

文章编号: 1672-2892(2012)05-0621-06

基于晶体管测量的中子注量在线实时测量系统

杨善潮, 郭晓强, 林东生, 李 斌, 李瑞宾, 白小燕, 马 强

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 利用晶体管直流放大倍数的倒数与中子注量呈线性关系这一特点, 使用晶体管作为在线中子注量测量的探测器, 建立了以计算机、GPIB 总线、矩阵开关、任意波形发生器、数字示波器等硬件为基础, 基于 LabVIEW 软件平台的中子注量在线实时监测系统。在西安脉冲反应堆中子辐射场中, 开展了标定实验研究, 建立的中子注量在线实时监测系统实现了空间分布的中子注量实时测量, 利用该套系统得到了 XAPR 和 CFBR-II 的等效损伤系数。

关键词: 位移效应; 晶体管放大倍数; 中子注量在线测量; 虚拟仪器

中图分类号: TN431; TN792

文献标识码: A

Online real-time measurement system based on the transistor measurement of neutron fluence

YANG Shan-chao, GUO Xiao-qiang, LIN Dong-sheng, LI Bin, LI Rui-bin, BAI Xiao-yan, MA Qiang
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: An on-line monitoring system of neutron fluence was established based on the understanding of the linear relationship between $\Delta 1/\beta$ of transistor and neutron fluence. The hardware of this system consisted of computer, GPIB bus unit, matrix switch, function waveform generator and digital oscilloscope; while the software was built up by Labview program. The calibration tests were performed at the Xi'an TRIGA reactor. This system actualized an on-line test of neutron fluence in the radiation cavity. The equivalent damage coefficient of XAPR and CFBR-II was obtained by using this test system.

Key words: displacement effects; gain of transistor; online test of neutron fluence; virtual instrument

中子具有很强的穿透能力, 对于电子系统中的元器件将造成不同程度的损伤, 一般会破坏系统的正常工作。在中子辐射效应试验研究中, 电子元器件受中子辐照后产生的损伤不仅与中子注量有关, 而且与中子能量和中子作用时间有关。中子能谱和中子作用时间与模拟源中子能谱和中子作用时间不同, 在相同的中子注量下, 对电子元器件和材料造成的损伤不同, 为研究其损伤差异, 确定不同中子源相互之间的辐照损伤等效关系是十分重要的, 在国外大量的文献中所表明的中子注量均注明是 1 MeV 等效中子, 国外也都采用 1 MeV 等效中子作为标准^[1], 因此国内的中子辐射效应研究也采用了 1 MeV 等效中子注量来统一衡量中子对电子元器件造成的损伤情况。

在中子辐射模拟源进行中子辐射效应试验研究时, 由于空间摆放位置的不同, 中子能谱和中子注量会有所差异, 在线监测中子注量可以在试验现场直观准确给出各个布放点的电子元器件主要电参数(特别是中子辐照敏感参数)随中子注量的变化规律, 直接给出电子元器件的主要电参数的失效中子注量, 因此有必要研制一套中子注量在线监测系统, 为中子辐射效应敏感参数、规律分析提供必要的手段。本项目通过对晶体管中子辐射效应的分析, 利用晶体管直流放大倍数的倒数的变化值 $\Delta(1/h_{FE})$ 与中子注量具有简单的线性关系这一特点, 采用晶体管作为在线监测的探测器, 实时测量 h_{FE} 随中子辐射的变化得到中子等效注量。

1 晶体管的中子辐射效应及损伤机理

中子辐射在半导体材料内引入缺陷和缺陷群, 从而改变了半导体材料的 3 个微观物理参数, 即少数载流子寿

命 τ , 纯掺杂杂质浓度 n 和迁移率 μ 。其中少数载流子寿命是对中子辐射最灵敏的微观参数, 它的退化是以少数载流子为导电机理的半导体器件和双极集成电路对中子辐射灵敏的主要因素。中子辐射引起基区载流子复合增加是双极器件性能退化的主要机理。中子辐射引起的直流放大倍数倒数的变化量可以表示为^[2]:

$$\Delta(1/h_{FE}) = \frac{\Delta I_B}{I_C} = \frac{\Delta I_{RB} + \Delta I'_D + \Delta I_{RG} + \Delta I_S - \Delta I_{CBO}}{I_C} \quad (1)$$

