

激光模拟单粒子效应中单光子与双光子吸收诱导电荷量对比

张晨光, 安 恒, 王 鷁, 曹 洲

(兰州空间技术物理研究所 空间环境材料行为及评价技术国防科技重点实验室
真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 通过理论推导和模拟试验, 研究了单光子和双光子吸收分别占主导时, 脉冲激光模拟试验中电荷收集效率之间的定量关系。分析不同光学参数对模拟试验中电离电荷浓度影响, 确定具体激光波长、脉宽、能量及束斑等参数。根据脉冲激光在硅中单光子线性吸收和双光子非线性吸收的特点, 推导单光子与双光子吸收产生电荷量比值的定量公式。通过 1064 nm 和 1200 nm 波长激光的验证试验, 发现了响应脉冲及产生电荷量与脉冲激光能量或能量平方具有良好的线性关系, 且在单光子吸收和双光子吸收各自占主导时, 单光子吸收产生电荷率明显高于双光子吸收, 证明了两种波长激光产生电荷量的比值近似等于公式计算结果。结果表明, 1200 nm 脉冲激光 1 nJ² 诱导电荷量等同于 1064 nm 脉冲激光 0.039 nJ 诱导电荷量。

关键词: 单粒子效应; 单光子吸收; 双光子吸收; 等效 LET 值; 诱导电荷

中图分类号: TL99 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210954

Contrast of single-photon and two-photon absorption-induced charges in laser-simulated single event effects

Zhang Chenguang, An Heng, Wang Yi, Cao Zhou

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

Abstract: By using the ways of theoretical derivation and simulation experiments, the quantitative relationship between charge collection ability in pulsed laser simulation experiments is studied when single-photon absorption and two-photon absorption are dominant respectively. The effects of different optical parameters on ionizing charge concentration are analyzed in simulation experiments, and specific parameters such as laser wavelength, pulse width, energy and beam spot are determined. According to the characteristics of single-photon linear absorption and two-photon nonlinear absorption of pulse laser in Si, the quantitative formula of the ratio of charge generated by single-photon and two-photon absorption is derived. Through the verification experiments of 1064 nm and 1200 nm laser, it is found that the response pulse and the amount of charge generated have a good linear relationship with the pulse laser energy or energy square, and the charge generated by single-photon absorption is significantly higher than that by two-photon absorption when single-photon absorption and two-photon absorption are dominant respectively. It is proved that the ratio of the charge generated by the two wavelengths is approximately equal to the calculated result. The results show that the amount of charge induced by the 1200 nm

收稿日期:2021-12-11; 修订日期:2022-01-24

基金项目:空间环境材料行为及评价技术国防科技重点实验室基金 (6142910190110)

作者简介:张晨光,男,工程师,主要从事空间环境效应及新型有效载荷方面的研究。

pulsed laser 1 nJ² is equal to the amount of charge induced by the 1 064 nm pulsed laser 0.039 nJ.

Key words: single event effect; single-photon absorption; two-photon absorption; equivalent LET value; induced charge

0 引言

众所周知,高能粒子穿过器件时,会沿电离径迹产生高密度的电子—空穴对,敏感节点通过吸收径迹上大量的电荷引发单粒子效应 (single event effect),同时电离径迹上电荷的分布取决于器件材料、粒子种类、粒子能量及 LET 值。随着半导体工艺的提升,晶体管尺寸进一步缩小,敏感节点引发单粒子效应所需的电荷量随之减少,甚至在 45 nm SOI SRAM 器件中,LET 值为 0.9 MeV/cm²·mg 的低能质子通过核反应也会引起单粒子翻转^[1]。这些变化对集成电路抗单粒子设计提出新的要求,如测试电路单粒子敏感性,确定单粒子效应阈值等。同时宇航器件商业化的趋势进一步扩展了商用器件对单粒子效应测试的需求,在这方面,脉冲激光模拟方法提供了一种快捷经济的试验手段。

