

SiGe BiCMOS 线性器件脉冲激光单粒子瞬态效应研究

安 恒,张晨光,杨生胜,薛玉雄,王光毅,王 俊

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘 要: 验证 SiGe BiCMOS 工艺线性器件的单粒子瞬态(Single Event Transient, SET)效应敏感性,选取典型运算放大器 THS4304 和稳压器 TPS760 进行了脉冲激光试验研究。试验中,通过能量逐渐逼近方法确定了其诱发 SET 效应的激光阈值能量,并通过逐点扫描的办法分析了器件内部单粒子效应敏感区域,并在此基础上分析了脉冲激光能量与 SET 脉冲的相互关系,获得了单粒子效应截面,为 SiGe BiCMOS 工艺器件在卫星电子系统的筛选应用以及抗辐射加固设计提供数据参考。

关键词: SiGe BiCMOS; 线性器件; 单粒子效应; 单粒子瞬态; 脉冲激光

中图分类号: TL99 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0320001

Investigation of single event transients on SiGe BiCMOS linear devices with pulsed laser

An Heng, Zhang Chenguang, Yang Shengsheng, Xue Yuxiong, Wang Guangyi, Wang Jun

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To verify the sensitivity of the single event transient effects of SiGe BiCMOS linear devices, a typical operational amplifier THS4304 and a voltage regulator TPS760 were selected to study the single event effects with pulsed laser. In the experiments, a method was proposed to determine the laser threshold energy of single event transient by gradual changing energy. And the sensitive region of single event effects within the device was analyzed by point-by-step scanning method. On this basis, the interaction between the pulse laser energy and the single event transient was analyzed, and the single event effects cross section was obtained, which provided a reference for the selection and application of the SiGe BiCMOS devices in the satellite electronic system and the design of the radiation hardening.

Key words: SiGe BiCMOS; linear device; single event effect; single event transient; pulse laser

收稿日期:2018-10-12; 修订日期:2018-11-29

基金项目:国家自然科学基金(11705073)

作者简介:安恒(1982-),男,高级工程师,硕士,主要从事空间辐射效应及新型有效载荷技术方面的研究。Email: ahllbl@126.com

0 引言

SiGe (Silicon-germanium) 器件具有良好的抗电离总剂量效应(TID)和单粒子效应(SEE)性能。基于 SiGe BiCMOS 工艺制成的晶体管器件,将 SiGe 异质结双极型晶体管(SiGe HBT)的高速、高驱动能力、低噪声同 CMOS 的低功耗、高集成度优势集成到一起,具有超高频、耐低温等特性^[1],被广泛应用于星载雷达以及通信系统中。近年来, SiGe BiCMOS 技术越来越受到业界的关注,在空间电子系统的应用也越来越普遍^[2]。研究表明: SiGe HBT 对单粒子效应非常敏感,空间粒子入射易造成其相关电路失效^[3-4]。文中针对 SiGe BiCMOS 工艺的线性器件进行了脉冲激光模拟单粒子效应试验研究。以线性运算放大器和稳压器为研究对象,分析了脉冲激光在 SiGe 材料中的传播以及 SET 脉冲随激光能量的变化^[5],然后基于皮秒脉冲激光单粒子效应模拟试验设备,选取典型 SiGe BiCMOS 工艺的运算放大器 THS4304 和稳压器 TPS760 进行了脉冲激光单粒子效应试验研究,分析了脉冲激光能量与 SET 脉冲的相互关系,获得了单粒子效应截面,为 SiGe BiCMOS 工艺器件在卫星电子系统的筛选应用以及抗辐射加固设计提供数据参考。

1 脉冲激光诱发单粒子效应机理

脉冲激光照射到半导体材料内时,考虑到光子吸收产生的自由载流子对光子的吸收过程影响,其激光强度、自由载流子密度随时间的变化用下式表示:

$$\frac{dI(r,z,t)}{dz} = -\beta_2 I^2(r,z,t) - \sigma_{FAZ} N(r,z,t) I(r,z,t) \quad (1)$$

$$\frac{dN(r,z,t)}{dt} = \frac{\beta_2 I^2(r,z,t)}{2h\nu} - \frac{N(r,z,t)}{\tau} \quad (2)$$

