

文章编号: 1000-7032(2019)06-0815-11

飞秒脉冲激光辐照 FRAM 诱发的毁伤效应及热演化

乔相信, 成艺光, 唐恩凌*, 韩雅菲

(沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 空间高能粒子辐照航天器电子器件诱发的毁伤和热演化特征, 直接关系到航天器的在轨安全运行和在轨任务的顺利实施。本文利用自行构建的飞秒脉冲激光辐照系统、激光诱发毁伤的数据采集系统、数据读写系统和红外热成像系统, 开展了不同激光输出重复频率、不同作用区域下辐照铁电存储器 (FRAM) 实验, 获取激光辐照于铁电存储器被照面的稳态温度场和铁电存储器的暂态失效和永久失效出现时间, 并观测了辐射效应对铁电存储器的毁伤效果, 经 MATLAB 软件处理得到了激光辐照铁电存储器不同区域热演化过程的温度场分布。实验结果表明: 在激光输出功率近似相同的飞秒脉冲激光辐照条件下, 激光脉冲输出重复频率越低, 诱发永久性毁伤出现时刻的时间越长, 近似呈非线性增长; 随着激光输出重复频率的增大, 激光对铁电存储器的作用由激光电离存储器介质产生的高能带电粒子对铁电体自发极化的破坏为主, 逐步转变为以热辐射与热应力诱发的毁伤; 当激光在器件表面产生的最高温度接近存储器最高工作温度时, 永久毁伤的出现时间将显著延长。并通过对回归参数的计算和假设检验, 给出了回归参数的置信度 $1 - \alpha$ 为 95% 的条件下激光辐照区域 1 与区域 2 的最高辐射温度与激光输出重复频率的拟合关系式。

关键词: 飞秒脉冲激光; 毁伤效应; 铁电存储器 (FRAM); 温度场分布

中图分类号: O432.1⁺2 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20194006.0815

Damage Effects and Thermal Evolution of FRAM Irradiated by Femtosecond Pulsed Laser

QIAO Xiang-xin, CHENG Yi-guang, TANG En-ling*, HAN Ya-fei

(School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

* Corresponding Author, E-mail: tangenling@126.com

Abstract: Damage effects and thermal evolution characteristics induced by space high-energy particles to spacecraft electronic devices are directly related to the safe operation of spacecraft and on-orbit tasks. In this paper, self-constructed femtosecond pulsed laser irradiation system, laser induced damage effect data acquisition system, data write-read system and infrared thermal imaging system were used to carry out different laser output frequencies and different areas of irradiated ferromagnetic random access memory (FRAM). Under the conditions, experiments were carried out to obtain the steady-state temperature field of the irradiated surface of the FRAM and the time of transient failure and permanent failure of the FRAM, and damage effect and thermal evolution on the FRAM were observed. The data were processed by MATLAB software. The temperature distribution of the thermal evolution process in different areas of the laser irradiated FRAM was obtained. The results show that the laser pulse output power is approximately the same under the conditions of femtosecond pulsed laser

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2018-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(11472178;11802182); 辽宁省“百千万人才工程”培养经费资助项目(2012921044); 辽宁省高校优秀人才支持计划(LR2013008)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(11472178;11802182); Liaoning Province “Millions of Talents Project” Training Funds Subsidy Project(2012921044); Liaoning Province University Excellent Talents Support Program Subsidy Project(LR2013008)

irradiation, the lower the laser pulse output frequency, the longer the moment of permanent damage induced, the longer the nonlinear growth; with the laser output frequency increasing, the effect of the laser on the FRAM, induced by the high-energy charged particles generated by the laser ionization memory medium mainly destroys the spontaneous polarization of the ferroelectrics, and gradually transforms into the damage induced by thermal radiation and thermal stress. When the maximum temperature produced by the laser on the surface of the device is close to the highest working temperature of the memory, the time of permanent damage will be significantly prolonged. Through the calculation of the regression parameters and the hypothesis test, the fitting relationship between the maximum radiation temperature and the laser output frequency of laser irradiation area 1 and area 2 is given, under the condition that the confidence degree $1 - \alpha$ is 95%.

Key words: femtosecond pulsed laser; damage effect; ferromagnetic random access memory (FRAM); temperature field distribution

1 引 言

目前,空间辐射效应及其衍生问题严重影响航天器的在轨安全运行,单粒子效应(SEE)已成为空间高能粒子辐射下电子设备故障的主要原因,而激光辐射的热效应及其带来的热演化问题是单粒子效应中的关键问题^[1-2]。目前,铁电存储器的信息存储单元已加工至深微米尺度,在空间电离辐射环境下铁电存储器表现出易受电荷和温度改变的敏感特性的影响^[3-4]。2008年,Zanata等^[5]对Ramtron公司的铁电存储器FM18L08进行了X射线作用下的总剂量效应研究,结果表明,在X射线辐照试验中,当对上电条件下的芯片进行辐照时,在280 krad(Si)时该存储器的功能出现了错误;2010年,NASA在发射的FASTSAT卫星上搭载了Ramtron公司的512 kbit铁电存储器FM24C512,开展了通用铁电存储器在近地轨道的可靠性和耐辐照性能研究^[5]。国内关于铁电存储器辐照效应研究起步较晚,多数研究主要围绕器件辐射效应和铁电薄膜电容的辐照效应展开^[5-11],针对铁电器件的辐照效应及热演化研究的文献较少。张兴尧等^[8-9]曾开展了针对FM24V10型铁电存储器的总剂量效应和退火试验研究,结

果表明,芯片在辐照剂量为180 krad(Si)时发生读写功能失效,常温退火10 min可使芯片读写功能恢复^[9]。但由于热演化过程带来的单粒子效应分析与温度特征记录较为少见,本文拟采用具有较强耐辐照性能的铁电存储器作为辐照对象^[12],利用相同输出功率、不同分频的飞秒脉冲激光模拟空间高能粒子辐射电子器件,利用红外热像仪记录器件表面的二维温度场,获得了飞秒脉冲激光辐照铁电存储器诱发的单粒子效应和热演化特征,为航天器及星载电子设备的辐射防护和激光毁伤效应研究提供数据支撑。

