

脉冲激光模拟单粒子效应研究

张晨光 安 恒 王 鹄 李存惠 曹 洲 文 轩 薛玉雄

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室

空间环境材料行为及评价技术国防科技重点实验室 兰州 730000)

摘要 脉冲激光在集成电路和器件单粒子效应(Single Event Effect, SEE)研究中有着广泛的应用。与重离子源相比,通过脉冲激光诱发SEE更容易获得空间信息 and 时间信息。本文介绍激光诱发SEE的产生机理、模拟试验设置以及线性能量传输(Linear Energy Transfer, LET)算法,通过皮秒激光诱发单光子与飞秒激光诱发双光子的模拟试验,对SEE现象发生时电压响应与能量的关系进行分析,验证了脉冲激光在SEE研究中的有效性和可行性。

关键词 单粒子效应, 飞秒脉冲激光, 单光子, 双光子, 等效LET值

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.040201

Research on single event effects of pulsed laser simulation

ZHANG Chenguang AN Heng WANG Yi LI Cunhui CAO Zhou WEN Xuan XUE Yuxiong

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, National Key Laboratory of Materials Behavior and Evaluation Technology in Space Environment, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract [Background] Pulsed laser has been widely used in the research of single particle effects (SEE) in integrated circuits and devices. Compared with heavy ion sources, it is easier to obtain spatial and temporal information through pulsed laser-induced SEE. [Purpose] This study aims to compare the linear energy transfer (LET) of SEE in silicon devices between single-photon and two-photon. [Methods] The differences of LET were compared by formula derivation and experimental comparison. Three kinds of silicon devices, i. e., differential comparator, static random access memory (SRAM) and bipolar junction transistor, were taken as design under test (DUT) units for both the single-photon absorption (SPA) and two-photon absorption (TPA) experiments. [Results] The different processes of SPA and TPA induced single particle effect are verified, and comparison results show that there is a quantitative relationship between energy and LET. [Conclusions] It is reasonable to have different equivalence relations between energy and LET. SPA and TPA need different LET values in single particle effect.

Key words Single event effects, Pulsed laser, Single photon, Two-photon, LET

当空间粒子穿过PN结或附近区域时,会形成由电子和空穴组成的电荷径迹。如果电荷密度足够大,径迹上的电荷会在耗尽层电场的作用下被PN结收集,当收集的电荷超过临界值,集成电路会发生暂时或永久的功能中断。

1965年,Habing^[1]发现光子和重离子都是通过组成原子中释放电子来使物质电离,提出脉冲激光可以用来模拟电子和 γ 射线的剂量率效应。1987年,首次利用脉冲激光进行脉冲激光模拟单粒子效应研究^[2]。光子和重离子在物质中产生电子——空

空间环境材料行为及评价技术国防科技重点实验室基金资助

第一作者: 张晨光, 男, 1993年出生, 2014年毕业于北京航空航天大学, 现主要从事空间环境辐射效应及有效载荷技术研究

收稿日期: 2019-12-10, 修回日期: 2020-02-24

Supported by National Key Laboratory of Materials Behavior and Evaluation Technology in Space Environment

First author: ZHANG Chenguang, male, born in 1993, graduated from Beihang University in 2014, focusing on space radiation effect and payload

Received date: 2019-12-10, revised date: 2020-02-24

穴(e-h)对的机制和产生的电荷轨迹分布不同。这种差异是由于粒子在PN结附近产生的电荷取决于粒子的能量和原子序数,而激光产生的电荷取决于波长、光学聚焦器件和激光强度,这导致他们产生的电荷轨迹有所不同。然而这些差异并没有限制脉冲激光模拟技术用于研究单粒子效应(Single Event Effect, SEE)的应用,国内外通过脉冲激光模拟技术已经对各种器件进行了研究,包括双极器件、互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)器件、存储器、数字逻辑器件和线性器件以及功率器件^[3]。

