

# 加速器单粒子效应样品温度测控系统 研制及实验应用

蔡莉, 刘建成, 范辉, 郭刚\*, 史淑廷, 惠宁, 王惠, 王贵良, 沈东军, 何安林

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:**为满足国内半导体器件单粒子效应(SEE)截面与温度的关系研究需求,本文基于北京 HI-13 串列加速器 SEE 辐照实验终端研制了样品温度测控系统,实现了 90~450 K 范围内实验样品温度的测量和控制,系统控制精度好于 $\pm 1$  K。为验证系统可靠性,使用该系统研究了 SRAM 单粒子翻转(SEU)截面随温度的变化关系,在 215~353 K 范围内测量了 SRAM 翻转截面随温度的变化曲线。结果表明,SRAM SEU 截面随温度的升高而增加,与理论预期结果一致。

**关键词:**低温;高温;重离子;单粒子效应;单粒子翻转

**中图分类号:** O571.33      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2015)12-2261-05

**doi:** 10.7538/yzk.2015.49.12.2261

## Development and Experimental Application of Sample Temperature Measurement and Control System for Accelerator-based Single Event Effect

CAI Li, LIU Jian-cheng, FAN Hui, GUO Gang\*, SHI Shu-ting, HUI Ning,  
WANG Hui, WANG Gui-liang, SHEN Dong-jun, HE An-lin  
(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-18, Beijing 102413, China)

**Abstract:** In order to meet domestic demands of studying the relationship between temperature and single event effect (SEE) cross-section, a device under test (DUT) temperature measurement and control system was developed based on Beijing HI-13 tandem accelerator SEE irradiation facility. The DUT temperature could be measured and controlled within the range of 90-450 K, and its control accuracy is better than  $\pm 1$  K. To verify the reliability of this system, the relationship between temperature and single event upset (SEU) cross-section was investigated in 150 nm thin film transistor (TFT) technology SRAM in the temperature range of 215-353 K. The results show that the SEU cross-section increases with temperature, and it is consistent with the theoretical expected result.

收稿日期:2014-10-31;修回日期:2014-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11405275)

作者简介:蔡莉(1983—),女,甘肃兰州人,助理研究员,硕士,核技术及应用专业

\*通信作者:郭刚, E-mail: ggg@ciae.ac.cn

**Key words:** low temperature; elevated-temperature; heavy ion; single event effect; single event upset

空间辐射环境中存在大量高能粒子,可引起半导体器件(特别是存储器)发生单粒子效应(SEE),严重影响航天器的可靠性和寿命。同时,空间中存在极端温度环境,如月球阳光直射温度可达400 K,夜晚温度则低至90 K。嫦娥三号巡视器玉兔号在月球上即面临极端温度环境的挑战。在未来的深空探测中,类似的极端温度环境更为常见。在如此宽的温度范围内,必须考虑温度对星载半导体器件单粒子效应的影响。

控制器件电学性能(漂移、扩散、双极效应等)的许多参数均是温度的强函数,因此,器件的单粒子效应必然受温度影响。研究显示,温度对半导体器件的单粒子翻转(SEU)及单粒子门锁(SEL)均存在影响<sup>[1-4]</sup>。许多重离子实验和 TCAD 模拟结果均显示单粒子瞬态脉冲宽度随温度的升高而显著增加<sup>[5-11]</sup>,测得的瞬态脉冲数也随温度的升高而增加。130 nm CMOS 工艺器件电荷共享的 TCAD 模拟结果显示,在200~420 K 温度范围内,电荷共享收集随温度的升高而增加<sup>[12]</sup>。温度对宇航用半导体器件单粒子效应的影响是单粒子效应研究领域的重要课题之一,但目前国内由于缺乏与单粒子效应实验配套的温度控制和测量设备,绝大多数单粒子效应实验均在室温下进行。

本文基于北京 HI-13 串列加速器单粒子效应专用实验终端,研制适用于单粒子效应研究的样品温度测控系统,以实现90~450 K 范围内样品温度可测控,系统控制精度好于±1 K,并使用该系统开展 SRAM 翻转截面随温度变化的研究,拟得到 SRAM 翻转截面随温度变化的曲线。

## 1 样品温度测控系统研制

样品温度测控系统应用于真空、辐射环境下,使待测器件(DUT)处于某一稳定温度,且样品温度可测控。在高于室温和低于室温时需采用不同方式实现温度测控,因此将系统分为低温(90~300 K)和高温(300~450 K)两个温度段分别研制。