式中: I_{RB} 代表基区体复合电流; I'_D 代表由基区扩散入发射区的多数载流子电流; I_{RG} 代表发射极-基极耗尽层的复合电流; I_S 代表表面复合电流; I_{CBO} 代表集电极-基极反向电流。

I'_D 和 I_{CBO} 由中子辐射引起的变化很小, 一般不予考虑。 I_S 的变化, 一般是由电离辐射引起, 这里也不予考虑。体复合电流的增加是因缺陷在基区形成复合中心而引起, 当双极器件工作电流较大时, I_{RB} 是中子辐射双极晶体管基极电流变化的主要部分。因此公式(1)可以简化为:

$$\Delta(1/h_{FE}) = \frac{1}{h_{FE(\varphi)}} - \frac{1}{h_{FE(0)}} = \frac{\Delta I_{RB} + \Delta I_{RG}}{I_C} = t_b \cdot K_f \cdot \varphi \quad (2)$$

式中: φ 代表中子注量; $h_{FE(\varphi)}$ 代表中子辐射后的直流放大倍数; $h_{FE(0)}$ 代表中子辐射前的直流放大倍数; t_b 代表基区少数载流子渡越时间; K_f 代表中子辐射复合损伤常数。

2 中子注量在线监测系统的研制

2.1 中子注量在线监测系统的工作原理

由式(1)和式(2), 设 $\lambda = t_b \cdot K_f$ 可得

$$\Delta(1/h_{FE}) = \frac{\Delta I_B}{I_C} = \frac{\Delta I_{RB} + \Delta I_{RG}}{I_C} = \lambda \varphi \quad (3)$$

可见中子辐射造成的晶体管直流放大倍数的倒数的变化值与中子注量有很好的线性关系, 只要测量 ΔI_B , 就可以得到中子注量。有试验^[2]表明这一近似关系适用的中子注量范围为 $10^9 \text{cm}^{-2} \sim 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 。国外有文献报道利用晶体管的这一特性测量 1 MeV 等效中子注量, 并且写入了美国的 ASTM 标准中^[3-4]。因此根据这一原理, 将晶体管作为实时监测中子注量的探测器, 经过活化法测量标定^[3-4]后, 在线实时测量晶体管直流放大倍数的倒数的变化值即可得到中子辐射效应试验中实时的中子注量。

测试时选取合适的 I_C 进行计算。将测量的电流信号转化为电压信号, 在晶体管的收集极和发射极之间加一固定电压 V_{CE} , 基极和发射极之间加一锯齿波(0 到 10 V 扫描)的方式进行, 在测试系统中引入矩阵开关, 可以实现: 1) 同时实时在线监测多个点的中子注量; 2) 保证只在测试期间加电。

辐照板放入辐照盒内, 通过电缆或者排线连接至测试间示波器上; 示波器再将记录的波形传送到电脑主机。电脑主机控制给辐照板加电和处理从示波器传送过来的波形信号, 并将处理过的信号作图显示出来, 同时存储至主机内。整个辐照期间, 通过矩阵开关保证只在进行参数测试过程中给晶体管加电和和探测器之间的轮流测量, 使测量每只晶体管的时间为 1 ms, 扫描测量时间与辐照时间之比小于 1%。利用系统中的数据后期处理模块可以计算放大倍数, 并实时显示测量位置的中子注量的变化情况。图 1 为测量系统的框图。

