE})$ 为辐照前后三极管直流增益倒数的变化量;  $h_{FE}(\phi)$ 为中子辐照后的直流增益;  $h_{FE}(0)$ 为中子辐照前的直流增益;  $K$ 为实验增益损伤常数, 简称损伤常数, 是基极渡越时间和器件材料的函数, 单位为 $\text{cm}^2$ ;  $\phi$ 为辐照中子注量, 单位为 $\text{cm}^{-2}$ 。

通过式(2)获得不同辐射源对同一只三极管的损伤常数, 将其代入式(1)即可获得对应的等效系数。

## 2 实验影响因素

要获得具有应用价值的等效系数, 必须建立科学的实验方法, 将影响因素降至最低。如前所述, 实验模式采用同种类型器件分别在CFBR-II堆与快中子临界装置上开展辐照实验, 通过效应参数在线测试, 得到损伤常数。因此实验结果的影响因素有: 效应参数、场量参数、数据处理模式以及不确定度评定模式等。

## 3 实验方法

### 3.1 效应参数控制方法

国外等效性研究普遍选择实验样品为2N2222/2N2222A三极管, 取得了较好效果, 国内也曾利用该进口商用器件开展实验, 但效果并不理想, 原因是不同批次样品的质量控制存在差异, 辐照之后效应参数的分散性太大, 不利于数据处理, 而该型号的国产替代器件尚未在等效性研究中投入使用, 因此在样品选择方面不能直接套用国外的经验。经过实践检验, 3DG121C硅外延层高频小功率三极管性能稳定, 其损伤阈值与快中子反应堆的辐射场强度相适应, 在等效性研究中有应用先例, 可以作为本次实验样品, 同时也符合国产化的选择要求。

器件性能不同, 效应参数呈现分散趋势, 必然导致损伤常数的重复性降低。对于不同的辐射源, 通常采用“相对相同的方法”进行控制, 即进行器件性能一致性筛选。在质量方面, 由普军等级提升至七专加严或超特军等级, 以便提高器件的利用率并降低器件在辐照之后的分散性; 在批次性方面, 控制不同辐射源样品为同一生产批次; 在参数一致性控制方面, 通过厂家初选、基本电参数复选、标称条件复选、实验在线条件复选等4个层次的筛选, 量化了直流增益一致性控制条件为95%, 特征频率推荐一致性控制条件为90%。另一方面, 从效应参数的可视

测性以及异常实验现象的可判断性来讲,对初始直流增益的一致性进行控制是必要的。

在实验样品选择阶段,效应参数首先采用专业的半导体分立器件测试系统进行测试,然后采用实验现场的效应参数测试系统测试,该环节测试电缆与正式实验为同一套。

在正式实验阶段,效应参数测试方法有原位测试和移位测试 2 大类,其中原位测试又分原位在线测试(辐照和测试同步进行)和原位离线测试(测试时停止辐照)2 种方法。这些方法原则上均可用于辐照时的效应参数测试。在实际工作中,器件均处于加电工作状态,因此实验采用了原位在线测试方法。

### 3.2 场量参数控制方法

**中子注量均匀性控制:**根据标准《微电子器件试验方法和程序》中子辐射的要求“试验器件应安装得使全部样品上的中子注量总变化不超过 20%”,因此,在样品布放和辐照板的设计时要考虑如何实现每组样品的中子注量均匀性,设计时一方面兼顾辐射源的形状,另一方面兼顾样品尺寸和布放方式。CFBR-II 堆为球形结构,常用辐照工位为上半球活性区外除控制机构的开放空间,快中子临界装置为圆柱形结构,常用辐照工位为圆柱顶面和圆柱侧面的开放空间。鉴于此,在 CFBR-II 堆上的辐照板设计为弧形,弧度与活性区成同心圆,在快中子临界装置侧面的辐照板也设计成为弧形,弧度与圆柱成同心圆,顶面辐照板依据样品数量设计为圆形或半圆形。为了保证样品端面垂直于入射中子流方向,所有弧形辐照板在布放样品时进行 90°弯曲处理,圆形或半圆形辐照板上同一中子注量率样品处于同心圆。