2 激光加载及测试系统

2.1 激光器系统

实验在沈阳理工大学强动载研究中心完成。该中心具有法国Amplitude公司生产的TRIDENT·M型飞秒脉冲激光器,该激光器可输出重复频率为10~1 000 Hz、脉冲持续时间为100 fs、平均功率为3.5 W的飞秒脉冲激光;同时,可通过分频器对输出激光进行最大100分频的调节,满足实验的分频需求。以满功率3.5 W运行时,激光焦斑的峰值功率密度为446 TW/cm²,实验室环境下输出能量的稳定度为5%,输出激光由两块平面

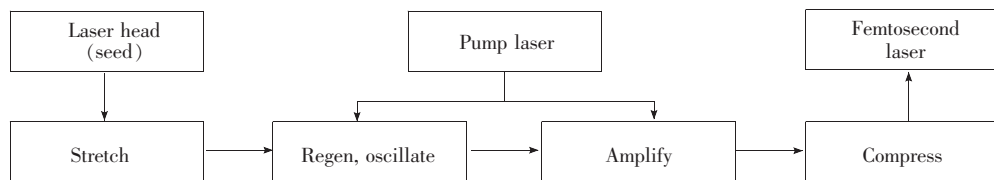


图1 飞秒脉冲激光器的原理框图

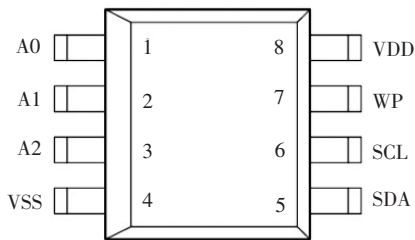
Fig. 1 Block diagram of femtosecond pulsed laser

镜反射至光学平台中线上, 焦距为 100 mm 的凸透镜为其聚焦。图 1 为飞秒脉冲激光器的原理框图。

利用以色列 OPHIR 公司生产的 Vega 型功率计对激光器的输出功率进行标定与测量; 光斑几何尺寸通过 CCD 光斑分析仪调节, 同时焦斑位置通过四自由度位移平台与 CCD 分析仪确定。实验中, 激光辐照启动时间通过主控 MCU 控制的舵机快门实现, 并在上位机的串口监视器上完成计时功能, 舵机快门产生的误差小于 1 ms。焊接和固定铁电存储器的玻璃纤维板由四自由度位移平台结合夹具固定, 激光经聚焦使焦斑平面作用在铁电存储器上, 焦斑直径通过光斑分析仪测量获取, 焦斑直径约为 100 μm。温度场的测量通过美国 FLIR 公司生产的 SC7700BB 型红外热像仪实现, 该红外热像仪的波长范围为 1.5 ~ 5.1 μm, 红外测温范围不大于 2 500 K, 红外热像仪采集图像数据的更新频率为 25 Hz。

2.2 铁电存储器

实验所采用的的铁电存储器为美国 RAMTRON 公司生产的 FM24CL64B_G 型非易失性铁电存储器, 具有 8 个引脚, 封装类型为 SOIC, 工作电压介于 2.7 ~ 3.6 V 之间。该型 FRAM 铁电存储器的存储容量为 64 kbit, 以高速串行 IIC 总线进行半双工读写, 其中 SDA 与 SDL 分别为 IIC 总线的数据线与时钟线, 具备 8 192 个字节地址, 具备支持 100 kHz & 400 kHz 频率总线通信的能力, 工作温度为 -40 ~ 85 °C。图 2 为铁电存储器 FM24CL64B_G 的引脚分布示意图。



1. A0-A2 为设备地址; 2. SDA 为数据线; 3. SCL 为时钟;
4. WP 为写保护; 5. VSS 为地线; 6. VDD 为电源

图 2 铁电存储器 FM24CL64B 的引脚分布示意图

Fig. 2 Pinout of FM24CL64B

2.3 存储器数据读写系统

读写铁电存储器 FRAM 的主控 MCU 采用美国 ATMEL 公司生产的 AVR 系列的 Atmega328 型

单片机, AVR 系列单片机采用精简指令集 (RISC), 片内所有指令运行周期相同, 采用流水线结构编译, 具有效率高特点。主频最高可达 20 MHz, 具备主/从 SPI 串行接口和 IIC 二线串行总线接口, 完全胜任铁电存储器的读写工作, 读写系统采用 Atmel Studio 集成开发环境。铁电存储器通过 IIC 总线与 MCU 进行通信, MCU 通过 USB 转串行接口模块与计算机上位机相连, 将读写数据实时反馈到上位机显示出来。通过编程设置, 存储器存储的 8 位二进制数据以每秒 10 次的速度进行刷新并显示于上位机。图 3 为铁电存储器读写系统原理框图。

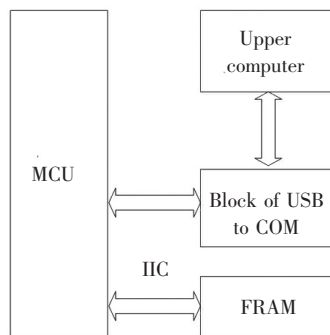


图 3 铁电存储器读写系统原理框图

Fig. 3 FRAM write and read system block diagram

3 辐照实验

利用飞秒脉冲激光辐照模拟空间高能粒子辐射环境诱发铁电存储器的单粒子效应、电输出特性及激光辐照区的热演化, 开展了脉冲激光重复频率分别为 1 000, 500, 333, 200, 100, 50 Hz 下垂直辐照铁电存储器诱发单粒子效应的实验测量; 并利用红外热像仪对铁电存储器辐照面的温度场进行了实时测量。在实验中, 将每两个存储器设为一组, 对 1 000 Hz 的脉冲激光源进行分频, 在 6 种重复频率的输出激光下分别进行辐照, 实验前对每一个铁电存储器以相同的程序写入数据, 实验分成 6 组, 共进行 12 次。