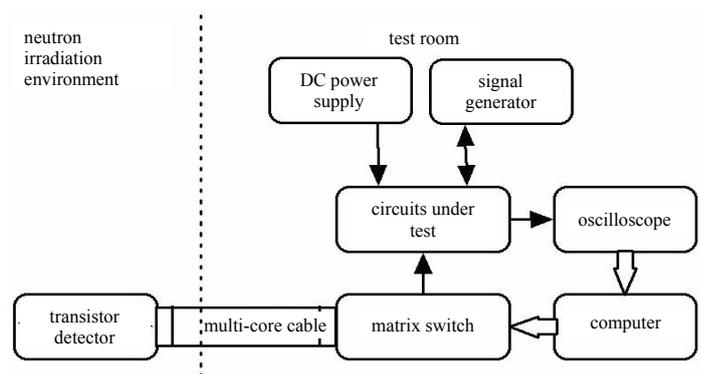


Fig.1 Diagram of neutron fluence online test system
图 1 中子注量在线测量系统框图

2.2 中子注量在线监测系统的组成

通过对上述测量过程和测量参数的分析, 组成中子注量在线监测系统的硬件包括: 计算机、安捷伦公司(Agilent)的 34980A 多功能矩阵开关单元和 33250A 任意波形发生器以及 Tek 系列示波器、直流电源和 50 芯扁平排线以及自制的测试控制转接电路、晶体管辐照测试电路。为有效地由计算机控制这些硬件设备, 采用目前广泛使用的计算机总线技术和虚拟仪器编程技术^[5-7], 使用美国 NI(National Instruments)公司的计算机扩展通用接口总

线 PCI-GPIB(Peripheral Component Interconnect General Purpose Interface Bus)控制卡、通用接口总线 GPIB(General Purpose Interface Bus)通信电缆,以实验室虚拟仪器集成环境 LabVIEW^[8-9]程序(Laboratory of Virtual Instruments Engineering Workbench)为开发平台,以虚拟仪器软件规范 VISA^[8-9](Virtual Instrumentation Software Architecture)为规范,建立起一套控制系统硬件设备的在线测量控制系统。该系统主要针对中子注量在线测量工作的实际要求,简化操作步骤,规范操作过程,实现了多样化测量功能。软件具有良好的人机交互界面和丰富的数据表现形式,能方便地实现数字示波器的配置、数据采集、波形存储和中子注量实时显示的测量功能。图 2 为测试系统的实物照片。

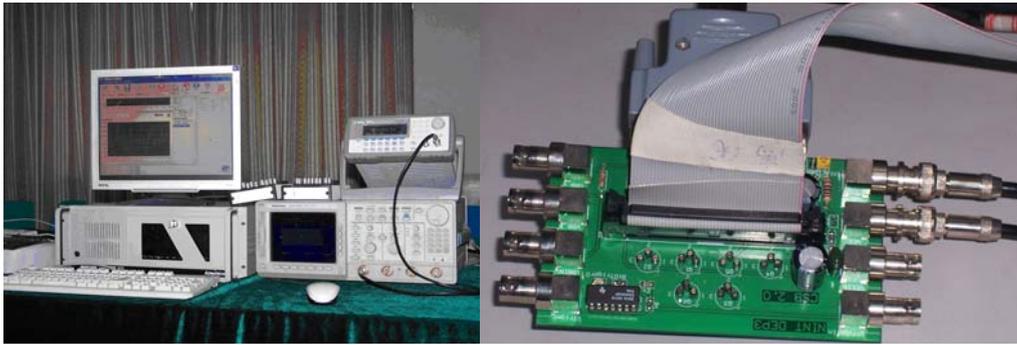


Fig.2 Test system
图 2 测试系统实物

2.3 测量系统控制程序设计

采用虚拟仪器的设计思想,由计算机控制将信号源、Tek 示波器和矩阵开关等硬件,通过 GPIB 控制器及控制电缆有效结合起来,通过 LabVIEW 开发平台,以 VISA 为规范,建立起一套控制系统。图 3 为监测系统控制程序结构图。

系统的控制软件具有良好的人机交互界面,按其功能特点划分为两大部分:仪器控制部分和中子注量在线显示部分。仪器控制部分主要完成试验中通道配置信息存储、效应参数的实时自动提取、数据的自动存储等功能,能够快速高效地完成示波器、矩阵开关单元配置、波形采集,有效地保证了在 1ms 内完成对晶体管放大倍数的实时有效测量。中子注量在线显示部分完成数据文件的读取显示、信息查询,及时的数据分析处理等功能,能够读取仪器控制部分所生成的数据文件并以图形的方式显示出来,即在屏幕上得到实时中子注量。控制软件简化了用户在实验过程中大量地操作示波器的工作,操作人员无须熟悉每种型号的示波器,也可快速完成配置。具有示波器和开关通道配置保存功能,方便了用户的使用和随时查询;其自动存盘功能可为用户提供更加详细的数据信息以及可供后期数据处理的数据文件、丰富详实的操作信息记录,还可作为实验记录本用途,记录下实验过程中的各种信息。