脉冲激光测试系统,一般激光束聚焦光斑尺寸在 2 μm 左右,所产生的电离径迹径向距离远大于重离子的电离径迹。因此在小于 1 ps 的电离响应时间内,重离子电离径迹上的电荷密度远高于激光脉冲,但随着重离子电离径迹上漏斗效应和俄歇复合相互作用,10 ps 后重离子和脉冲激光电离径迹上的电荷浓度趋于相同^[2-3],因此不同的电离径迹造成电荷浓度分布的差异正是激光模拟单粒子的难点。虽然研究表明,脉冲激光模拟单粒子效应中单光子吸收 (single-photon absorption, SPA) 和双光子吸收 (two-photon absorption, TPA) 都可以定量表征重离子在器件中引起的单粒子效应^[4-6],但不同的脉冲激光模拟方式,同样会引起不同电离径迹带来的电荷浓度分布差异,目前这方面还没有相关研究的工作报道。有鉴于此,定量地将单光子吸收电荷收集量与双光子吸收电荷收集量进行理论与试验对比分析,有一定的理论及应用价值。

1 激光模拟单粒子效应

半导体器件在激光辐照下,通过光电效应、康普顿散射和电子对效应发生电离。如果光子能量 ($h\nu$)

大于半导体带隙能量 (E_g),激光脉冲会在半导体材料中引起线性单光子吸收,产生高密度的电子和空穴,但如果光子的能量较低 $h\nu < E_g < 2h\nu$,此时一个光子能量不足以让一个电子完成带隙间的能量跃迁,但通过聚焦增加激光的光强,有较大的概率通过瞬时吸收两个光子可产生一个电子-空穴对,如图 1 所示。通过增加光强 (或每秒入射到材料上的光子数量) 可以增加双光子吸收的概率,因此双光子吸收是非线性的^[7-8]。对于大多数半导体来说,电离能介乎一个电子伏特 (窄带隙半导体) 至几个电子伏特 (宽带隙半导体) 之间。对于硅来说,带隙能量为 1.12 eV,因此,单光子吸收激光波长必须小于 1.10 μm,双光子吸收激光波长在 1.104~2.208 μm 之间。

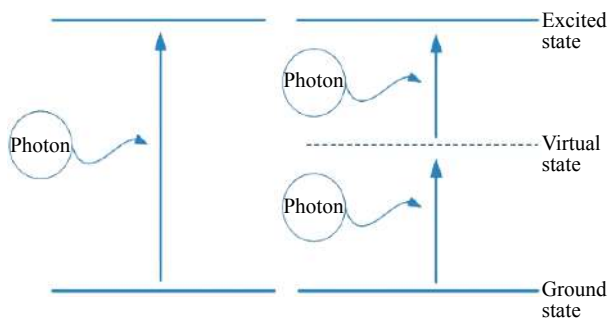


图 1 单光子和双光子吸收示意图

Fig.1 Diagram of single- and two-photon absorption

1.1 激光电离径迹

激光光束在硅中按照高斯分布,纵向剖面如图 2 所示。激光束半径 $r^2(z)$ 由下式给出:

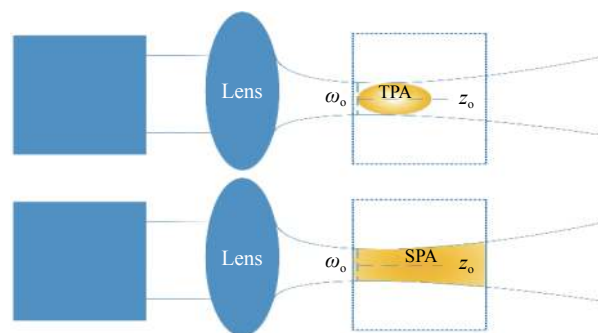


图 2 SPA 和 TPA 产生的电荷径迹分布图

Fig.2 Charge tracks generated by SPA and TPA

$$r^2(z) = r_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_0^2 n} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中： z 为在器件中的传播深度； r_0 为激光束的束腰斑半径； λ 为波长。激光束半径是影响双光子吸收电荷浓度分布的重要因素，光束半径越小，双光子吸收系数越大。

z_0 为共焦长度，代表束斑直径扩散到表面聚焦束斑 $\sqrt{2}$ 倍时的穿透深度^[9]。入射深度大于共焦长度后，笔者一般认为脉冲激光束开始发散。

$$z_0 = \pi n \frac{\omega_0^2}{\lambda} \quad (2)$$

如图 2 所示，分别表示 SPA 和 TPA 产生的电荷痕迹。单光子吸收时，激光束直径随着入射深度的扩大，在入射深度等于共焦长度的时候电荷密度减小了 2 倍。而双光子吸收需要足够的光强，因此，电离电荷集中在聚焦点附近。