写数据时, 器件地址设为 000, 采用单字节写入 (Single byte write) 的方式将数据存储于铁电存储器中, 高有效字节地址取 0x01, 低有效字节地址取 0x10, 数据字节取 0x95, 与上位机交互时串行接口的波特率采用 115 200 Bd。在实验中进行数据读取时, 采用二进制格式输出, 并采用一个读周期结束延时 100 ms 的方法, 达到每秒 10 次实

时测试存储器中数据的变化情况,并通过判断语句来检测数据字节的错误。

实验开始时,由上位机打开串口监视器的同时,串口变量发生变化,控制单片机打开舵机控制的激光快门,使激光垂直辐照于铁电存储器上,舵机快门产生的时间误差已做处理。通过改变脉冲激光的输出重复频率与功率密度、调整光斑直径等,记录首次出现暂态毁伤的时刻、无数据输出的时刻、永久毁伤的时刻以及无错误累积时间等典型时间点,在铁电存储器出现永久性毁伤时,结束实验。

飞秒脉冲激光器以不同的辐照能量作用于待测铁电存储器,红外热像仪经过在实验环境下校正后,置于铁电存储器受辐照表面前方与法线方向夹角为 30° ,用于采集半导体器件正面的辐照温度,单片机数据读写系统用于判断铁电存储器的读写功能是否出现异常,当读写功能出现异常时,将异常信号传输到数据采集分析系统并对不同的毁伤类型进行归类记录。图 4 为实验测试系统布局示意图。

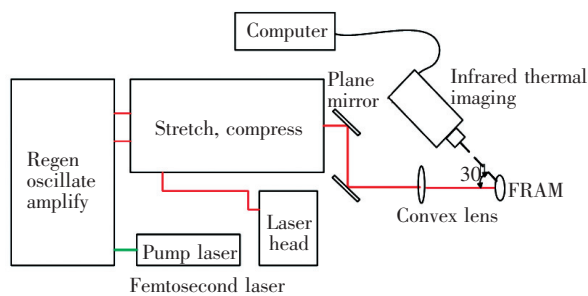


图 4 测试系统布局示意图

Fig. 4 Test system layout diagram

4 实验结果及分析

4.1 500 Hz 激光输出重复频率下的毁伤效应与热演化

图 5 为脉冲激光辐照铁电存储器的辐照区域。其中,红颜色圈定范围为激光辐照区域。

以脉冲激光输出重复频率为 500 Hz 时所采集的实验数据作为典型,分析其辐照温度场。在脉冲激光辐照区域 1 时,高能量密度的激光将以非线性热传导的方式作用于铁电存储器的表面,热通量大致呈正态分布,中心温度场在 0.4 s 内达到温度平缓区。随着实验的进行,单片机以每

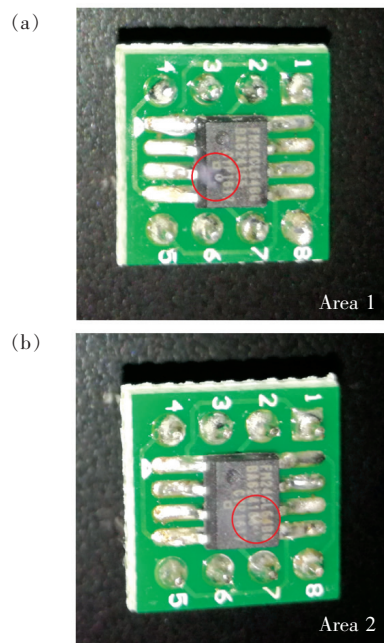


图 5 脉冲激光辐照铁电存储器的辐照区域。(a) 辐照区域 1; (b) 辐照区域 2。

Fig. 5 Irradiation areas of FRAM irradiated by pulsed laser. (a) Irradiation area 1. (b) Irradiation area 2.

秒 10 次的频率对铁电存储器进行单字节读操作,在 0.61 s 时,上位机的串口数据监视器出现了第一次存储数据失真。

随着实验的持续进行,辐照时间为 1.71 s 时,铁电存储器的读出数据出现了持续性的错误,并在 5 个单字节读周期后,串口监视器停止刷新,此后经脉冲激光继续辐照 5 s 后,确认该铁电存储器试件出现了永久性毁伤。

实验中对铁电存储器首次出现错误和永久毁伤出现时刻的串口监视器分别截图。图 6 为 500 Hz 的脉冲激光辐照区域 1 过程中实验首次出现错误与永久毁伤出现时刻串口监视器的截图。

根据首次暂态毁伤时刻串口数据,发生的数据错误并没有持续进行,并且在一次产生错误的读周期后数据维持正常,所以可将该错误归结为单粒子扰动 (Single event disturb, SED)^[13-15],由辐射效应诱导的单粒子效应与热效应同时作用产生,存储单元的逻辑状态发生瞬时改变,并在下一个读周期恢复正常,实际应用中也可通过对存储器重新上电复位恢复。在 1.71 s 时刻,存储器数据出现第二次错误,可以初步判定为单个位硬错误 (Single hard error, SHE) 或单粒子功能中断 (Single event function interrupt, SEFI)^[13-15],由于本

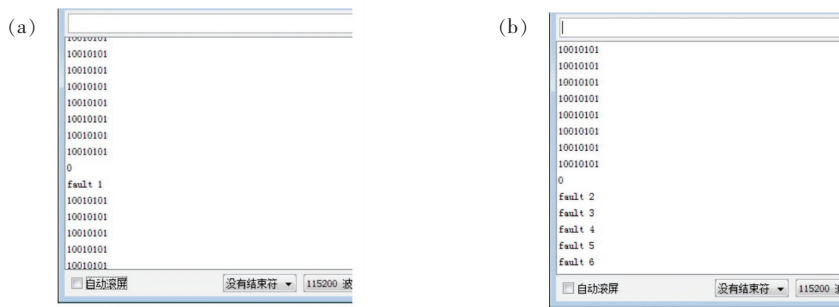


图 6 脉冲激光以 500 Hz 的输出重复频率辐照区域 1 时 FRAM 首次错误与永久毁伤出现时刻串口监视器的截图。(a) 首次错误;(b)永久毁伤。

Fig. 6 Screenshot of the serial port monitor at the time of the first error and permanent damage of the FRAM when the pulsed laser is irradiated with the output recurrence frequency of 500 Hz. (a) First error. (b) Permanent damage.