**中子注量测量方法:**结合快中子临界装置的特点,采用裂变电离室进行注量测量,即用同一支裂变电离室对所有比对区域(包括不同辐射源和同一辐射源)采用同一标准进行中子注量率刻度,用刻度结果作为样品实际受照中子注量的控制依据。具体包括以下控制措施:第一,注量率刻度全过程用手动调节方式控制功率涨落,刻度工作在功率完全稳定后进行,功率涨落不超过 3%;第二,为确保刻度精确度,多道参与数据处理的计数不少于 10 000 个,即统计涨落不超过 1%;第三,尽管从损伤效应来说快中子临界装置和 CFBR-II 堆 10 keV 以下中子的贡献可以忽略不计,但对于注量率刻度则进行了考虑,以  $^{239}\text{Pu}$  裂变电离室为例<sup>[8]</sup>,1 keV 以下中子的裂变截面显著地高于裂变谱平均截面,低能中子份额的微小差异也可能引起探测器计数的显著变化,因此,进行刻度工作时探测器的灵敏区外包裹一层  $^{10}\text{B}$  材料屏蔽 1 keV 以下中子,有效地回避了  $^{239}\text{Pu}$  的共振区。

**能谱控制:**要求同一比对区域的中子能谱相同,一般认为能谱分布不随时间和功率变化,而比对区域(辐照实验样品放置的典型区域)的划分已经考虑了能谱相同的要求,因此能谱控制是自适应的。

**测量结束条件控制:**实验不再以累计中子注量或运行时间作为结束条件,而用效应参数测试结果作为结束条件,即当监测得到的 3DG121C 的直流增益减小到辐照前的 20%左右时,实验结束。采用该控制条件可以依据辐照注量的差异快速估算等效系数。

### 3.3 数据处理方法

**方法一:**把所有器件当作一个个体,将器件的直流增益首先进行平均,然后根据实验原理进行过零线性拟合,得到一个损伤常数,即<sup>[9]</sup>:

$$K = \frac{\frac{1}{\sum_{j=1}^n h_{\text{FE}}(\phi_{ij})} - \frac{1}{\sum_{j=1}^n h_{\text{FE}}(0_{ij})}}{\phi_i} \quad (3)$$

式中:  $h_{\text{FE}}(\phi_{ij})$  为任意注量点  $\phi_i$  下第  $j$  个器件辐照后的直流增益;  $h_{\text{FE}}(0_{ij})$  为任意注量点  $\phi_i$  下第  $j$  个器件辐照前的直流增益;  $n$  为该注量点下器件的数量,其余参数同上述之约定。

**方法二:**对每只器件进行单独处理,从中获取每个位置的位移损伤信息,基于该种数据分析思想,首先根据实验原理进行过零线性拟合得到每只器件的损伤常数,然后进行平均,即:

$$K_{ij} = \frac{\frac{1}{h_{\text{FE}}(\phi_{ij})} - \frac{1}{h_{\text{FE}}(0_{ij})}}{\phi_i} \quad (4)$$

$$K = \sum_{j=1}^n K_{ij} / n \quad (5)$$

式中  $K_{ij}$  为在任意注量点  $\phi_i$  下第  $j$  个器件的损伤常数。注意, 式(4)和式(5)不能合并为式(6), 因为直接采用式(6)不能得到每个器件的信息。

$$K = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{h_{FE}(\phi_{ij})} - \frac{1}{h_{FE}(0_{ij})}}{\phi_i} \quad (6)$$

方法一对器件的一致性要求高, 多用于离线测量情况, 方法二更适用于多通道在线测量的情况。

### 3.4 不确定度评估方法

从数据处理方法的角度分析, 方法一中初始直流增益的一致性水平(90%)将会作为不确定度源项传递最终的损伤常数, 方法二则不需要考虑该源项, 从降低不确定度的要求出发, 采用方法二进行数据处理。

从实验原理的角度分析, 研究的最终目标是测量同种性质的 2 个参数的比值, 如果严格控制 2 个参数的测试条件一致, 那么即便是每个参数的不确定度较大, 也会由于比对属性消除部分测量不确定度, 如: 消除由系统因素引入的不确定度分量, 从而使得目标参数的不确定度较小, 事实上, 本次实验研究就属于这种典型情况。辐射损伤等效性系数是不同中子辐射源对同一样品的损伤常数之比, 而单个辐射源的损伤常数是全部样品损伤常数  $K_{ij}$  的算术平均值, 因此实验测量的不确定度取决于损伤常数算术平均值的不确定度, 因此其不确定度可简单地用同一参数重复测量多次的概率置信度评定方法来评定。