1 脉冲激光模拟单粒子效应试验设备简介

脉冲激光模拟单粒子效应试验设备特别需要机械稳定性,因为振动不仅会影响测试,还会影响激光器内部光学组件使光束参数发生变化,对激光输出能量和聚焦光斑产生影响,当脉冲激光束在进入聚焦透镜时,其束斑直径小于透镜孔径,聚焦光束的束斑强度分布一般为高斯形态,器件表面光斑直径为1~2 μm 。所有的光学元件应该是刚性的,并且牢固地固定在光学平台上。图1为SEE测试设备示意图,主要包括光学平台、激光器、衰减器、能量计、电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)摄像机、照明灯、显微镜物镜、移动平台等^[4]。

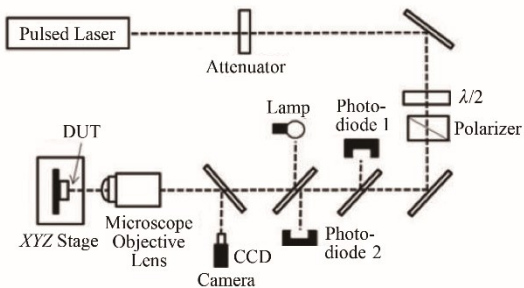


图1 SEE测试设备的示意图
Fig.1 SEE test equipment diagram

脉冲激光模拟单粒子效应测试系统主要由远程数据管理单元、检测单元及试验设计(Design Under Test, DUT)单元等主要部分组成,图2为单粒子效应测试系统组成示意图。检测单元部分主要由电压调节、供电控制、电流采集及前端处理等模块构成。

2 辐照参数选择

2.1 辐照方式

SEE激光试验可以分为单光子吸收(Single-

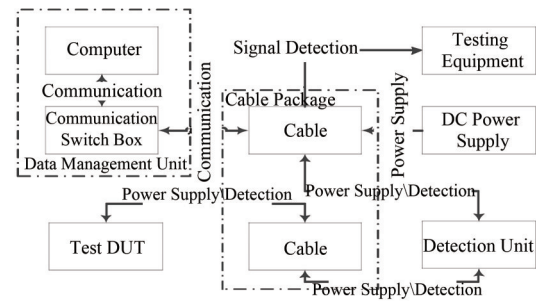


图2 SEE模拟试验系统组成
Fig.2 SEE composition diagram of simulation test system

photon Absorption, SPA)试验或双光子吸收(Two-photon Absorption, TPA)试验,它们在电荷生成过程和所用激光器和光学器件类型上有所不同。当测试器件的金属布线或封装不会阻碍脉冲激光辐照器件敏感区域时,使用可见光或近红外激光从器件正面辐照,进行SPA试验。SPA是进行定量测量、与离子数据对比的首选方法,因为在没有金属布线干扰的情况下,通常可以通过入射激光的能量直接确定在硅中沉积的电荷量。当金属布线影响脉冲激光对器件敏感区域的辐照时,可以选择通过SPA或TPA技术从器件背面辐照。当光子能量小于带隙且大于二分之一带隙,两个光子作用下使硅电离产生电子-空穴对,即发生TPA。当光子能量大于带隙适用于SAP、光子能量小于带隙且大于二分之一带隙适用于TPA,选取对于硅器件模拟试验适合的波长范围,如图3所示,SPA可选取1 064 nm的波长,对于硅器件,吸收系数为14 cm^{-1} 时,入射深度为676 μm ,TPA可选取1 250 nm的波长,光子能量低于硅带隙,通过硅基底时激光不会衰减,但经过物镜使激光聚焦,通过减小激光光束直径,增大激光光束的光强后,硅衬底在两个光子的作用下产生电离。当从背面进行激光SEE测试时,通常需要特殊处理来移除封装的背面并对衬底薄化和抛光。须在衬底的背面上产生类似光洁度的镜子,否则光束均匀性可能会降低。

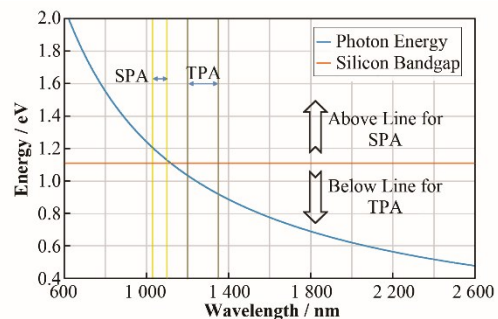


图3 光子能量随波长的变化和硅带隙能量
Fig.3 Variation of photon energy with wavelength and silicon band gap energy