文实验没有采用带电粒子源作为单粒子效应的诱发载体,仅通过飞秒脉冲激光源的辐射效应作用于试件,所以作用 FRAM 的物理量以激光的热效应与热应力为主,故下文主要采用温度场数据来

量化辐射效应的作用。

在 500 Hz 脉冲激光辐照下,对红外热像仪镜头表面建立直角坐标系,分别截取两次实验中首次出现暂态毁伤时刻温度场的二维数据,通过

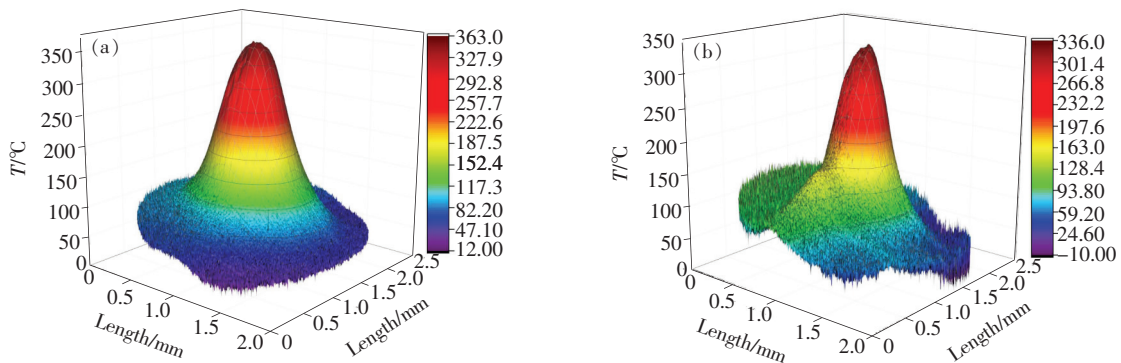


图 7 脉冲激光以 500 Hz 的输出重复频率分别辐照区域 1 和区域 2 时首次出现暂态毁伤时刻的三维温度场分布图。(a)辐照区域 1;(b)辐照区域 2。

Fig. 7 Distribution image of three-dimensional temperature field at the instant of transient damage when the pulsed laser is irradiated with the output recurrence frequency of 500 Hz for the first and second regions respectively. (a) Irradiation area 1. (b) Irradiation area 2.

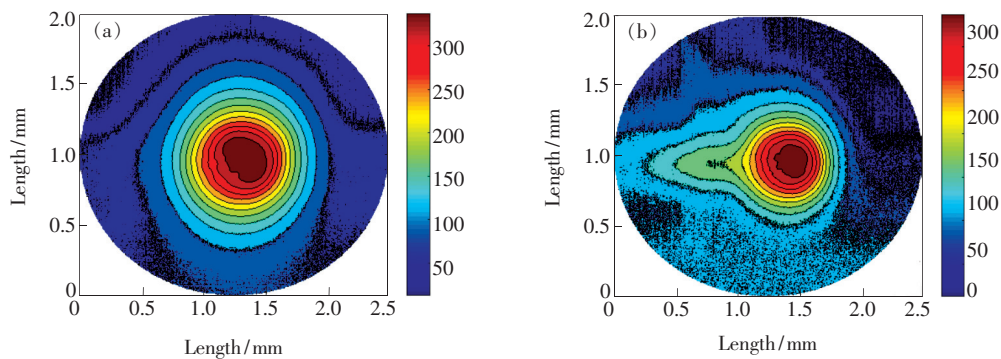


图 8 脉冲激光以 500 Hz 的输出重复频率分别辐照区域 1 和区域 2 过程中首次出现暂态毁伤时刻的二维温度场的等温线图。(a)辐照区域 1;(b)辐照区域 2。

Fig. 8 Isotherm plot of the two-dimensional temperature field at the instant of transient damage when the pulsed laser is irradiated with the output recurrence frequency of 500 Hz for the area 1 and area 2 respectively. (a) Irradiation area 1. (b) Irradiation area 2.

MATLAB 与 Origin 处理,绘制出三维温度场的分布与二维温度场的等温线图。图 7 为脉冲激光分别辐照区域 1 和区域 2 过程中首次出现暂态毁伤时刻的三维温度场分布图。

图 8 为脉冲激光分别辐照区域 1 和区域 2 过程中首次出现暂态毁伤时刻的二维温度场等温线图。

基于实验观察和实验数据处理,可知铁电存储器的表面温度场的红外温度基本呈正态分布。由图 7 和图 8 可以直观地看出温度的分布,由于铁电存储器结构的原因出现了辐照区域 2 实验中所示的高温区延伸,该物理过程可通过 $T = f(x, y, t)$ 进行描述^[16],某一时刻的温度梯度可基于实验数据通过 $\text{grad } f = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y}$ 梯度关系式进行计算。在首次暂态毁伤出现的时刻,记录区域 1 与区域 2 的最高温度 363 °C 与 336 °C 的水平方向与垂直方向的温度分布,并绘制出两者在两个方向的温度分布对比图,如图 9 所示。

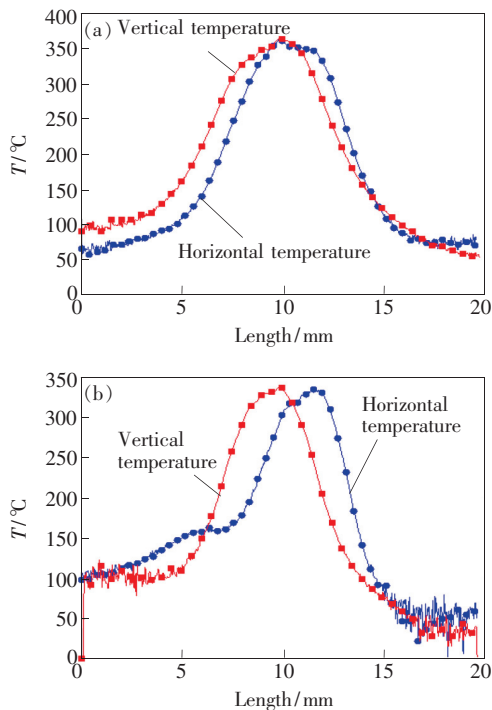


图 9 脉冲激光以 500 Hz 的输出重复频率分别辐照区域 1 和区域 2 过程中首次出现暂态毁伤时刻最高温度点的水平与垂直分布。(a)辐照区域 1;(b)辐照区域 2。

Fig. 9 Horizontal and vertical distribution of the highest temperature point of transient damage moment when the pulsed laser is irradiated with the output recurrence frequency of 500 Hz for the area 1 and area 2 respectively. (a) Irradiation area 1. (b) Irradiation area 2.