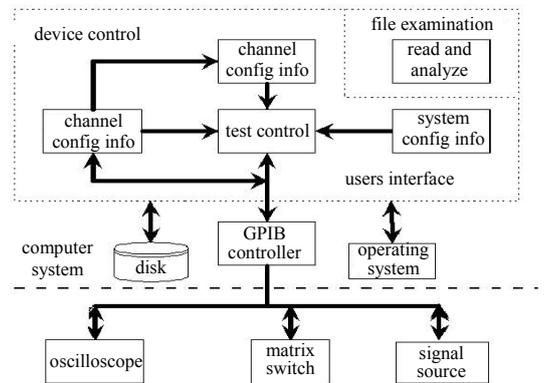


Fig.3 Flow chart of control program of monitor system
图 3 监测系统控制程序结构图

3 中子注量在线监测系统的实验研究

3.1 中子注量在线监测系统测量有效性的验证

测量系统建立后,在西安脉冲反应堆开展了实验研究工作,在中子注量为 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时,采用本系统在线测量了 2N2369 型晶体管放大倍数随中子注量的变化关系,通过与不在线移位测试的结果进行比较(见表 1),可以看出,由于测量每只晶体管的时间为 1 ms,扫描测量时

表 1 动态辐照和静态辐照两种方式获得的同类型同批次晶体管放大倍数
Table1 Gain of the identical type and batch transistors under dynamic and static irradiation

irradiation mode	device number	gain	
		pre-irradiation	after irradiation
dynamic irradiation	25#	81.8	56.3
	32#	87.5	56.2
	35#	87.8	56.6
static irradiation	21#	82.8	54.7
	34#	87.8	58.3
	38#	85.4	58.8

间与辐照时间小于 1%，采用本系统在线辐照测试和静态辐照 2 种方式获得的同类型同批次的 2N2369 型晶体管的放大倍数的变化一致，说明采用短时间间隔测量，能够在实验中得到真实的晶体管放大倍数的变化值与中子注量的关系，而不会由于退火导致测量结果不准确^[10-11]。

3.2 中子注量在线监测系统的标定

项目组设计的中子注量在线监测系统主要应用于西安脉冲反应堆环境，为此项目组在西安脉冲堆对在线监测系统开展了试验标定。标定使用的 1 MeV 等效中子注量标准数值，由西北核技术研究所九室采用多箔探测器活化法测量计算得到，不确定度为 10%^[12]。

项目组选取了 2 种常见的晶体管，2N2222A 和 2N2369，进行了反应堆中子辐射在线测量，结果见图 4。从图上可以看出 2N2222A 放大倍数倒数与中子注量间的线性关系好于 2N2369，因此选取 2N2222A 作为中子注量的在线探测器。

图 5 为 2N2222A 作为中子注量在线探测器的标定拟合曲线，从图上可以看出，该型晶体管的放大倍数的倒数与 $10^{12} \text{ cm}^{-2} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 范围内的中子注量均有良好的线性关系，符合开展中子辐射效应试验的中子注量范围要求，其中中子注量范围在 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 到 $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 间的最大相对偏差小于 15%。

在标定实验中，由于是同时对 6 只 2N2222A 晶体管进行标定，因此有一定的位置差异，同时测量顺序也会导致注量差异。由于系统测量周期为 10 s，测量顺序导致注量差异可以忽略。一般情况反应堆给出的为辐照位置中心点的等效中子注量，图 6 为以实验中心点 18#器件曲线计算得到的旁边位置 20#、23#器件位置中子注量时的偏差。由图中可以得到 23#器件位置中子注量率与 18#相比小 2.9%，20#位置中子注量率与 18#相比小 18.2%。

由于晶体管体积较小，布放方便，项目组研制的等效中子注量在线监测系统可以同时在线测量多只晶体管，因此经过精确标定的晶体管探测器在试验中实时多点监测就可以避免由于位置差异带来的误差。