正面辐照时,当金属层的平面尺寸大于聚焦光斑平面尺寸时,脉冲激光无法到达器件敏感区域,当金属连线或点的平面尺寸小于聚焦光斑时,一部分激光将绕过金属并能够产生SEE,很难准确测量到达敏感区域的入射光的比例。从背面辐照时,顶部的金属层会将一部分入射光反射回硅中,从而降低测得的SEE阈值。如果想要准确地测量反射光的比例,需要知道金属层的尺寸以及光束的轮廓分布,这两者都很难确定。所以对于定量测试,因选择不存在金属层的敏感区域,避免正面辐照时由金属引起的脉冲激光能量衰减和背面辐照反射引起的脉冲激光能量增强的影响。

背面试验时,斑点首先聚焦在器件表面,通过将物镜向下移动一段距离 ΔZ ,如图4所示,使光斑透过厚度 d 的衬底,从而到达敏感体积上, ΔZ 的值可由硅的折射率 $\eta_{\text{Si}}(1\ 064\ \text{nm})=3.5$ 和衬底厚度 d 给出:

$$\Delta Z = \frac{d}{\eta_{\text{Si}}} \quad (1)$$

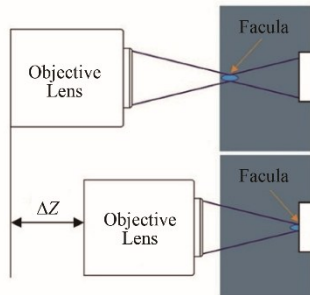


图4 背面激光照射
Fig.4 Back laser irradiation

由于器件顶部表面有金属覆盖,所以完整敏感区域定位只能通过背面入射的激光辐照试验获得^[5]。图5^[6]显示了四路差分比较器(LM139)正面辐照和背面辐照的结果。在图3中可以看出,激光的正面辐照定位了一些敏感区域,但是和背面辐照的结果对比可以看出,约一半的敏感区域被金属覆盖。正面或背面辐照选择取决于每个试验器件的具体情况。

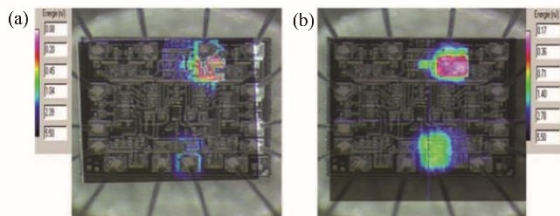


图5 LM139在1 064 nm处的正面(a)和背面(b)激光测试的比较
Fig.5 Comparison of front (a) and back (b) laser testing of LM139 at 1 064 nm

2.2 光斑尺寸

如图6所示,0.35 μm 静态随机存储器(Static Random Access Memory, SRAM)器件通过激光模拟试验得到的单粒子翻转(Single particle Upset, SEU)阈值与激光脉宽的关系^[7]。图6表明只要激光脉宽小于80 ps, SEU阈值大小就与脉宽无关,对于脉宽大于80 ps的脉冲激光,诱发SEU所需的激光脉冲能量将线性增加。电荷与敏感节点相互作用的时间小于1 ps^[8],但电荷收集和电路响应却需要更长时间,因此只要脉宽小于电路响应时间,就不影响试验结果。对于TPA试验,需要更小的脉宽来确保发生双光子吸收所需的脉冲辐照度,通常为100~200 fs。脉冲激光光斑选取尽可能小的尺寸,因为随着光斑尺寸的增大,越来越多的光子能量被吸收到敏感体外,从而导致脉冲激光SEE能量阈值增加。脉冲激光光斑尺寸有式(2)得到:

$$\omega_0 = \frac{4\lambda f}{\pi d} = \frac{2\lambda}{\pi NA} \quad (2)$$

式中: λ 是光的波长; f 是透镜的焦距; d 是透镜的直径; NA 是透镜的数值孔径($NA=d/2f$)。

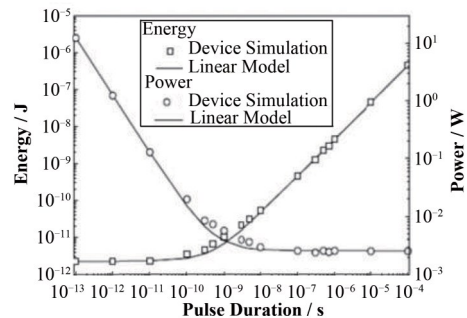


图6 0.35 μm SRAM器件SEU阈值和脉冲功率与脉冲宽度的关系

Fig.6 Relationship of 0.35 μm SRAM device SEU threshold vs. pulse power and pulse width