式中: I 为脉冲激光辐照强度; N 为自由载流子(电子空穴对)密度; β_2 为双光子非线性吸收系数; σ_{FAZ} 为自由载流子吸收截面; τ 为载流子复合寿命; r 为激光束斑半径大小; z 为半导体材料内激光传播距离; t 为时间。

在脉冲激光模拟单粒子效应试验中,一般采用光学聚焦系统对脉冲激光束进行聚焦后照射到半导

体器件表面上,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时,聚焦光束的束斑强度分布一般为高斯形态,公式(3)~(5)分别给出了高斯型束斑传输过程中束斑强度分布、束腰随传播距离变化及焦点位置的计算表达式^[6]。图 1 给出了高斯型束斑诱发的电子-空穴对空间的分布情况。

$$I = \frac{2P}{\pi\omega^2} \exp(-2r^2/\omega^2) \quad (3)$$

式中: ω 为脉冲激光束束腰; P 为脉冲激光功率密度。当脉冲激光束在半导体材料中传播时,脉冲激光束束腰随传播距离的变化为:

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0 n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$z_0 = \pm \frac{\pi n \omega_0^2}{\lambda} \quad (5)$$

式中: λ 为脉冲激光波长; n 为半导体材料的折射率大小; ω_0 为线性聚焦点处脉冲激光束斑大小; z_0 为聚焦点位置。

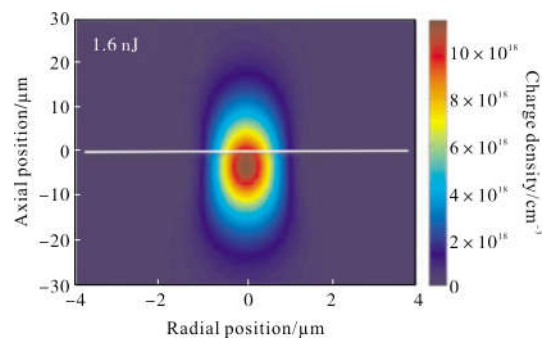


图 1 高斯型束斑诱发的电子-空穴对空间分布情况

Fig.1 Distribution of electron-holes pairs induced by Gaussian beam-spot

产生的自由载流子分布的一般解析表达式如下:

$$\frac{dN(r,z,t)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\beta_2 I(r,z,t)^2}{h\nu} \quad (6)$$

式中: $h\nu$ 为光子能量。其中 I 的分布特点决定了脉冲激光产生电荷的时空相关性及时空分布特征。在飞秒脉冲激光双光子吸收条件下,自由载流子的产生时间一般在几百飞秒范围内,空间分布范围在几个微米范围内。一般情况下,认为聚焦脉冲激光束在空间和时间的分布上为高斯分布,对方程(6)进行时间积分,就可以得出脉冲激光产生电子空穴对的空间

分布 $N(r, z)$ 。收集电荷的多少取决于电子空穴对的扩散、漂移及聚集等运动过程,如果忽略电荷收集的“聚集效应”,则可以得出最大收集电荷量的大小为:

$$Q_{\max} = q \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{\beta_2 I^2 n}{k h c} \quad (7)$$

式中: I 为进入半导体材料内部的脉冲激光能量(必须考虑材料表面对激光的反射等因素); k 为激光脉冲传播过程中,在 $1/e$ 入射长度处的脉冲半宽高; q 为电子电荷。在实际情况下,电子器件的敏感体积大小是有限的,即计算测量收集电荷量大小,应对整个敏感体积范围进行积分,如采用敏感体积 RPP 模型的空间尺寸大小来决定收集电荷量的大小。在这种假设条件下,可以得出收集电荷量近似表达式如下:

$$Q = \frac{Q_{\max}}{\pi} \left(\arctan \left[\frac{z - z_{foc}}{z_0} \right] - \arctan \left[\frac{-z_{foc}}{z_0} \right] \right) \quad (8)$$

式中: z 为激光束传播轴向方向上的 RPP 的尺寸大小; z_{foc} 为聚焦脉冲激光束焦点在轴向的位置坐标; z_0 为 Rayleigh 长度,即从焦点位置算起,脉冲激光强度降为一半时的传播距离^[7-9]。

2 试验器件及过程分析

2.1 试验器件

SiGe BiCMOS 器件具有良好的抗辐射性,在无线电、反应堆以及空间应用方面具有明显优势和广阔前景。在进行脉冲激光模拟单粒子效应试验时,选用空间电子系统设计中常用的运算放大器和稳压器,研究其 SET 效应敏感性。