### 1.1 高温测控系统研制

高温测控系统主要由电阻加热器、红外测温仪、PID控制器和继电器等组成,图1为高温测控系统框图。电阻加热器固定在待测芯片背部,通过热传导加热芯片,采用红外测温仪直接测量芯片表面温度,将测得的样品表面温度转换为电流或电压信号反馈给PID控制器,PID控制器根据设定值调节输出,发出开关信号控制继电器通断从而控制电阻加热器工作状态,使器件保持在设定温度。

温度对象的特点是时间常数大、滞后现象严重,反映在控制系统上,就是被控温度的变化滞后于调节器的输出。温度上升的快慢与其热容量有关,通常温度上升和下降与时间的关系是一指数曲线关系。因此须采取一定措施克服滞后现象。同时由于本系统应用于真空环境,真空下对流效应很弱,故保温效果较好,因此要求系统超调量尽可能小。

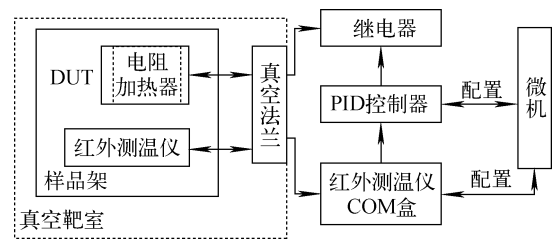


图1 高温测控系统框图

Fig. 1 Block diagram of elevated-temperature measurement and control system

### 1.2 低温测控系统研制

低温测控系统采用液氮作为制冷剂,系统主要由自增压液氮杜瓦、Lakeshore340 温控仪、液氮传输管道、电阻加热器、硅二极管温度计等组成。图2为低温测控系统框图。其工作原理为:液氮从自增压式液氮杜瓦流出,从液氮管道经真空法兰流入靶室内无氧铜样品座,冷却样品座上的器件,使用硅二极管温度计测量样品座处温度,将测得的温度反馈给 Lakeshore340 温控仪,当温度降到设定温度时,由于管道的导热、液氮的流动等因素,样品座处温

度继续降低,温控仪驱动电阻加热器进行温度补偿,使样品座温度稳定在设定温度。为提高系统控制精度,需使液氮杜瓦内压强保持在一较稳定的水平,但随杜瓦内液氮的挥发,压强会降低。因此,采用氮气瓶配合减压阀为液氮杜瓦内充气保持压强稳定。

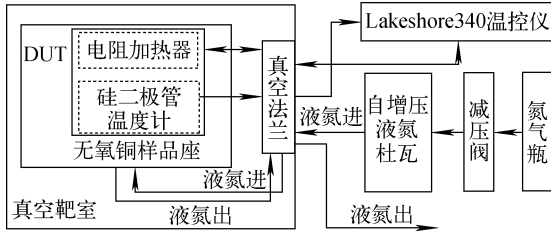


图 2 低温测控系统框图

Fig. 2 Block diagram of low temperature measurement and control system

## 2 系统性能测试

### 2.1 高温测控系统性能测试

对系统真空下性能进行反复测试,具体测量结果列于表 1。从表 1 可看出,系统控制精度好于 $\pm 1$  K。

表 1 300~450 K 样品温度测控系统控制结果

Table 1 Control results of 300-450 K DUT temperature measurement and control system

设定温度/K	最高温度/K	最低温度/K	标准偏差/K
313	313.5	312.7	0.11
333	333.1	332.6	0.09
353	353.6	352.8	0.10
393	393.5	392.6	0.09
423	423.9	422.1	0.13

图 3 为设定值为 393 K(120 °C)、真空下持续测量 40 min 多的系统记录的测量结果。从图 3 可看出,系统达稳定后,控制温度的极差(测得的最高温度和最低温度与设定值之间的差值)小于 $\pm 1$  K,标准偏差约为 $\pm 0.1$  K,且可长时间保持稳定,完全满足单粒子效应实现要求(每个器件测量时间通常为几 min 到 30 min)。图 4 为系统升温极限温度测试结果,从图可看出,系统可达的极限温度约为 450 K(177 °C)。