2.3 扫描频率

激光器的脉冲频率可以从单脉冲到兆赫范围,试验所需脉冲频率由测试设备的响应时间、扫描所需精度及扫描时间确定。如果设备的SEE响应在下一个激光脉冲到达之前没有完全达到平衡状态,则无法保证测量的有效性。在所需的时间内完成大面积器件高分辨率扫描,需要平台从一个位置快速移动到另一个位置,这需要载物平台移动频率和脉冲激光频率一致。

扫描时间如式(3)所示,其中 n 和 m 分别是 X 和 Y 方向上的扫描点数, f 是脉冲激光扫描频率(与载物平台移动频率一致)。例如,要以1 μm 的分辨率扫描100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的区域,需要10 000步,即最少10 000个激光脉冲。但是,在估计扫描区域所需的

总时间时,还必须考虑平台移动所需的时间以及相机拍摄数据的时间。

$$t = \frac{n \times m}{f} \quad (3)$$

3 脉冲激光等效重离子LET值

LET值是对重离子使材料电离产生自由载流子能力的描述,脉冲激光模拟试验作为一种模拟手段,有必要确定不同脉冲激光能量和重离子LET值之间的关系。自由载流子吸收一般只产生自由电子的加热效果,而不产生新的电离,可以忽略^[9]。带宽收缩效应因各类器件掺杂浓度的分布情况复杂,暂不考虑。我们从脉冲激光能量损失的角度,计算脉冲激光等效重离子LET值。

脉冲激光的吸收过程在电荷轨迹的分布中起着重要作用,在描述物质中脉冲激光的传播时,必须包含光的吸收过程。光的吸收过程由式(4)决定:

$$\frac{dI(r,z)}{dz} = -\alpha_i I(r,z) - \sigma NI(r,z) - \beta_i I(r,z)^2 \quad (4)$$

式中: $I(z)$ 是光强; r 和 z 分别是径向和纵向位置; σ 是自由载流子吸收横截面; N 是自由载流子密度; α_i 和 β_i 分别是SPA和TPA波长相关的吸收系数^[10-11]。

在不考虑自由载流子吸收及带宽收缩效应的影响的情况下,激光能量在硅中单位长度上产生的电荷数为:

$$N_{\text{photon}} = \frac{dE}{E_p} = \frac{\Delta E}{E_p \cdot h} \quad (5)$$

由线性能量传输的定义得:

$$\text{LET} = \frac{dE}{dx} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (6)$$

则,重离子在硅中单位长度上产生的电荷数为:

$$N_{\text{ion}} = \frac{dE}{E_{\text{ion}}} = \frac{\rho \text{LET}}{E_{\text{ion}}} \quad (7)$$

根据 $N_{\text{photon}} = N_{\text{ion}}$,由式(5)和(7)可得到激光等效重离子LET值:

$$\text{LET} = \frac{\Delta E}{E_p \cdot h \cdot \rho} \quad (8)$$

式中: ΔE 为敏感体积吸收脉冲激光能量,J。由1 MeV=1.6×10⁻¹³ J,可得器件表面LET为:

$$\text{LET} = \frac{\Delta E}{A \cdot E_p \cdot h \cdot \rho} \quad (9)$$

其中: $A=1.6 \times 10^{-13}$,由于器件扩散工艺原因而导致的保护层不均匀性的影响,考虑表面反射率的影响^[12-13],因此脉冲激光辐照在硅器件芯片的有效

LET值为:

$$\text{LET} = (1 - R) \frac{E_{\text{ion}} \cdot \Delta E}{A \cdot E_p \cdot h \cdot \rho} \quad (10)$$