(1) 宽带运算放大器 THS4303

THS4303 低功耗 SiGe BiCMOS 工艺运算放大器是由 TI 公司生产制造,是低功耗、18 mA 低压、高速宽带运算放大器。其外形封装引脚如图 2 所示。

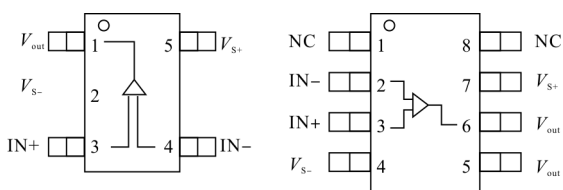


图 2 THS4303 器件封装形式

Fig.2 Packaging for THS4303

(2) 低功耗稳压器 TPS760

试验样品选取了 TI 公司生产制造的 TPS760 系列低功耗 SiGe BiCMOS 工艺的稳压器,该测试器件是低功耗、50 mA 低压降线性稳压器。其外形封装引脚如图 3 所示。

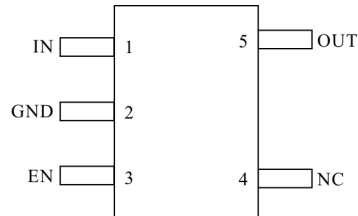


图 3 TPS760 器件封装形式

Fig.3 Packaging for TPS760

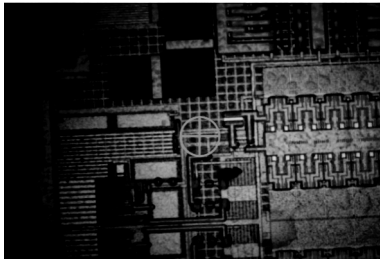
2.2 试验过程

在试验前,对器件进行了揭盖处理,揭盖处理后,通过测试仪器对器件性能进行了检测,器件检测合格后安装在试验被测电路上,并利用测试系统进行性能检测,保证器件在揭盖后工作正常^[10-12]。试验过程中,首先采用能量为 20.0 nJ 的脉冲激光束进行器件局部扫描照射,探索内部功能电路部分可能存在的单粒子效应敏感性^[13],然后,通过改变脉冲激光能量,选择器件内部不同单粒子效应敏感部位,获得其发生 SET 事件的特征参数。在器件内部 SET 的敏感位置处,通过试验获取其 SET 波形随入射脉冲激光能量的变化特征,进而得到 SET 截面随脉冲激光能量的变化曲线。

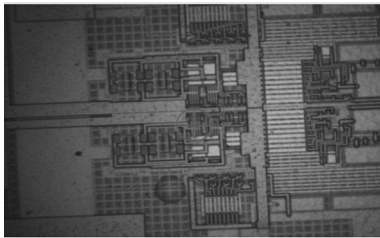
3 结果分析与讨论

3.1 运算放大器 THS4304 的 SET 效应分析

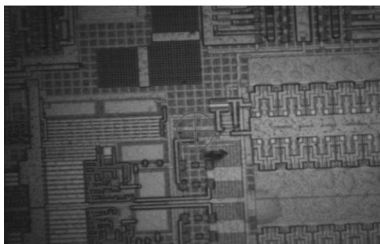
试验中选取的脉冲激光能量为 2.0、3.0、6.0、13.0 nJ,在不同能量脉冲激光束照射下,分别观察和记录发生 SET 翻转时的临界脉冲激光能量和相应电路敏感性参数变化情况。试验中发现,运算放大器 THS4304 器件内部发生 SET 的脉冲激光能量阈值小于或等于 2.0 nJ,这说明该器件对重离子和高能质子诱发 SET 现象十分敏感,另外,实验中也观测到当出现 SET 现象时,器件的输入电流有一定程度变化。不同能量下观测到的 SET 敏感位置如图 4 所示。



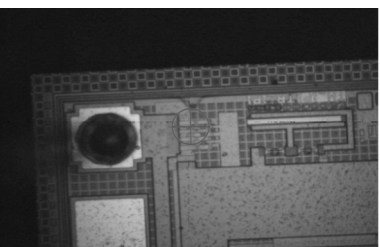
(a) 敏感位置 1: 脉冲激光能量为 13 nJ
(a) Sensitive area 1#: pulse laser energy is 13 nJ