在 500 Hz 典型脉冲激光辐照下,首次暂态毁伤时刻温度最高点的水平方向与垂直方向温度基本遵循正态分布规律。

4.2 不同脉冲激光输出重复频率下辐照 FRAM 诱发的毁伤效应与热演化

在存储器底层应用中,通过施加电场来读取铁电电容器的存储值。将存储单元翻转到相反状态所需的电荷量,并显示单元的先前状态,意味着读取操作破坏了存储单元状态,并且必须随后进行相应的写入操作,等待总线的应答标志位,以便将该位二进制值写回。这个读取数据的过程被破坏,譬如因存储器宏观上体现的便是读写数据的变化或 IIC 总线通信中失去应答或存储单元失效而不能进行下个时序操作,上位机便会显示异常。铁电存储器由于其加工精度达到深微米数量级,所以并不能控制激光焦斑精确照射至器件内部结构所在的某一确定的位置,只能依据存储器表面 1 号与 8 号引脚的中线将存储器划分为区域 1 和区域 2。在同一频率辐照实验中,1、2、3、4 号引脚所在区域定义为区域 1,5、6、7、8 号引脚所在区域定义为区域 2。表 1 为不同脉冲激光输出频率下辐照铁电存储器出现首次暂态毁伤和永久毁伤的时间节点。

表 1 中, X 表示存储器时钟损坏,无法继续刷新;首次暂态毁伤时刻表示铁电存储器读数据时第一次出现数据错误的时刻;无数据输出时刻表示上位机串口监视器无正确数据刷新开始的时刻,换言之,上位机仍在刷新读出铁电存储器数据,但数据已出现持续失真;永久毁伤时刻表示上位机停止显示数据的时刻。从表中可以看出,随着重频的降低,出现毁伤的时间大致呈现递减的趋势,但也有部分特例,由于器件结构工艺,内部存在钝化层、金属层、有源区等吸收系数不同的介质层,器件灵敏区分布不均^[17],辐照区域存在误差,导致了激光作用于非灵敏区域,例如 500 Hz 重频条件下,出现毁伤的时间明显低于 1 000 Hz 条件下区域 2 的毁伤出现时间。图 10 为铁电存储器在辐照环境下串口在刷新读出数据时的几种典型状态。

由图 10 获得的数据截图提取部分辐射效应对存储器数据读取的造成典型影响的例子可以看出,串口数据截图 10(a)显示了由于辐射效应诱导的单粒子扰动造成串口数据出现了瞬时的改变;

表 1 不同脉冲激光输出重复频率下辐照 FM24CL64B_G 铁电存储器出现首次暂态毁伤和永久毁伤的时间节点

Tab. 1 First transient damage and permanent damage of the FM24CL64B_G at different pulsed laser output recurrence frequencies

分频数	激光重复频率/Hz	辐照区域	首次暂态毁伤/s	无数据输出/s	永久毁伤/s	无错误累计/s
1	1 000	1	0.51	X	4.59	0.51
		2	48.56	X	48.56	48.56
2	500	1	0.61	0.72	1.71	0.61
		2	0.74	1.75	1.96	0.74
3	333	1	0.73	X	0.73	0.73
		2	2.17	X	5.13	2.17
5	200	1	2.14	5.37	5.43	2.14
		2	1.24	X	168.37	1.24
10	100	1	4.83	5.08	113.48	4.83
		2	169.78	X	169.78	169.78
20	50	1	4.57	4.88	4.9	4.57
		2	478.46	X	478.46	478.46

图 10(b) 显示了存储器的数据读取在辐射效应诱导的单粒子效应下的持续性的数据紊乱; 图 10(c) 则体现了在存储器读取时, IIC 总线已经失去了应答能力, 读取的存储器数据皆为 0; 图 10(d) 体现了当存储器时钟没有受到损坏时, 数据已无法读出, MCU 在读操作过程中仅能实现时钟信号的交互。结合表中数据, 部分实验是在没有暂态毁伤出现时出现永久毁伤的。实验中出现

的短暂的可恢复性的数据失真通常是由单粒子扰动造成; 而无数据输出现象出现时, 当时钟信号仍然存在时说明存储器数据地址出现了不可逆转的损坏, 当时钟信号中断时, 此时的毁伤可以界定为单粒子功能中断 (Single event function interrupt, SEFI)^[14-15]。所以可得出结论, 图 10(a) 现象的暂态毁伤具有可恢复性, 其余情况往往具有不可逆转性。

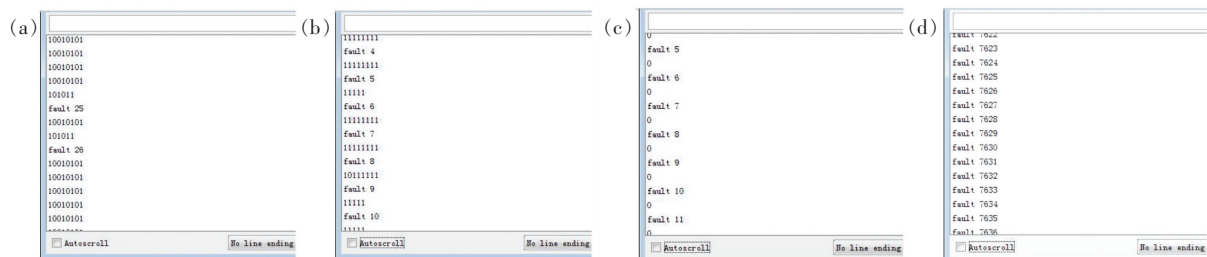


图 10 FRAM 数据读取时 4 种典型错误状态。(a) 单粒子翻转; (b) 单粒子闩锁; (c) 单粒子闩锁; (d) 单粒子闩锁。

Fig. 10 Four typical error conditions when reading FRAM data. (a) Single event reversal. (b) Single event latch-up. (c) Single event latch-up. (d) Single event latch-up.