1.2 电荷传播过程

激光在硅中传播，线性吸收系数会因光载流子和晶格的光吸收而变化。在较高的激光强度下，双光子吸收速率也增加，相应的吸收系数随辐射强度的变化而变化^[10]。对于均匀入射光束，这种效应可以用非线性方程来描述。光的吸收过程由以下等式决定：

$$\frac{dI(r,z)}{dz} = -\alpha_\lambda I(r,z) - \sigma N I(r,z) - \beta_\lambda I(r,z)^2 \quad (3)$$

式中： $I(r,z)$ 为半导体中的激光强度； σ 为自由载流子吸收横截面； N 为自由载流子密度； α 为单光子吸收系数； β_λ 为双光子吸收系数^[11-12]，求解方程得激光光强随辐照深度的函数：

$$I_a(x) = I_a(0) \frac{\exp(-\alpha x)}{1 + \left(\frac{\beta_\lambda I_a(0)}{\alpha} \right) [1 - \exp(-\alpha x)]} \quad (4)$$

式中： $I_a(x)$ 和 $I_a(0)$ 分别为内部和表面的激光强度，由于光的产生与基本吸收有关，所以电子-空穴对的产生速率为：

$$G(x) = \frac{\alpha I_a(x)}{h\nu} + \frac{\beta_\lambda I_a^2(x)}{2h\nu} \quad (5)$$

从公式 (5) 可以看出，当双光子吸收占主导地位时，因产生电子空穴对需要消耗两个光子，产生的电荷效率相比单光子吸收更低。当用 1.064 μm 的脉冲激光辐射硅时， β_λ 为 $3 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 α 为 10 cm^{-1} ，此时双光子吸收的相对贡献小于 10%。因此，1.064 μm

波长激光在模拟中，双光子吸收都可以忽略不计。

1.3 带隙变窄效应

载流子密度在带隙重整化和 Burstein-Moss(B-M) 漂移效应的相互作用下影响带隙能变化。在高掺杂器件中，带隙重整化能减小带隙，而 B-M 漂移却能增加带隙。在硅材料中，带隙重整化和 B-M 漂移的相互耦合作用减小了带隙，从而导致吸收系数增大。研究表明：脉冲激光波长为 1064 nm 左右时，吸收系数随掺杂浓度的增加变化较大，由此说明激光波长接近带隙能量时，吸收系数随掺杂浓度的变化较大^[13]。所以当使用光子能量远大于带隙能量的激光波长时，吸收系数随掺杂浓度变化可以忽略。

1.4 自由载流子吸收

载流子密度很高时，光子可以被自由载流子吸收。当光子频率和等离子体频率近似时，这种效应更明显^[14-15]。等离子体频率的计算公式为：

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m^* \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (6)$$

式中： m^* 为空穴有效质量； e 为电子电荷； ϵ_0 为真空介电常数； ϵ_r 为相对介电常数。对于硅而言，载流子密度为 10^{19} cm^{-3} ，有效质量为 0.15 m_0 (m_0 是电子静止质量)，相对介电常数为 10，得到等离子体密度为 10^{14} s^{-1} 。这个频率低于器件测试应用的典型的激光频率 $3 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ，因此，自由载流子吸收可以被忽略^[16-17]。

2 单光子与双光子对比分析

根据笔者之前的研究，通过选择合适的激光波长与能量可以忽略带隙变窄效应与自由载流子吸收的影响。根据能量的线性和非线性吸收特性，获得 SPA 及 TPA 等效重离子 LET 值计算公式为：

$$LET_{\text{SPA}} = (1 - R) \frac{E_{\text{ion}}(1 - \exp(-\alpha h))}{A \cdot E_{\text{photon}} \cdot h \cdot \rho} E_0 \quad (7)$$

$$LET_{\text{TPA}} = (1 - R) \frac{E_{\text{ion}} \cdot E_0 \left(1 - \frac{1}{1 + \beta_\lambda h \frac{E_0}{\omega \sigma}} \right)}{A \cdot 2E_{\text{photon}} \cdot h \cdot \rho} =$$

$$(1 - R) \frac{E_{\text{ion}} \beta_\lambda h}{A \cdot 2E_{\text{photon}} \cdot h \cdot \rho (\omega \sigma + \beta_\lambda h E_0)} E_0^2 \quad (8)$$