(b) 敏感位置 2: 脉冲激光能量 6 nJ
(b) Sensitive area 2#: pulse laser energy is 6 nJ



(c) 敏感位置 3: 脉冲激光能量为 3 nJ
(c) Sensitive area 3#: pulse laser energy is 3 nJ



(d) 敏感位置 4: 脉冲激光能量 2 nJ
(d) Sensitive area 4#: pulse laser energy is 2 nJ

图 4 被测器件发生 SET 的敏感位置

Fig.4 Sensitive area for SET of DUT

试验扫描照射方式设为 1 995 个扫描辐照点组成的长方形扫描点阵, 脉冲激光能量选取范围为 2.0~40.0 nJ, 试验中获取的数据如表 1 所示。

表 1 中可以看出, 随着脉冲激光能量的增大, 运算放大器 THS4304 器件 SET 敏感性增强。SET 截面

最小约为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, 最大约为 $2.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 。图 5 为 SET 截面随脉冲激光能量的变化曲线。

表 1 运算放大器 THS4304 器件的 SET 截面
Tab.1 SET cross section of operational amplifier THS4304

Laser energy E/nJ	SET/ n	Cross section $\sigma_{\text{SET}}/\text{cm}^2$
2	5	2.5×10^{-3}
5	13	6.5×10^{-3}
10	23	1.15×10^{-2}
20	26	1.3×10^{-2}
25	40	2.0×10^{-2}
30	45	2.25×10^{-2}
35	46	2.3×10^{-2}
40	40	2.0×10^{-2}

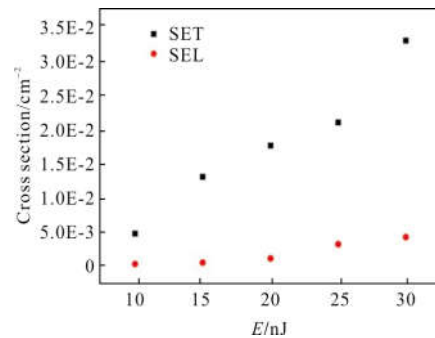


图 5 SET 截面随激光能量的变化

Fig.5 SET cross section as a function of laser energy

从图 5 中可以看出: 随着脉冲激光能量的增大, SET 截面逐渐增大, 最后达到饱和状态。

为了分析 SET 脉冲波形随脉冲激光能量的变化, 试验中脉冲激光能量依次为 20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120 nJ, 依次在敏感位置 1 处进行辐照试验。图 6 所示为运算放大器 THS4304 敏感位置 1 处 SET 波形随能量 E 的变化曲线。

从图 6 可以看出, SET 波形构成以一个“负向脉冲”, 在负向出现“拖峰”后伴随着出现“正向脉冲”的“尾峰”。当入射脉冲激光能量较低时, 诱发的 SET 波形的脉冲宽度或半峰高宽度较小, 脉冲幅值也较低; 随着入射脉冲激光束能量增大, SET 波型的脉冲宽度和脉冲幅值均会增大; 当脉冲激光能量为 20 nJ 时, 脉冲宽度约为 10 ns, 脉冲幅值约为 1.5 V; 而当脉冲激光能量高达 120 nJ 时, 脉冲宽度约为 30 ns,

脉冲幅值约为 2.0 V。

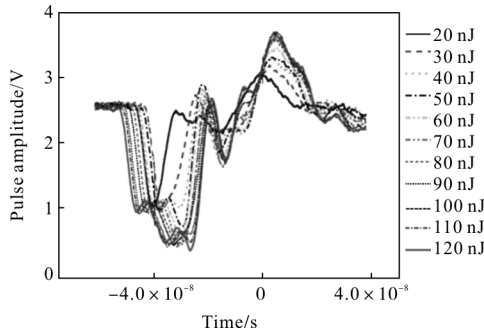


图 6 SET 波形随能量 E 的变化曲线(敏感位置 1)

Fig.6 Single event transient waveform as a function of laser energy E (sensitive area 1#)