式中: ΔE 为敏感体积中吸收的激光能量; E_{ion} 为重离子使材料电离的能量; ρ 为材料密度; E_p 为脉冲激光使材料电离的能量, $A=1.6 \times 10^{-13}$; h 为敏感体积厚度; R 为反射率。

单光子吸收与双光子吸收的不同在于 ΔE 和 E_p 不同,单光子吸收中 $E_p=E_{\text{photon}}$,双光子吸收中 $E_p=2E_{\text{photon}}$ 。

3.1 单光子吸收

在单光子吸收中,式(4)右侧的第一项占主导地位,第二项不参与SEE过程^[14-15],可以得到比尔定律的众所周知的表达:

$$I = I_0 \exp(-ax) \quad (11)$$

式中: I 是材料表面的脉冲激光光强; x 是器件表面到敏感体积的深度。由式(11)得:

$$E = E_0 \exp(-ax) \quad (12)$$

式中: E 为入射到器件表面能量; E_0 为入射到敏感体积表面能量,由式(12)得到, $\Delta E = E_0(1 - \exp(-ah))$,则单光子吸收等效LET值为:

$$\text{LET} = (1 - R) \frac{E_{\text{ion}}(1 - \exp(-ah))}{A \cdot E_{\text{photon}} \cdot h \cdot \rho} E_0 \quad (13)$$

3.2 双光子吸收

在双光子吸收中,对于小于硅的带隙的光子能量,式(4)中的第一项可忽略不计。如果忽略自由载流子吸收,则可以求解式(4):

$$I(z) = \frac{I_0}{1 + \beta_i I_0 z} \quad (14)$$

由式(14)得到, $\Delta E = E_0(1 - \frac{1}{1 + \beta_i h \frac{E_0}{\omega \sigma}})$; β_i 为

双光子吸收系数; ω 为脉冲宽度; σ 为光斑面积; h 为敏感体积厚度; E_0 为入射到敏感体表面的能量。则双光子吸收等效LET值为:

$$\begin{aligned} \text{LET} = (1 - R) & \frac{E_{\text{ion}} \cdot E_0 \left(1 - \frac{1}{1 + \beta_i h \frac{E_0}{\omega \sigma}} \right)}{A \cdot 2E_{\text{photon}} \cdot h \cdot \rho} = \\ & (1 - R) \frac{E_{\text{ion}} \beta_i h}{A \cdot 2E_{\text{photon}} \cdot h \cdot \rho (\omega \sigma + \beta_i h E_0)} E_0^2 \end{aligned} \quad (15)$$

4 脉冲激光模拟试验验证

试验选取BC108双极结型晶体管,如图7所示,是一种通用的低功率硅NPN双极结型晶体管。图8为BC108双极结型晶体管测试板和测试系统。



图7 BC108双极结型晶体管
Fig.7 Photograph of BC108 bipolar junction transistor

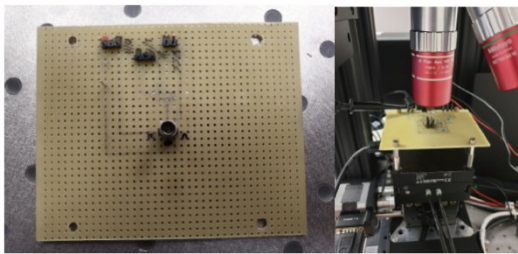


图8 BC108双极结型晶体管测试板和测试系统
Fig.8 BC108 bipolar junction transistor test board and test system

选择正面辐照方式,20倍物镜,单光子吸收试验,选取1 064 nm波长,1.6 μm 光斑,双光子吸收试验,选取1 200 nm波长,1.9 μm 光斑,扫描方式相同,通过大步长(8 μm)粗扫确定器件的敏感区域,在敏感区域内通过小步长(2 μm)扫描确定敏感点位置,再逐步改变脉冲激光能量,能量从1 nJ开始增大或减小,获得能量阈值。测试期间,使用0.7 V输入电压,并且使用示波器监测出现单粒子瞬态脉冲时输出信号的变化。图9为1 064 nm脉冲激光入射能量与运算放大器输出电压响应的关系,图10为1 200 nm脉冲激光入射能量与运算放大器输出电压响应的关系,显示了增加脉冲能量对双极结型晶体管输出电压的影响。