式中： E_{ion} 为重离子使材料电离的能量； ρ 为材料密度； E_{photon} 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。则脉冲激光诱导产生相同电荷所需 SPA 能量 E_S 和 TPA 能量 E_T 的比值为:

$$\frac{E_{ion}\beta_\lambda h}{A \cdot 2E_{TPA} \cdot h \cdot \rho(\omega\sigma + \beta_\lambda h E_T)} E_T^2 = \frac{E_{ion}(1 - \exp(-\alpha h))}{A \cdot E_{SPA} \cdot h \cdot \rho} E_S \quad (9)$$

$$\frac{E_S}{E_T^2} = \frac{\beta_\lambda h E_{SPA}}{2E_{TPA}(\omega\sigma + \beta_\lambda h E_T)(1 - \exp(-\alpha h))} \quad (10)$$

式中: E_{SPA} 为单光子吸收试验中脉冲激光的光子能量; E_{TPA} 为双光子吸收试验中脉冲激光的光子能量。从公式 (10) 可以看出, SPA 激光能量和 TPA 激光能量的平方都与激光诱导产生的电荷量具有线性关系, 当激光参数一定时, 理论上 SPA 诱导产生电荷量与 TPA 诱导产生电荷量存在相互关联。

3 脉冲激光模拟试验

试验选取 LM741 CH 运算放大器如图 3 所示, 是一种应用非常广泛的通用型运算放大器。



图 3 LM741 CH 运算放大器
Fig.3 LM741 CH operational amplifier

使用 -1.5 V 输入电压, 并且使用示波器监测输出信号的变化, 选择正面辐照方式, 100 倍物镜, 选取 1064 nm 波长、 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 光斑的脉冲激光进行单光子诱导单粒子效应试验, 选取 1200 nm 波长、 $1.9\text{ }\mu\text{m}$ 光斑的脉冲激光进行双光子诱导单粒子效应试验, 使用螺旋扫描确定器件的敏感区域, 之后将激光器对准器件的敏感区域, 再逐渐增加脉冲激光能量, 两个试验在同一个敏感点进行, 且保持 Z 轴距离不变, 在尽可能相同的试验条件下, 对比单光子与双光子吸收模拟试验的不同响应。

如图 4 和 5 所示, 脉冲激光模拟单粒子效应试验

中, 电荷沉积剖面有很强的依赖性。瞬态脉冲可以是正, 也可以是负, 这取决于器件中电荷的分布。而单光子吸收和双光子吸收有着不同的电荷分布方式, 造成了正负脉冲的差异。振幅和脉冲宽度随着能量的增大而增大, 同时单光子吸收脉冲响应时间更长, 可达到 $20\text{ }\mu\text{s}$ 。

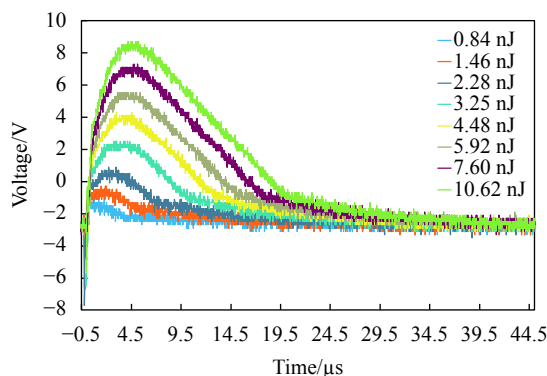


图 4 1064 nm 脉冲激光能量变化对 LM741 CH 运算放大器响应电压的影响

Fig.4 Influence of 1064 nm pulse laser energy variation on response voltage of LM741 CH operational amplifier

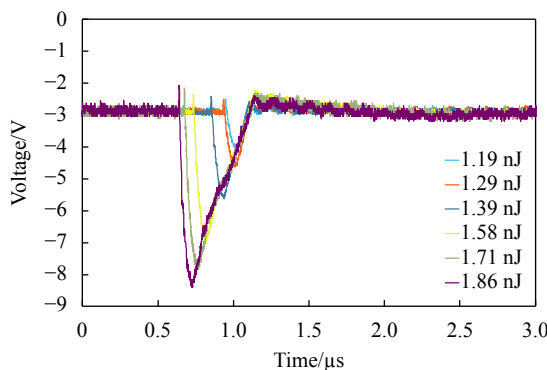


图 5 1200 nm 脉冲激光能量变化对 LM741 CH 运算放大器响应电压的影响

Fig.5 Influence of 1200 nm pulse laser energy variation on response voltage of LM741 CH operational amplifier