图 7 为运算放大器 THS4304 敏感位置 2 处 SET 波形随激光能量 E 的变化曲线。

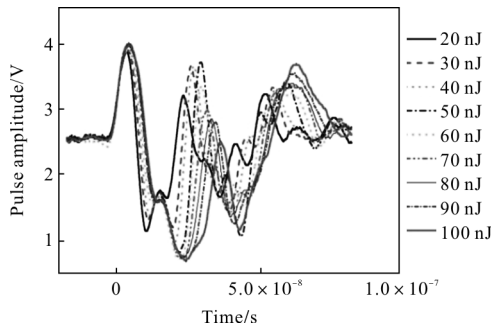


图 7 SET 波形随能量 E 的变化曲线(敏感位置 2)

Fig.7 Single event transient waveform as a function of laser energy E (sensitive area 2#)

从图 7 可以看出, 该位置处诱发的 SET 波形与敏感位置 1 处诱发的 SET 波形不同; 在一个“正向脉冲”后, 才出现了主“负向脉冲”, 随后又伴随着一个“负向脉冲”加“正向脉冲”式的“拖峰”, 前“正向脉冲”脉冲宽度及脉冲幅值随着入射脉冲激光束能量的变化不太明显, 而“负向脉冲”的特征随着入射脉冲激光束能量的变化明显; 当脉冲激光能量较低时, 诱发的 SET 波型的脉冲宽度或半峰高宽度较小, 脉冲幅值也较低; 随着入射脉冲激光束能量增大, SET 波型的脉冲宽度和脉冲幅值均会增大; 当脉冲激光能量为 20 nJ 时, 脉冲宽度约为 15 ns, 脉冲幅值约为 1.3 V; 而当脉冲激光能量高达 100 nJ 时, 脉冲宽度约为 30 ns, 脉冲幅值约为 2.5 V。

3.2 稳压器 TPS760 的 SET 效应分析

在试验过程中, 采用不同能量的脉冲激光束, 针

对器件内部一定位置的敏感区域进行扫描照射试验, 获取 TPS760 单粒子锁定 (Single Event Latchup, SEL) 和 SET 截面大小随脉冲激光能量变化情况。试验扫描照射方式设为 9 636 个扫描辐照点组成的长方形扫描点阵, 脉冲激光能量选取范围为 10.0~30.0 nJ, 试验中获取的数据如表 2 所示。

表 2 稳压器 TPS760 的 SEL 和 SET 截面

Tab.2 SEL and SET cross section of TPS760

Laser energy/nJ	SET/times	SEL/times	Cross section σ_{SET}/cm^2	Cross section σ_{SEL}/cm^2
10	45	2	4.67×10^{-3}	2.08×10^{-4}
15	125	4	1.3×10^{-2}	4.15×10^{-4}
20	170	10	1.76×10^{-2}	1.03×10^{-3}
25	205	30	2.1×10^{-2}	3.11×10^{-3}
30	320	40	3.3×10^{-2}	4.15×10^{-3}

从表 2 中的数据可以看出: 随着脉冲激光能量的增大, 稳压器 TPS760 器件 SEL 和瞬态敏感性增强。SEL 截面最小约为 $2.08 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, 最大约为 $4.15 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 。SET 截面最小约为 $4.67 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, 最大约为 $3.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 。图 8 为 SEL 和瞬态翻转截面随脉冲激光能量的变化曲线。从图 8 中可以看出: 随着脉冲激光能量的增大, SEL 截面逐渐增大, 最后达到饱和状态, SET 截面也逐渐增大, 但仍未达到饱和状态。

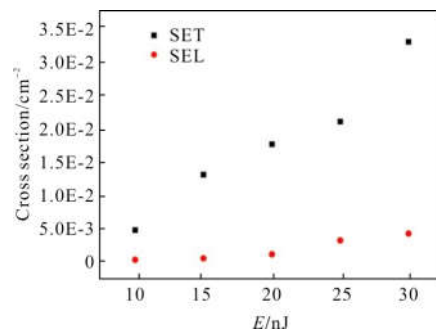


图 8 SEL 和瞬态 (SET) 截面随激光能量变化曲线

Fig.8 SEL and SET cross section as a function of laser energy

在试验过程中, 针对 TPS760 试验器件内部发生 SET 的不同敏感位置, 采用不同能量的脉冲激光束进行照射, 获取了试验样品 SET 波形随脉冲激光能量的变化情况。