通过实验数据采集可以看出, 在辐照实验中, 区域 2 首次出现暂态毁伤和永久毁伤的時刻均晚于区域 1。由此可得出结论: 对于 FM24CL64B_G 型铁电存储器, 在相同空间辐照环境下, 辐照区域 1 比区域 2 有更大的毁伤概率。由于激光器的内部光路中功率的损耗使激光重复频率与平均输出功率并不是线性关系, 故无法得出重复频率与辐射剂量率或温度场最高温度的精准对应关系来解

释重复频率与辐照时的极端作用条件的关系, 只能根据激光功率计进行测量。表 2 为不同激光输出重复频率对应的激光平均输出功率及最高红外辐射温度。

根据不同重复频率实验条件下测量得到的铁电存储器表面在辐照区域 1、区域 2 的中心温度场的最高辐射温度数据, 根据黑体辐射理论中能量通量与辐射频率的关系, 提出并建立非线性回

表 2 不同激光输出重复频率与对应激光平均输出功率、最高红外辐射温度

Tab.2 Different laser output frequency and corresponding average laser output power, highest infrared radiation temperature

分频数	激光重复频率/Hz	激光平均功率/W	实验区域(次数)	最高温度/℃
1	1 000	2.980	1	439.37
			2	466.03
2	500	1.470	1	378.66
			2	403.81
3	333	0.985	1	313.49
			2	320.09
5	200	0.585	1	227.78
			2	187.77
10	100	0.301	1	143.22
			2	144.57
20	50	0.155	1	85.86
			2	104.90

归模型用以描述最高温度与激光输出重复频率的关系:

$$T_n(x) = a_n \times e^{-\frac{b_n}{x}} + c_n, \quad (1)$$

其中, $T_n(x)$ 为不同激光输出重复频率下对应的作用目标位置处的辐射温度, $n=1, 2$ 分别代表辐照区域, 其中 x 为自变量, 表示激光输出频率; a_n 、 b_n 和 c_n 分别为回归参数, 且 a_n 、 b_n 和 c_n 均大于 0。基于对两个激光辐照区域的温度场的数据采集和处理, 通过非线性最小二乘法进行数据拟合。图 11 为不同辐照区域下中心温度场的最高辐射温度与激光输出频率的拟合关系曲线。

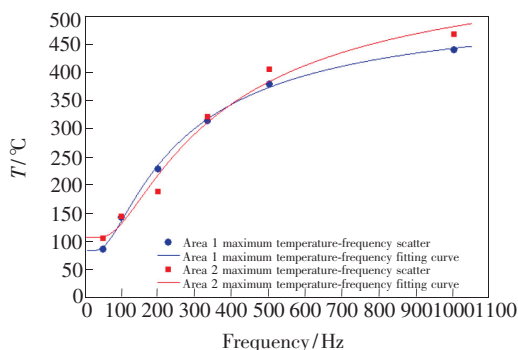


图 11 不同辐照区域下中心温度场的最高温度与激光输出重复频率的拟合关系曲线

Fig.11 Curve of the fitting relationship between the maximum temperature of the central temperature field and the laser output recurrence frequency under different irradiation areas

通过对回归参数的计算和假设检验, 在置信度 $1 - \alpha$ 为 95% 的条件下, 激光辐照区域 1 与区域 2 的最高辐射温度与激光输出频率满足如下关系式:

$$T_1(x) = 443.9 \times e^{-\frac{215.3}{x}} + 83.4, \quad (2)$$

$$T_2(x) = 505.7 \times e^{-\frac{303}{x}} + 106.2, \quad (3)$$

计算后可得出不同辐照区域对应的残差平方和分别为 $S_{E1}^2 = 182.7$ 与 $S_{E2}^2 = 1842$, 两者的拟合优度分别为 $R_1^2 = 0.9981$ 与 $R_2^2 = 0.983$, 可见 R_1^2 与 R_2^2 均略小于 1, 说明拟合结果与实验数据的符合度较好。在重复频率小于 100 Hz 时, 激光辐照区域中温度场的中心最高辐射温度随重复频率的变化稳中有升; 在激光输出重复频率为 100 Hz 左右时, 斜率变化明显; 当激光输出频率大于 100 Hz 时, 随着重复频率的提高, 中心温度场的辐射温度以指数函数关系上升, 而在激光输出重复频率大于 500 Hz 时, 中心温度场的辐射温度增长趋势变缓。根据实验的实际情况, 该斜率不可能小于 0。由此可知公式 (2) 和 (3) 对该不同激光输出频率下辐射温度场的最高温度和激光输出重复频率的关系具有很大的可信度, 而且非线性回归模型 $T_n(x) = a_n \times e^{-\frac{b_n}{x}} + c_n$ 可以很好地描述飞秒脉冲激光辐照铁电存储器的过程中, 激光辐照区域的最高辐射温度与激光输出重复频率的关系, 其中 x 为重复频率。

根据激光辐照区域温度场的数据采集,在温度最高的 10% 中、焦斑中心区域内任意选取一点,由于铁电存储器在不同激光输出频率下出现永久失效的时间不同,另外,由于数据维度的限制,所以只选取了 0~6.5 s 内铁电存储器在飞秒脉冲激光辐照下的热演化过程。图 12 为不同辐照区域下中心温度场的最高温度与激光输出重复频率的时程曲线。