为了定量比较双、单光子吸收的脉冲响应结果, 将两者的激光能量的平方与电荷量关联起来。在单光子吸收试验中, 激光波长和光斑大小会影响能量与电荷产生。而对于双光子吸收, 激光波长、光斑大小、脉冲宽度都会影响能量与电荷产生, 其中更小的光斑尺寸会增大激光强度, 从而增大双光子吸收概率, 增大电荷的产生。基于此, 非线性光学试验很难

定量地进行。这里笔者通过固定的脉冲激光参数来确定双、单光子吸收脉冲激光模拟中的定量关系。

通过拟合脉冲幅值与能量或能量平方的关系,如图 6 所示,会发现,在双、单光子吸收试验中,随着能量或能量平方的增大,与脉冲幅值呈现良好的线性关系,这说明 LM741 CH 运算放大器双、单光子吸收产生电荷量之间存在一定的定量关系。通过公式 (10),可以看到拥有相同电荷产生能力 (LET 值) 的双、单光子吸收,能量与能量平方的比值是一个近似的定值,其中双光子吸收的能量会对比值有微小的影响,但 $\beta_{\lambda}hE_T$ 和 $\omega\sigma$ 相比,相差三个数量级,因此可以忽略能量的影响。把激光参数代入公式 (10),得到: $E_S/E_T^2 = 0.043$ 。

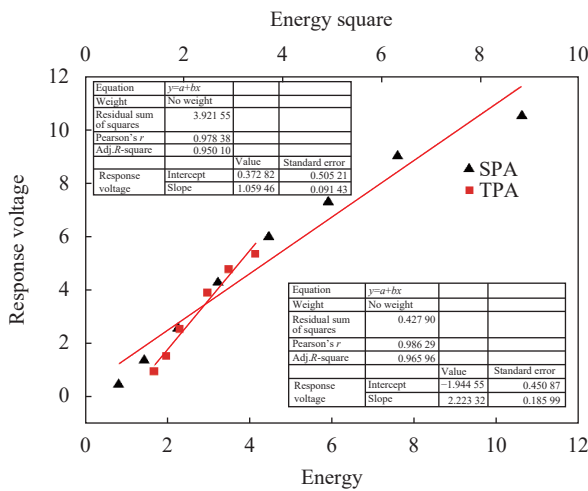


图 6 单光子 (双光子) 电压响应与能量 (能量平方) 线性关系拟合图
Fig.6 Fitting diagram of linear relationship between single-photon (two-photon) voltage response and energy (energy square)

脉冲幅值与运算放大器中产生电荷成正比,因此笔者用半高宽和对应幅值的乘积表征双、单光子吸收中生成的电荷总量,再与对应的能量或能量平方进行关联。

通过拟合电荷量与能量或能量平方的关系,如图 7 所示,在双、单光子吸收试验中,电荷量随能量或能量平方的变化呈现线性规律,并且单光子吸收电荷生成率明显高于双光子吸收,笔者用拟合得到的拟合直线斜率的比值来表示双、单光子吸收电荷量之间的定量关系。

$$\frac{K_{TPA}}{K_{SPA}} = \frac{0.285 55}{7.301 53} = 0.039 \approx 0.043 = \frac{E_S}{E_T^2} \quad (11)$$

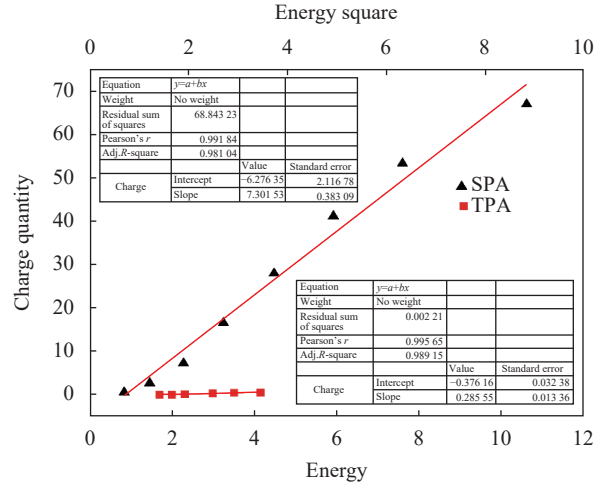


图 7 单光子 (双光子) 电荷量与能量 (能量平方) 线性关系拟合图
Fig.7 Fitting diagram of linear relation between charge amount of single-photon (two-photon) and energy (energy square)