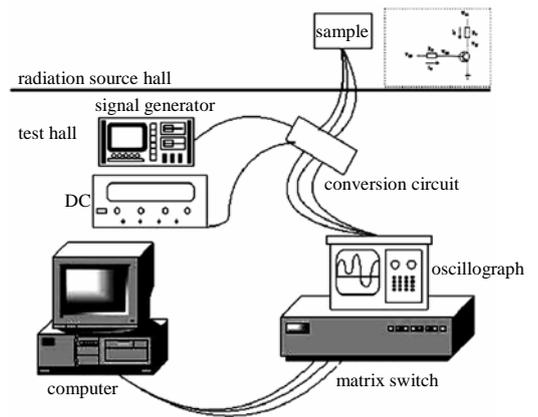


Fig.1 Schematic diagram of measurement  
图 1 测量示意图

## 4 实验结果及分析

在 CFBR-II 堆和快中子临界装置上开展了 3DG121C 损伤常数测量实验, 测量示意图见图 1, 测量结果显示, CFBR-II 堆上的器件经过辐照后直流增益下降趋势基本一致, 因此对应的损伤常数基本一致, 快中子临界装置上编号为 1,2,3 的 3 只器件经过辐照后直流增益下降程度较快, 其余器件下降程度趋于一致, 因此对应损伤的损伤常数呈 2 种分布, 图 2 给出了每只器件对应的损伤常数。

分析图 2(b), 编号为 1,2,3 的 3 只器件损伤常数高出了其余 22 只器件约 23%, 厂家反馈可能的原因是在进行管芯切割时混入了不同批次的硅片, 因此有必要对实验样品控制方法进行调整, 即: 除了常规的同批次生产工艺控制以外, 还应增加管芯为同一批次的控制要求<sup>[10]</sup>。通过 t 检验法对上述异常数据进行了剔除<sup>[11]</sup>, 同时对其他数据进行了检验, 同理也对图 2(a)中的数据进行了检验, 判定没有异常数据。

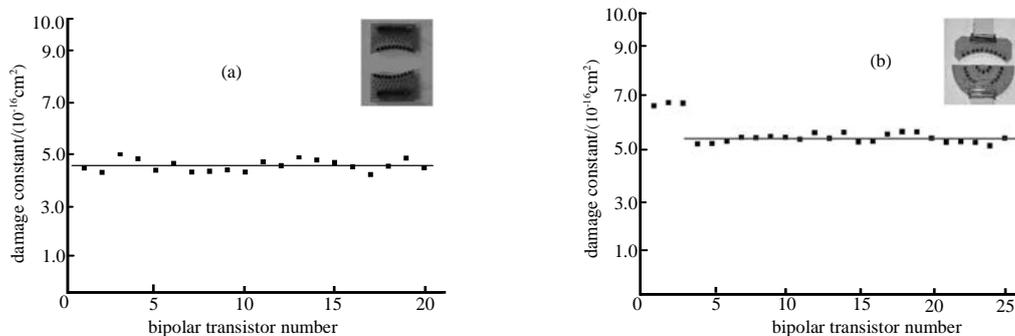


Fig.2 CFBR-II (a) and fast neutron critical assembly (b) radiation damage constants  
图 2 CFBR-II 堆(a);和快中子临界装置(b)辐射损伤常数

表 1 给出了 3DG121C 的损伤常数, 其不确定度源项有中子注量测量系统偏差、效应参数测量系统偏差、伴随  $\gamma$  损伤、测量列标准偏差, 损伤常数本身的不确定是比较大的, 通过 3.4 节的方法, 损伤常数的比值关系将测

量设备及辐射源引入的系统偏差进行了消除,那么等效系数的标准不确定度则是测量列的实验标准偏差。数据处理得到快中子临界装置与 CFBR-II 堆的辐射损伤等效系数为  $1.19 \pm 0.042$  (置信度 99.7%)。

表 1 3DG121C 的损伤常数及不确定度源项  
Table 1 Damage constants and uncertainty origins of 3DG121C

radiation source	damage constant/cm <sup>2</sup>	neutron fluence uncertainty/%	effect parameter uncertainty/%	concomitance $\gamma$ -ray uncertainty/%	measure arrange uncertainty/%
CFBR-II	$4.62 \times 10^{-16}$	10	3	1	1.03
fast neutron critical assembly	$5.50 \times 10^{-16}$	10	3	1	0.57