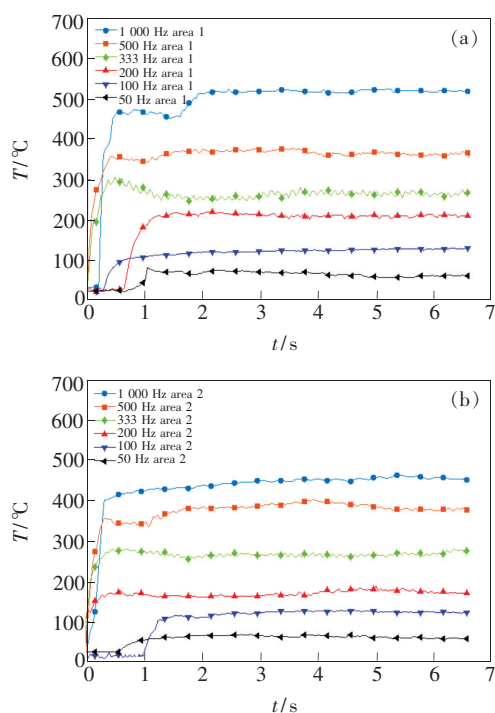


图 12 不同辐照区域下中心温度场的最高温度与激光输出频率的时程曲线。(a) 辐照区域 1; (b) 辐照区域 2。

Fig. 12 Time-history plots of the maximum temperature and the laser output frequency of the central temperature field under different irradiation areas. (a) Irradiation area 1. (b) Irradiation area 2.

由图 12 可以看出:当激光输出重复频率较高时,焦斑中心区域的温度以非常快的速度上升,而后进入一个温度变化平缓的区域,这个过程基本不超过 1 s,而实验中大部分铁电存储器首次出现暂态毁伤的时刻发生在小于 1 s 的时间内,主要归因于飞秒脉冲激光模拟空间辐照时的热辐射与激光支持爆轰波 (Laser-supported detonation wave) 带来的毁伤,并伴有高能带电粒子对底层存储单元的破坏。随着激光输出重复频率的降低,温度场的中心温度进入温度平缓区的耗时逐渐变长^[18]。在激光输出频率低于 200 Hz 时,热

辐射与热应力的作用减弱,烧蚀痕迹也逐渐减弱,此时激光辐照诱导的单粒子效应对铁电存储器存储单元中铁电体自发极化^[19]带来的影响是造成铁电存储器读出数据出现错误的主要原因,故可以看出永久毁伤出现的时间远长于激光输出频率大于 200 Hz 的情况。当激光频率低于 100 Hz 时,由于该型铁电存储器工作温度为 -40~85 °C,实验中存储器表面温度始终维持在最高工作温度附近,此时激光使介质与器件电离产生的带电粒子诱导的单粒子效应所衍生的总剂量效应或许为铁电存储器失效的主要原因。图 13 为不同辐照区域下边缘温度场的最高温度与激光输出频率的时程曲线(边缘温度场采样点为温度最低的 10% 区域内任意定点)。

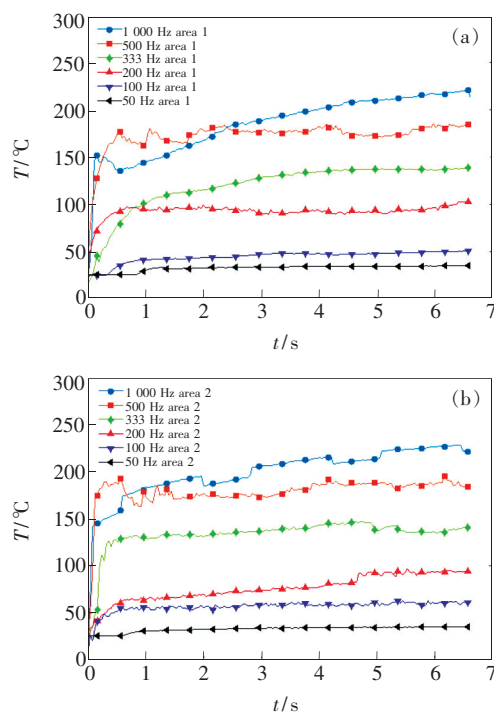


图 13 不同辐照区域下边缘温度场的温度与激光输出频率的时程曲线。(a) 辐照区域 1; (b) 辐照区域 2。

Fig. 13 Time-history plots of temperature and laser output frequency of the lower edge temperature field in different irradiation regions. (a) Irradiation area 1. (b) Irradiation area 2.

由图 13 可以看出,边缘温度场在小于 1 s 的辐照时间内达到稳定变化的状态,与中心温度场温度演化规律基本一致,没有温度突变现象,故未来铁电存储器抗辐射效应衍生的热效应防护加固应以中心温度场最高温度作为参考阈值。由于实验条件所限并没有对电荷量进行实验测量,所以

在频率相对较低的激光辐照实验条件下,铁电存储器工作温度上限为出现永久失效的临界条件,但实验数据显示温度上限工作条件并不能使存储器正常工作很久。

5 结 论

利用飞秒脉冲激光模拟空间高能粒子辐照铁电存储器(FRAM),主要针对不同激光输出功率、铁电存储器不同辐照区域,开展了飞秒脉冲激光辐照铁电存储器诱导的单粒子效应和热演化特征实验,进而为铁电存储器在空间辐照环境中产生的单粒子效应和热演化特征提供数据支撑,得出如下结论:

(1)随着飞秒脉冲激光脉冲重复频率的逐渐降低,使存储器出现永久毁伤所需要的时间也越

长;随着激光输出重复频率的增大,激光对铁电存储器的作用由激光电离存储器介质产生的高能带电粒子诱导的单粒子效应对铁电体自发极化的破坏为主,逐步转变为以热辐射与热应力诱发的毁伤;当激光在器件表面产生的最高温度接近存储器最高工作温度时,永久毁伤的发生时间将显著延长。

(2)通过对回归参数的计算和假设检验,给出了回归参数的置信度 $1 - \alpha$ 为 95% 的条件下激光辐照区域 1 与区域 2 的最高辐射温度与激光输出频率的关系式。

(3)实验所得到的飞秒脉冲激光辐照铁电存储器诱导的单粒子效应、辐照区域的热演化特征以及电输出特性,将为激光辐照铁电存储器诱发的热应力提供技术支持。

参 考 文 献:

- [1] MCLEAN F B, MCGARRITY J M, SCOZZIE C J, *et al.*. Analysis of neutron damage in high-temperature silicon carbide JFETs [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, 41(6):1884-1894.
- [2] SCOZZIE C J, MCGARRITY J M, BLACKBURN J, *et al.*. Silicon carbide FETs for high temperature nuclear environments [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, 43(3):1642-1648.
- [3] 韩建伟, 张振龙, 封国强, 等. 单粒子锁定极端敏感器件的试验及对我国航天安全的警示 [J]. *航天器环境工程*, 2008, 25(3):263-268.
HAN J W, ZHANG Z L, FENG G Q, *et al.*. The radiation test of SRAM devices for extreme single event latch-up susceptibility and a warning to our aerospace safety [J]. *Spacecr. Environ. Eng.*, 2008, 25(3):263-268. (in Chinese)
- [4] PAGE T E, BENEDETTO J M. Extreme latchup susceptibility in modern commercial-off-the-shelf (COTS) monolithic 1M and 4M CMOS static random-access memory (SRAM) devices [C]. *IEEE Radiation Effects Data Workshop, Seattle, WA, USA*, 2005:1-7.
- [5] 翟亚红, 李威, 李平, 等. 抗辐射铁电存储器的研究进展 [J]. *材料导报*, 2012, 26(12):34-38.
ZHAI Y H, LI W, LI P, *et al.*. Research progress of radiation hardened ferroelectric random access memory [J]. *Mater. Rev.*, 2012, 26(12):34-38. (in Chinese)
- [6] CLAEYS C. 先进半导体材料及器件的辐射效应 [M]. 刘忠立, 译. 北京:国防工业出版社, 2002:16-17.
CLAEYS C. *Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices* [M]. LIU Z L, trans. Beijing: National Defense Industry Press, 2002:16-17. (in Chinese)
- [7] 薛玉雄, 曹洲, 杨世宇, 等. 单粒子效应不同模拟源的等效性实验研究初探 [J]. *核技术*, 2008, 31(2):123-128.
XUE Y X, CAO Z, YANG S Y, *et al.*. Equivalent of different simulation source simulating single-event effect experiment [J]. *Nucl. Tech.*, 2008, 31(2):123-128. (in Chinese)
- [8] 张兴尧, 郭旗, 张乐情, 等. Flash 存储器总剂量辐射损伤效应和退火特性 [J]. *核技术*, 2013, 36(8):080201-1-5.
ZHANG X Y, GUO Q, ZHANG L Q, *et al.*. Flash memory ionizing radiation effects and annealing characteristics [J]. *Nucl. Tech.*, 2013, 36(8):080201-1-5. (in Chinese)
- [9] 张兴尧, 郭旗, 陆妩, 等. 串口型铁电存储器总剂量辐射损伤效应和退火特性 [J]. *物理学报*, 2013, 62(15):156107-1-6.
ZHANG X Y, GUO Q, LU W, *et al.*. Serial Ferroelectric memory ionizing radiation effects and annealing characteristics [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2013, 62(15):156107-1-6. (in Chinese)

- [10] 段晓峰,牛燕雄,张维. 半导体材料的激光辐照效应计算和损伤阈值分析 [J]. 光学学报, 2004,24(8):1057-1061.
DUAN X F, NIU Y X, ZHANG C. Calculation of laser irradiation effect and analysis of laser-induced damage threshold in semiconductor [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2004,24(8):1057-1061. (in Chinese)
- [11] 辜科,李平,李威. 铁电存储器的单粒子效应试验研究 [J]. 微电子学与计算机, 2015,32(6):109-111
GU K, LI P, LI W. Experimental study of single event effects on ferroelectric random access memory [J]. *Microelectron. Comput.*, 2015,32(6):109-111. (in Chinese)
- [12] COIC Y M, MUSSEAU O, LERAY J L. A study of radiation vulnerability of ferroelectric material and devices [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994,41(3):495-502.
- [13] 上官士鹏. 脉冲激光模拟试验数字器件单粒子效应的机理与方法研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2011:4-8.
SHANGGUAN S P. *Research of Mechanism and Experimental Methods of Pulsed Laser Facility in Simulating Single Event Effects of Digital Parts* [D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2011:4-8. (in Chinese)
- [14] 唐本奇,王燕萍,耿斌,等. 用²⁵²Cf裂片源研究单粒子烧毁和栅穿效应的方法 [J]. 原子能科学技术, 2000,34(4):339-343.
TANG B Q, WANG Y P, GENG B, *et al.*. Burnout and gate rupture of power MOS transistors with fission fragments of ²⁵²Cf [J]. *At. Energy Sci. Technol.*, 2000,34(4):339-343. (in Chinese)
- [15] DRESSENDORFER P V. *Basic Mechanisms for The New Millennium* [R]. Albuquerque, NM:Sandia National Laboratories, 1998.
- [16] 杨世铭,陶文铨. 传热学 [M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2006:34-35.
YANG S M, TAO W Q. *Heat Transfer* [M]. 4th ed. Beijing:Higher Education Press, 2006:34-35. (in Chinese)
- [17] 马英起. 单粒子效应的脉冲激光试验研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2011:30-31.
MA Y Q. *Research on Pulsed Laser Induced Single Event Effects* [D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2011:30-31. (in Chinese)
- [18] 陈朗,鲁建英,伍俊英,等. 激光支持爆轰波 [M]. 北京:国防工业出版社, 2011:64-79.
CHEN L, LU J Y, WU J Y, *et al.*. *Laser Supported Detonation Wave* [M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2011:64-79. (in Chinese)
- [19] 钟维烈. 铁电体物理学 [M]. 北京:科学出版社, 1996:23-29.
ZHONG W L. *Ferroelectric Physics* [M]. Beijing:Science Press, 1996:23-29. (in Chinese)



乔相信(1959-),男,河南孟县人,硕士,教授,1989年于华东工学院(现南京理工大学)获得硕士学位,主要从事激光加载及测试等领域的研究。

E-mail: qxx2002@163.com



唐恩凌(1971-),男,辽宁沈阳人,博士,教授,2007年于北京理工大学获得博士学位,主要从事强动载下材料与结构的力电效应、激光加载及测试技术等领域的研究。

E-mail: tangenling@126.com