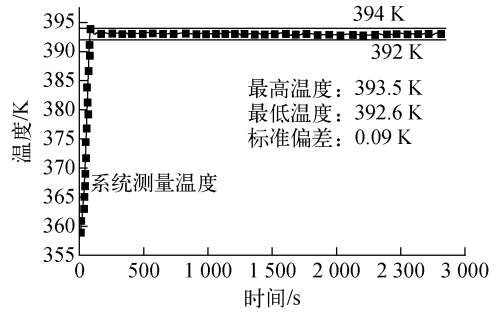


图 3 高温测控系统测控结果

Fig. 3 Control results of elevated-temperature measurement and control system

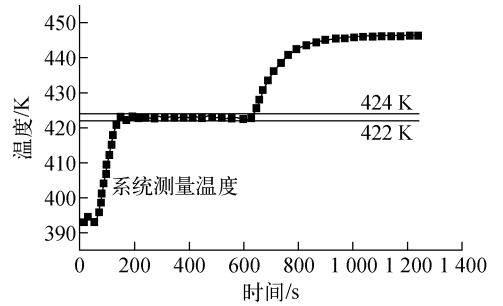


图 4 极限温度测量结果

Fig. 4 Limited high temperature measurement result

### 2.2 低温系统性能测试

对真空下低温测控系统控制精度进行多次测量,每设定一温度,系统达稳定后观察 20 min,随机记录 30 个温度点,具体测量结果列于表 2。从表 2 可看出,系统控制精度好于 $\pm 1$  K。经测量,系统可达极限温度约为 88 K。图 5 为低温测控系统测量曲线。

表 2 90~300 K 样品温度测控系统控制结果

Table 2 Control results of 90-300 K DUT temperature measurement and control system

设定温度/K	最高温度/K	最低温度/K	标准偏差/K
100	100.12	99.92	0.03
150	150.06	149.94	0.02
200	200.06	199.95	0.02
250	250.06	249.95	0.02

红外测温仪具有非接触测量的优点,可直接测量芯片表面温度,但低温通常只能测到

213 K(-60 °C)或 233 K(-40 °C),无法满足低温测控系统的测量要求,本系统只能使用硅二极管或铂电阻温度计进行测量。现代工艺芯片尺寸不断减小,很难将温度计贴在芯片表面,本实验中将温度计固定在无氧铜样品座上,因此实验前使用两只硅二极管温度计测量样品座处与芯片表面处的温差。

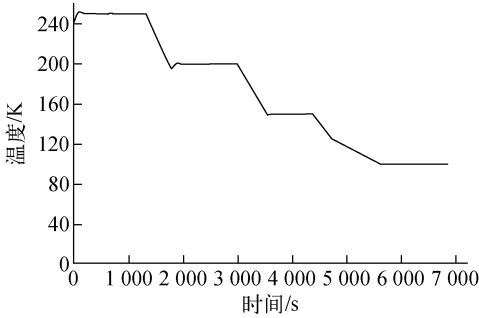


图5 低温测控系统温度测量曲线

Fig.5 Measurement curve

of low temperature measurement and control system

两只硅二极管温度计 A、B,温度计 A 经校准,温度计 B 未经校准。选取塑料封装和陶瓷封装的芯片,芯片表面经开帽处理,将温度计 B 固定在芯片表面,温度计 A 固定在无氧铜样品座靠近电阻加热器的位置。温度计 A 的测量结果作为系统控制的温度反馈,测量两个温度计之间的温差。塑料封装芯片表面与样品座处温差列于表 3,陶瓷封装芯片表面与样品座处温差列于表 4。

表3 不同设定温度下

塑料封装芯片表面与样品座温差

Table 3 Temperature difference between plastic package chip surface and sample holder at different set temperatures

温度 设定值/K	温度计 A 温度/K	温度计 B 温度/K	温度计 A、 B 温差/K
室温	298.61	297.76	0.85
273	273.32	273.33	-0.01
250	249.91	250.40	-0.49
220	220.02	221.68	-1.66
200	200.04	201.63	-1.59
180	180.52	182.22	-1.70
140	139.24	154.66	-15.42

表4 不同设定温度下

陶瓷封装芯片表面与样品座温差

Table 4 Temperature difference between ceramic package chip surface and sample holder at different set temperatures

温度 设定值/K	温度计 A 温度/K	温度计 B 温度/K	温度计 A、 B 温差/K
室温	298.55	297.73	0.82
273	273.06	273.64	-0.58
250	249.81	251.50	-1.69
220	220.00	223.15	-3.15
200	200.16	203.11	-2.95
180	179.54	185.30	-5.76
140	139.24	166.05	-26.6

从表 3、4 可看出,对于塑料封装的芯片,设定温度高于 180 K 时,芯片表面与样品座处的温差小于 3 K,从单粒子翻转实验结果可看出,温度变化 3 K 时,芯片的单粒子翻转截面变化不大。对于陶瓷封装的芯片,芯片表面与样品座的温差较大,180 K 时温差达 6.58 K。当温度降至 140 K 时,两种封装芯片表面与样品座处的温差均急剧增大。

### 3 温度测控系统实验应用

选取 4M 150 nm CMOS TFT(thin film transistor)工艺 SRAM 作为待测芯片,在北京 HI-13 串列加速器上开展不同温度下 SRAM 宽束辐照实验,测量 SRAM 单粒子翻转截面随温度的变化。实验选取 157 MeV Cl 离子辐照芯片,芯片在实验前经开帽处理,离子垂直入射,实验时芯片写入 AA,相同条件下测量 2、3 次,实验结果取平均值。为取得理想的统计结果,当累积错误数大于 100 或离子总注量达  $10^7 \text{ cm}^{-2}$  时停止实验。