## 5 结论

早期工作中,效应参数通常采用同样的实验方法,而场量参数由于辐射源的差异无法采用相同的实验方法。本工作得益于辐射源单位的先天优势,无论是效应参数还是场量参数,均采用了同样的实验方法进行控制,可以降低实验结果的不确定度。通过上述方法,得到了快中子临界装置与 CFBR-II 堆的辐射损伤等效系数为 1.19,不确定度为 3.53% (置信度 99.7%),该系数已作为抗辐射加固研究工作的基准参数指导辐照实验工作开展。

### 参考文献:

- [1] 杨善潮,郭晓强,林东生,等. 基于晶体管测量的中子注量在线实时测量系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(5):621-626. (YANG Shanchao, GUO Xiaoqiang, LIN Dongsheng, et al. Online real-time measurement system based on the transistor measurement of neutron fluence[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(5): 621-626.)
- [2] 鲁艺,邱东,邹德慧,等. 基于晶体三极管的不同中子能谱等效性实验研究[J]. 核技术, 2014,37(6):060403-1-060403-6. (LU Yi, QIU Dong, ZOU Dehui, et al. Experiment study on equivalence of different neutron spectra based on transistors[J]. Nuclear Techniques, 2014,37(6):060403-1-060403-6.)
- [3] Williams J G, Griffin P J, King D B, et al. Simultaneous evaluation of neutron spectra and 1-MeV-equivalent(Si)fluences at SPR-III and ACRR[J]. Transactions on Nuclear Science, IEEE, 2007,54(6):2296-2302.
- [4] 邹德慧,邱东. 基于三极管的 CFBR-II 堆辐射损伤常数测定[J]. 核动力工程, 2010,31(1):140-142. (ZOU Dehui, QIU Dong. Measurement of radiation damage constant about bipolar transistor of CFBR-II[J]. Nuclear Power Engineering, 2010,31(1):140-142.)
- [5] 邱东,邹德慧. 基于 CFBR-II 堆中子辐射场的硅整流二极管辐照效应试验研究[J]. 核动力工程, 2010,31(1):127-130. QIU Dong, ZOU Dehui. Experimental study on irradiation effect of silicon commutation diode on CFBR-II neutron field[J]. Nuclear Power Engineering, 2010,31(1):127-130.)
- [6] 邹德慧,邱东,许波,等. 中子辐射损伤等效性研究进展[J]. 同位素, 2015,28(1):54-64. (ZOU Dehui, QIU Dong, XU Bo, et al. Studies on the neutron radiation damage equivalence[J]. Journal of Isotopes, 2015,28(1):54-64.)
- [7] 陈盘讯. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (CHEN Panxun. Radiation Effects on Semiconductor Devices and Integrated Circuits[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.)
- [8] 郑春,李建胜,何锡钧,等. 能谱变化对<sup>239</sup>Pu 裂变室测量快中子注量的影响[J]. 核电子学与探测技术, 2004,24(4):391-394. (ZHENG Chun, LI Jiansheng, HE Xijun, et al. Fast neutron flux measurement uncertainty due to the variation of neutron spectra distribution[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004,24(4):391-394.)
- [9] 邹德慧,高辉,鲁艺,等. 中子位移损伤监测技术研究[J]. 原子能科学技术, 2010,44(Z1):472-475. (ZOU Dehui, GAO Hui, LU Yi, et al. Monitor technology about neutron displacement damage[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010,44 (Z1):472-475.)
- [10] 邹德慧,邱东,杨成德,等. 中子辐射损伤等效性研究的半导体器件选择方法[J]. 核电子学与探测技术, 2014,34(7):869-873. (ZOU Dehui, QIU Dong, YANG Chengde, et al. The semiconductor device selection method based on neutron radiation damage equivalence study[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014,34(7):869-873.)
- [11] 王文周. 未知  $\sigma$ , t 检验法剔除异常值最好[J]. 四川工业学院学报, 2000,19(3):50-54. (WANG Wenzhou. t test-the superlative test to discard abnormal values with  $\sigma$  unknow[J]. Journal of Sichuan University of Science and Technology, 2000,19(3):50-54.)