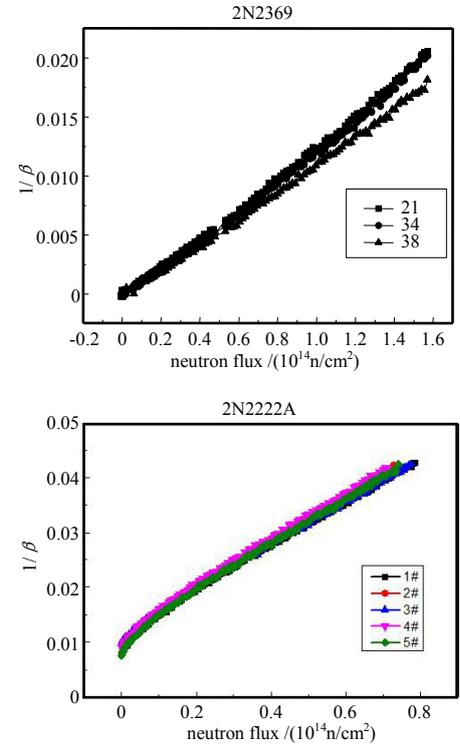


Fig.4 Neutron induced radiation effect on two kinds of transistors
图 4 两种晶体管中子效应规律

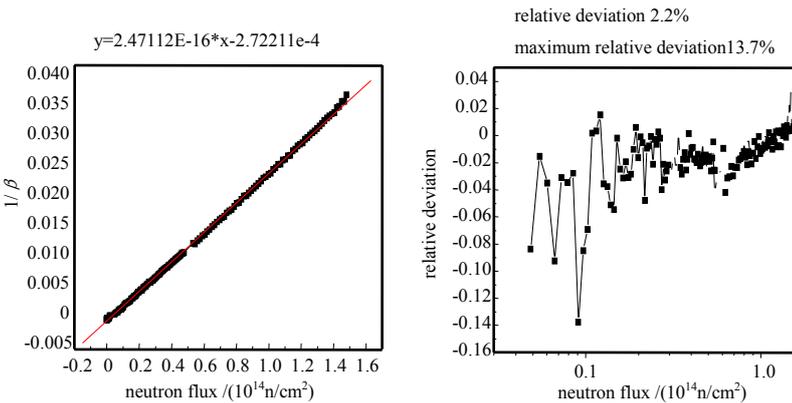


Fig.5 Demarcate curve of neutron detector 2N2222A
图 5 2N2222A 中子探测器标定曲线

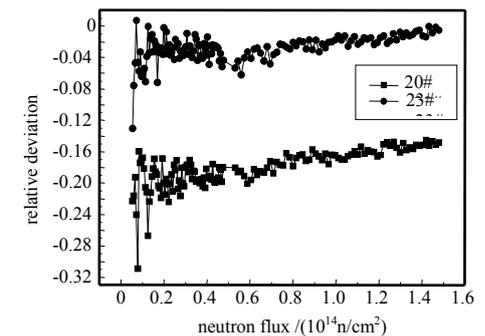


Fig.6 Deviation of neutron fluence induced by location
图 6 位置引起的中子注量偏差

3.3 中子注量在线监测系统的应用

项目组利用建立的中子注量实时在线测量系统，开展了西安脉冲堆与 CFBR-II 堆的中子位移损伤等效性试验研究工作，以 2N2222A 为试验样品，分别在 XAPR 和 CFBR-II 2 个堆进行了实验，得到了 2 个堆的损伤常数 λ 。图 7(a)为利用建立的测量系统在 XAPR 上测量得到的 15 只 2N2222A 的 $1/h_{FE}$ 随中子注量的变化关系，图 7(b)为根据公式(3)剔除异常值后 14 只三极管通过 5 个注量点的 $\Delta(1/h_{FE})$ 对损伤常数 λ 的拟合，其相关系数为 0.999 92，图 8 为在 CFBR-II 上的实验结果，图 8(a)为 15 只 2N2222A 的 $1/h_{FE}$ 随中子注量的变化关系，图 8(b)为根据公式(3)15 只三极管通过 5 个注量点的 $\Delta(1/h_{FE})$ 对损伤常数 λ 的拟合，相关系数为 0.999 91。