实验结果如图 6 所示。从图 6 可看出,随着温度的升高,单粒子翻转截面增大,且可看出截面的变化明显超出实验误差。温度从 215 K 增加到 353 K,每个器件的截面从  $1.21 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  增加到  $4.32 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ,增加了 2.57 倍。

由于该 SRAM 为薄膜晶体管结构,不考虑双极放大效应带来的影响,温度对 SRAM SEU

截面的影响主要是器件电学性能随温度的变化导致的。Truyen 等<sup>[2]</sup>指出,SRAM 发生翻转的翻转电压随温度的升高而降低,变化约为  $-0.2 \text{ mV/K}$ ,SRAM 的 SEU 敏感性随温度的升高而增加,这导致器件的 SEU 截面随温度的升高而增加。本实验结果与国外已发表的理论研究结果一致。

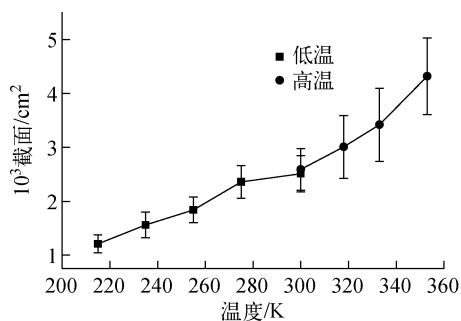


图6 157 MeV Cl 离子入射  
SRAM SEU 截面随温度的变化

Fig. 6 SRAM SEU cross-section at different temperatures for 157 MeV Cl ion incidence

#### 4 小结

本文研究了真空辐照环境下样品高、低温测控方法,特别是低温(90~300 K)的实现技术,成功建立了适用于单粒子效应实验研究的样品温度测控系统,实现了90~450 K范围内测温控温,系统温度控制精度好于 $\pm 1 \text{ K}$ 。应用该系统开展了不同温度下SRAM 宽束辐照实验研究,测量了SRAM SEU 截面随温度的变化关系,实验结果与理论预期结果一致。

#### 参考文献:

[1] KOLASINSKI W A, KOGA R, SCHNAUSS E, et al. The effect of elevated temperature on latchup and bit errors in CMOS devices[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1986, 33: 1 605-1 609.

[2] TRUYEN D, BOCH J, SAGNES B, et al. Temperature effect on heavy-ion induced parasitic current on SRAM by device simulation; Effect on SEU sensitivity[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2007, 54: 1 025-1 029.

[3] COOPER M S, RETZLER J P. High temperature Schottky TTL latchup[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1978, 25: 1 538-1 544.

[4] STAPOR W J, JOHNSON R L, XAPSOS M A, et al. Single event upset dependence on temperature on an NMOS/resistive-load static RAM[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1986, 33: 1 610-1 615.

[5] MATTHEW J G, JONATHAN R A, BALAJI N, et al. Single-event transient measurements in nMOS and pMOS transistors in a 65 nm bulk CMOS technology at elevated temperatures[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2011, 11: 179-186.

[6] LARID J S, HIRAO T, ONODA S, et al. Temperature dependency of heavy ion induced current transients in Si epilayer devices[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49: 1 389-1 395.

[7] GUO G, HIRAO T, LARID J S, et al. Temperature dependency of single event transient current by heavy ion microbeam on p+/n/n+ epilayer junctions[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2004, 51: 2 834-2 839.

[8] TRUYEN D, BOCH J, SAGNESS B, et al. Temperature effect on heavy-ion-induced single-event transient propagation in CMOS bulk 0.18  $\mu\text{m}$  inverter chain[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2008, 55: 2 001-2 006.

[9] MATTHEW J G, JONATHAN R A, VISHWANATH R, et al. Temperature dependence of digital single-event transients in bulk and fully-depleted SOI technologies[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2009, 56: 3 115-3 121.

[10] MATTHEW J G, JONATHAN R A, BALAJI N, et al. Increased single-event transient pulse-widths in a 90 nm bulk CMOS technology operating at elevated temperatures[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2010, 10: 157-163.

[11] CHEN S, LIANG B, LIU B, et al. Temperature dependency of digital SET pulse width in bulk and SOI technologies[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2007, 54: 889-893.

[12] LIU B, CHEN S, LIANG B, et al. Temperature dependency of charge sharing and MBU sensitivity in 130 nm CMOS technology[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2009, 56: 2 473-2 479.