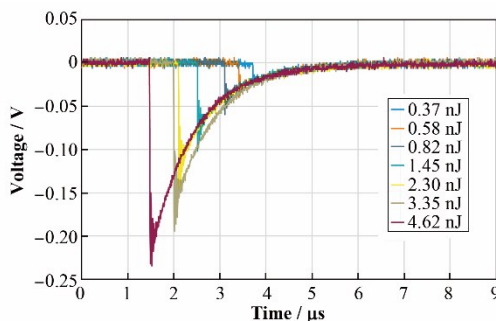


图9 1 064 nm脉冲激光能量变化对BC108双极结型晶体管响应电压的影响

Fig.9 Effect of 1 064 nm pulsed laser energy variation on response voltage of BC108 bipolar junction transistor

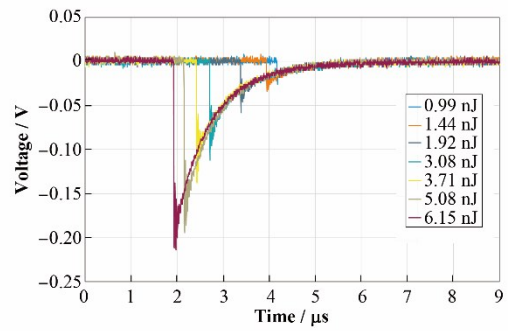


图10 1 200 nm脉冲激光能量变化对BC108双极结型晶体管响应电压的影响

Fig.10 Effect of 1 200 nm pulsed laser energy variation on response voltage of BC108 bipolar junction transistor

根据图9、10可以看出,SPA和TPA试验中相同的输出电压处均能找到对应的单光子和双光子能量值,即SPA和TPA试验中能量间存在着定量关系。

根据试验结果得到,BC108双极结型晶体管SPA(1 064 nm)脉冲激光能量阈值为0.37 nJ,带入式(13)中可得, $LET_{1\,064\,nm}(0.37\,nJ)=25.46\,MeV\cdot cm^{-2}\cdot mg^{-1}$; BC108双极结型晶体管TAP(1 200 nm)脉冲激光能量阈值为0.99 nJ,带入式(15)中可得, $LET_{1\,200\,nm}(0.99\,nJ)=1.43\,MeV\cdot cm^{-2}\cdot mg^{-1}$ 。

两者LET值之间有很大的差异,其原因在于SPA在脉冲激光入射过程中,有部分损耗在硅衬底中,相对于TPA而言,SPA到达敏感体积表面能量减小,增大了能量阈值从而增大了SPA的LET值,而具有双光子特性的TPA,在脉冲激光未聚焦前,可以几乎无损地穿过硅衬底,TPA到达敏感体积表面能量不变。同时,SPA和TPA试验时,激光光斑尺寸大于晶体管的敏感体积,当TPA光斑尺寸大于SPA光斑尺寸时,更容易在敏感体积上沉积电荷,从而降低了TPA的LET值。

根据式(13)和(15)可以看出,SPA中载流子的产生效率跟脉冲激光能量成线性关系,当光斑尺寸、脉宽一定时,TPA中载流子的产生效率跟激光能量的平方成线性关系(式(15)分母中 $\omega\sigma$ 项为 10^{-20} 量级, $\beta_i hE_0$ 项为 10^{-4} 量级,又因为两项在分母中,所以 $\beta_i hE_0$ 对线性关系的影响可以忽略),图11为SPA和TPA试验时能量(能量平方)改变对响应电压的影响拟合图,单光子拟合线性系数为0.96,双光子拟合线性系数为0.99,可以看到具有良好的线性关系。又因为在同一个敏感点,响应电压的变化反映了敏感点电荷收集效率的变化,所以式(13)和(15)中的线性关系也证明了试验现象的可靠性。

5 结语

通过分析和试验,验证了SPA和TPA诱发单粒

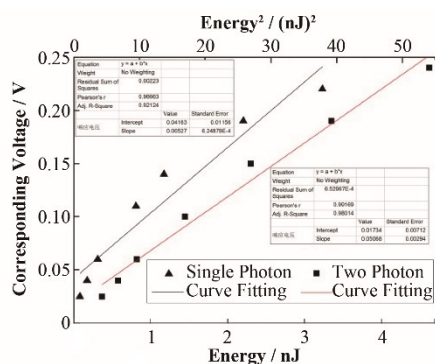


图11 单光子(双光子)电压响应与能量(能量平方)线性关系拟合图

Fig.11 Fitting diagram of linear relationship between voltage response of single-photon (two-photon) and energy (square of energy)