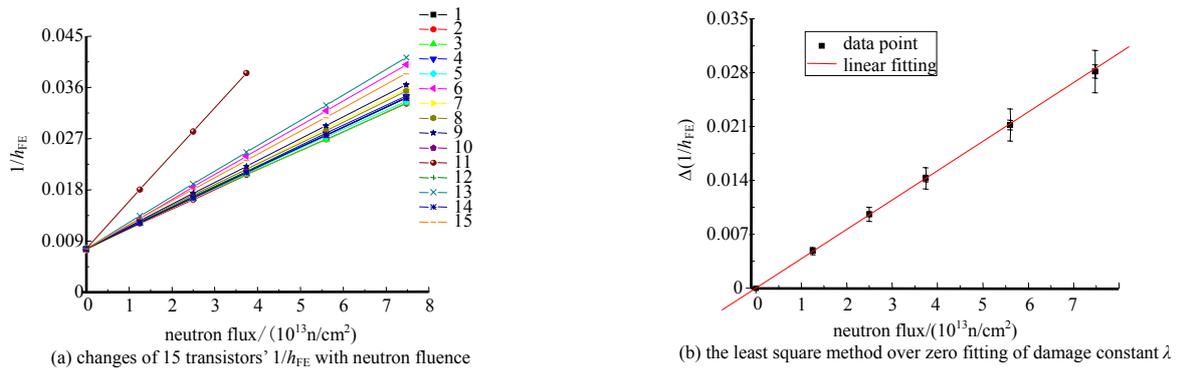


Fig.7 Experimental results of 2N2222A on XAPR
图 7 2N2222A 在 XAPR 上的实验结果

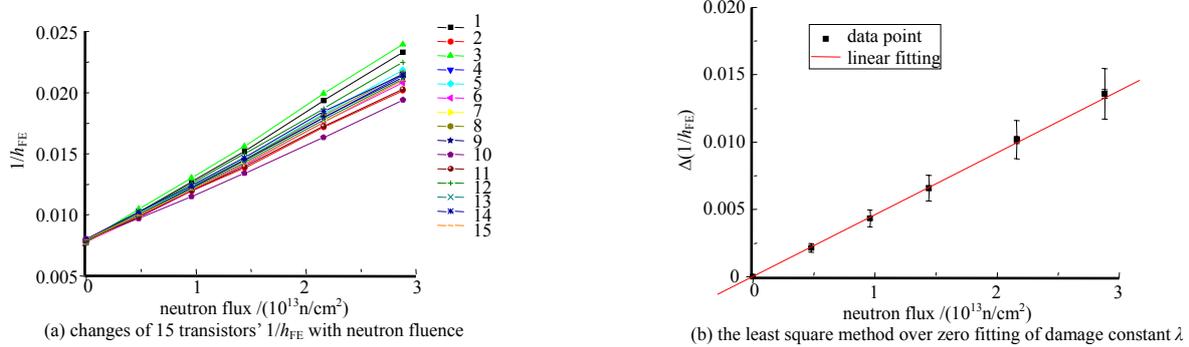


Fig.8 Experimental results of 2N2222A on CFBR-II 0°
图 8 2N2222A 在 CFBR-II 0° 方向上的实验结果

4 结论

利用晶体管放大倍数的变化倒数与中子注量为线性关系这一原理,将晶体管作为中子注量的在线探测器,使用活化法标定后,采用虚拟仪器方法建立起中子注量在线监测系统。

该监测系统通过程序高效控制,使示波器、矩阵开关、信号源、电源和测试电路快速协调工作,做到了快速响应,高效率采集,开关切换时间小于 1 ms,并实时完成数据处理、存盘。每通道测量时间小于 1 s,测量时间占整个试验测试过程比例小于 1%,保证了对晶体管放大倍数变化的准确测量,使系统能够准确、实时地显示中子注量的变化情况。

该系统采用晶体管作为探测器,体积小,布防方便,不影响辐射效应的测量,测量系统可对多只晶体管同时进行实时在线测量,因此在反应堆开展中子辐射效应试验的中子注量实时监测时,可进行多个点的同时在线监测,减小了由于中子辐射场的时间和空间分布带来的误差,同时该系统还可以开展不同中子源的等效性试验研究工作,为器件级或系统级的中子辐射效应加固及评估技术研究提供准确的中子注量数据支持。