可以看到,计算结果近似,因此,在双、单光子吸收试验中,电荷量之间存在着定量关系。即 $1 \text{ nJ}^2 \text{ 1200 nm}$ 波长脉冲激光在 LM741 CH 运算放大器中产生的电荷量,等同于 $0.039 \text{ nJ} \text{ 1064 nm}$ 波长脉冲激光产生的电荷量。理论计算数据大于试验数据,其原因在于经过器件金属布线层反射的脉冲激光再次入射器件敏感区域,此时双光子吸收脉冲反射激光无法聚焦,没有足够的光强来产生新的光致电离电荷,而单光子吸收脉冲反射激光经过光致电离产生新的电荷,导致 E_S 与 E_T^2 比值在试验中变小。

4 结 论

笔者采用 1064 nm 脉冲激光单光子吸收诱导单粒子效应和 1200 nm 脉冲激光双光子吸收诱导单粒子效应两种模拟方法,定量比较了 LM741 CH 运算放大器中激光辐照的电荷收集量。试验结果与推导公式计算结果基本吻合,确定了 LM741 CH 运算放大器中单、双光子吸收诱导电荷收集量的定量关系,即 1200 nm 脉冲激光 1 nJ^2 诱导电荷量等同于 1064 nm 脉冲激光 0.039 nJ 诱导电荷量。不同波长的脉冲激光,因为光子能量、光强、脉宽的不同,导致光致电离的能力与机理都会有不同。所以在脉冲激光模拟试验中,对不同波长及参数的脉冲激光产生诱导电荷的定量比较分析,有助于进一步研究双、单光子吸收脉冲激光模拟试验中器件单粒子效应翻转截面的差异

性,这方面有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Heidel D F, Marshall P W, Pellish J A, et al. Single-event upsets and multiple-bit upsets on a 45 nm SOI SRAM [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, 56(6): 3499-3504.
- [2] Hales J M, Khachatryan A, Roche N J H, et al. Simulation of laser-based two-photon absorption induced charge carrier generation in silicon [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, 62(4): 1550-1557.
- [3] Xapsos M A. Applicability of LET to single events in microelectronic structures [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1992, 39(6): 1613-1621.
- [4] Moss S C, LaLumondiere S D, Scarpulla J R, et al. Correlation of picosecond laser-induced latchup and energetic particle-induced latchup in CMOS test structures [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1995, 42(6): 1948-1956.
- [5] Chen D, Kim H, Phan A, et al. Single-event effect performance of a commercial embedded ReRAM [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, 61(6): 3088-3094.
- [6] Ferlet-Cavrois V, Pouget V, McMorrow D, et al. Investigation of the propagation induced pulse broadening (PIPB) effect on single event transients in SOI and bulk inverter chains [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, 55(6): 2842-2853.
- [7] Melinger J S, Buchner S, McMorrow D, et al. Critical evaluation of the pulsed laser method for single event effects testing and fundamental studies [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, 41(6): 2574-2584.
- [8] 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.
- [9] Johnston A H. Charge generation and collection in pn junctions excited with pulsed infrared lasers [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1993, 40(6): 1694-1702.
- [10] Loveless T D, Massengill L W, Bhuvu B L, et al. A single-event-hardened phase-locked loop fabricated in 130 nm CMOS [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, 54(6): 2012-2020.
- [11] Ranka J K, Gaeta A L, Baltuska A, et al. Autocorrelation measurement of 6-fs pulses based on the two-photon-induced photocurrent in a GaAsP photodiode [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(17): 1344-1346.
- [12] Kikuchi K. Highly sensitive interferometric autocorrelator using Si avalanche photodiode as two-photon absorber [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(1): 123-125.
- [13] McMorrow D, Buchner S, Lotshaw W T, et al. Demonstration of single-event effects induced by through-wafer two-photon absorption [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(6): 3553-3557.
- [14] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Dodd P E, et al. Comparison of single and two-photon absorption for laser characterization of single-event upsets in SOI SRAMs [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, 58(6): 2968-2975.
- [15] Hales J M, Roche N J H, Khachatryan A, et al. Strong correlation between experiment and simulation for two-photon absorption induced carrier generation [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, 64(5): 1133-1136.
- [16] Hales J M, Roche N J H, Khachatryan A, et al. Two-photon absorption induced single-event effects: Correlation between experiment and simulation [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, 62(6): 2867-2873.
- [17] Buchner S, McMorrow D, Melinger J, et al. Laboratory tests for single-event effects [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, 43(2): 678-686.