子效应的不同过程,分析计算了其对应的等效LET值。但是,SPA和TPA之间的定量比较,取决于众多测试参数。例如,SPA试验中,激光波长和光斑大小,可能会影响LET值与能量的相关性,TPA试验中,激光波长、光斑大小、脉冲宽度以及脉冲相位特性,可能会影响LET值与能量平方的相关性,考虑到这些差异,SPA和TPA在单粒子效应中所需不同的LET值是合理的,且SPA和TPA都能定量表征单粒子效应。

参考文献

- Habing D H. The use of lasers to simulate radiation-induced transients in semiconductor devices and circuits [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1965, **12**(5): 91-100. DOI: 10.1109/tns.1965.4323904.
- Buchner S, Wilson D, Kang K, *et al.* Laser simulation of single event upsets[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1967, **34**(6): 1227-1233.
- McMorrow D. Characteristics and applications of pulsed laser-induced single-event effects[M]. Radiation Effects on Integrated Circuits and Systems for Space Applications, Cham: Springer International Publishing, 2019: 61-81. DOI: 10.1007/978-3-030-04660-6_4.
- Roche N, Dusseau L, Boch J, *et al.* Correlation of dynamic parameter modification and ASET sensitivity in a shunt voltage reference[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, **59**(6): 2756-2763. DOI: 10.1109/tns.2012.2224127.
- Boulghassoul Y, Buchner S, McMorrow D, *et al.* Investigation of millisecond-long analog single event transients in the LM6144 Op Amp[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, **51**(6): 3529 - 3536. DOI: 10.1109/tns.2004.839196.
- Douin A, Pouget V, Darracq F, *et al.* Influence of laser pulse duration in single event upset testing[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, **53**(4): 1799 - 1805. DOI: 10.1109/tns.2006.880939.
- Weulersse C, Bezerra F, Miller F, *et al.* Probing SET sensitive volumes in linear devices using focused laser beam at different wavelengths[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, **55**(4): 2007-2012. DOI: 10.1109/radec.2007.5205576.
- Chugg A M, Jones R, Moutrie M, *et al.* Probing the charge-collection sensitivity profile using a picosecond pulsed laser at a range of wavelengths[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, **49**(6): 2969 - 2976. DOI: 10.1109/tns.2002.805553.
- Melinger J S, McMorrow D, Campbell A B, *et al.* Pulsed laser-induced single event upset and charge collection measurements as a function of optical penetration depth [J]. Journal of Applied Physics, 1998, **84**(2): 690 - 703. DOI: 10.1063/1.368124.
- McMorrow D, Lotshaw W T, Melinger J S, *et al.* Subbandgap laser-induced single event effects: carrier generation via two-photon absorption[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, **49**(6): 3002 - 3008. DOI: 10.1109/tns.2002.805337.
- McMorrow D, Lotshaw W T, Melinger J S, *et al.* Three-dimensional mapping of single-event effects using two photon absorption[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, **50**(6): 2199 - 2207. DOI: 10.1109/tns.2003.820742.
- Zhao W, Guo X, Chen W, *et al.* Temporal characteristic analysis of single event effects in pulse width modulator [J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**: 92. DOI: 10.1007/s41365-017-0254-3.
- Zhang Z, Huang Y, En Y, *et al.* Investigation of maximum proton energy for qualified ground-based evaluation of single-event effects in SRAM devices[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**: 47. DOI: 10.1007/s41365-019-0570-x.
- Yang W, Yin Q, Li Y, *et al.* Single-event effects induced by medium-energy protons in 28 nm system-on-chip[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**: 151. DOI: 10.1007/s41365-019-0672-5.
- Xu J, Chen S, Song R, *et al.* Analysis of single-event transient sensitivity in fully depleted silicon-on-insulator MOSFETs[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**: 49. DOI: 10.1007/s41365-018-0391-3.