致谢: 本工作得到了西北核技术研究所九室和中国工程物理研究院核物理与化学研究所大力支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 毕克允. 电子元器件抗辐射加固技术[R]. 2002:32-34,531. (BI Keyun. Radiation Hardness Technology of Microelectronic Device[R]. 2002:32-34,531.)
- [2] 陈盘训. 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, 2005:25-28,86-95. (CHEN Panxun. Radiation Effects and Hardening Techniques[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2005:25-28,86-95.)
- [3] Standard Test Method for Use of 2N2222A Silicon Bipolar Transistor as Neutron Spectrum Sensors and Displacement Damage Monitor[S]. ASTM E 1855-96. 1996.
- [4] Moll M, Fretwurst E, Lindström G. Leakage current of hadron irradiated silicon detectors-material dependence[J]. Nucl. Instr. and Meth., 1999, A 426:87-93.
- [5] 张海岩, 彭春荣, 刘世国, 等. 基于 Labview 的微型电场传感器自动标定系统[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(5):619-622. (ZHANG Haiyan, PENG Chunrong, LIU Shiguo, et al. Miniature electric field sensor calibration system based on Labview[J].

- Information and Electronic Engineering, 2011,9(5):619-622.)
- [6] 张荣. LabVIEW 数据库与报表的混合编程设计技术[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):476-479. (ZHANG Rong. Design of database and report hybrid programming based on LabVIEW[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4):476-479.)
- [7] 漆莲芝,谢敏,张军. VI 仿真环境下嵌入式软件测试研究与应用[J]. 信息与电子工程, 2011,9(1):101-104. (QI Lianzhi, XIE Min,ZHANG Jun. Embedded software testing under VI simulation environment and its application[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(1):101-104.)
- [8] 杨乐平. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. (YANG Leping. Advanced Program Design of LabVIEW[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2003.)
- [9] National Instruments. NI,LabVIEW User Manual[R]. National Instruments, 2003.
- [10] GJB548B-2005 微电子器件实验方法和程序[S]. 北京:[s.n.], 2005. (Test methods and procedures for microelectronic device[S]. Beijing:[s.n.], 2005.)
- [11] GJB762.1-89 半导体器件辐射加固实验方法之中子辐照实验[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 1990. (GJB762.1-89Test methods for radiation hardness of Semiconductor devices Test for neutron irradiation[S]. Beijing: China Department of Military Standard Publishing, 1990.)
- [12] 刘书焕,江新标. 西安脉冲堆辐射效应平台中子能谱、注量和 γ 剂量率及其不确定度评定[J]. 抗核加固, 2008(25):68. (LIU shuhuan,JIANG xinbiao. Uncertainty evaluation study of neutron flux, spectra and gamma dose rate on XPA radiation effect platform[J]. Radiation Harden, 2008(25):68.)

作者简介:



杨善潮(1977-),男,新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人,学士,工程师,主要研究方向为电子元器件辐射效应.email:yscaaa@yeah.net.

郭晓强(1980-),男,重庆市万州市人,硕士,副研究员,主要研究方向为电子元器件辐射效应.

白小燕(1982-),女,湖北省襄阳市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为电子元器件辐射效应.

林东生(1968-),男,福建省福州市人,硕士,副研究员,主要研究方向为电子元器件辐射效应.

马强(1985-),男,吉林省磐石市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为电子元器件辐射效应.

李斌(1979-),男,湖南省耒阳市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为电子元器件辐射效应.

李瑞宾(1981-),男,河北省邯郸市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为电子元器件辐射效应.

(上接第 588 页)

- [13] Li X, Ritcey J A. Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding[J]. IEEE Commun. Lett, 1997,1(6):169-171.

作者简介:



赵振华(1986-),男,河南省新乡市人,硕士,主要研究方向为信号与信息处理、编码调制. email:zzh19860402@126.com.

彭华(1973-),男,江西省萍乡市人,博士,教授,主要研究方向为软件无线电与通信信号处理.

朱晓瑞(1981-),女,河南省郑州市人,学士,工程师,主要研究方向为软件无线电与通信信号处理.