图 9 为在敏感位置 1 处, TPS760 SET 波形随能

量 E 的变化曲线和试验样品发生 SET 的敏感位置。

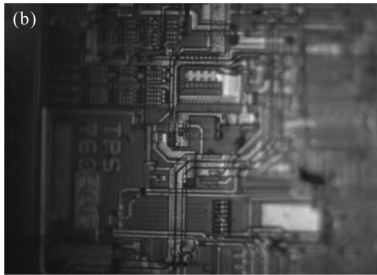
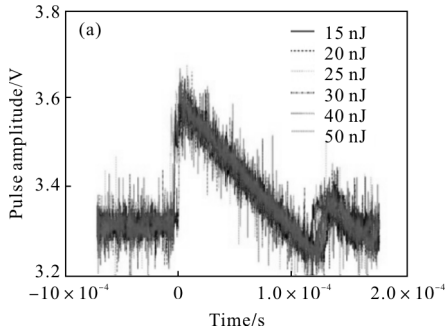
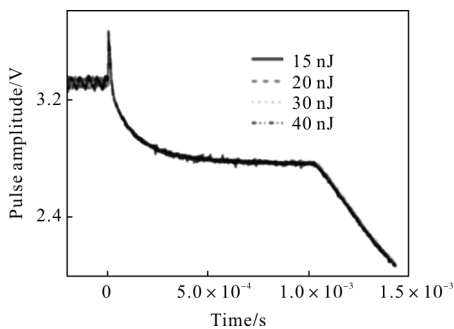


图 9 SET 波形随能量 E 的变化曲线(敏感位置 1)
Fig.9 Single event transient waveform as a function of laser energy E (sensitive area 1#)

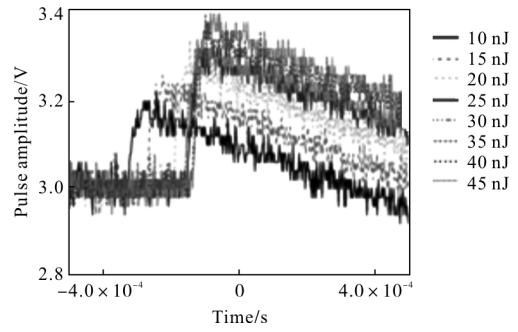
从图 9 可以看出:SET 波形构成以一个主“正向脉冲”为主,在负向次“拖峰”后伴随着出现“正向脉冲”的“尾峰”。当入射脉冲激光能量在 15~50 nJ 范围内变化时,诱发的 SET 波形的脉冲宽度或半峰高宽度变化不大,脉冲幅值变化也不明显;当脉冲激光能量在 15~50 nJ 范围内时,脉冲宽度约为 100 ns,脉冲幅值变化值约为 0.30 V。

另外,在试验中还出现了如图 10(a)、(b)所示的 SET 脉冲波形。

从图 10(a)可以看出:该位置处诱发的 SET 波形与敏感位置 1 处诱发的 SET 波形不同;在一个宽度较窄“正向脉冲”后才出现了主“负向脉冲”,随后又



(a) 敏感位置 2
(a) Sensitive area 2#



(b) 敏感位置 3
(b) Sensitive area 3#

图 10 SET 波形随能量 E 的变化曲线

Fig.10 Single event transient waveform as a function of laser energy E

伴随着一个“负向脉冲”,该处产生脉冲的脉冲宽度及脉冲幅值随着入射脉冲激光束能量的变化不太明显,当入射脉冲激光能量在 15~40 nJ 范围内变化时,诱发的 SET 波形的脉冲宽度或半峰高宽度变化不大,脉冲幅值变化也不明显;当脉冲激光能量在 15~40 nJ 范围内时,脉冲宽度约为 1 ms,脉冲幅值约为 1.30 V。

从图 10(b)中可以看出:该位置处诱发的 SET 波形与敏感位置 1 诱发的 SET 波形有相似之处,其构成以一个主“正向脉冲”为主。当脉冲激光能量较低时,诱发的 SET 波形的脉冲宽度或半峰高宽度较小,脉冲幅值也较低;随着入射脉冲激光束能量增大,SET 波形的脉冲宽度和脉冲幅值均会增大;当脉冲激光能量为 10 nJ 时,脉冲宽度约为 20 ns,脉冲幅值约为 0.2 V;而当脉冲激光能量高达 45.0 nJ 时,脉冲宽度约为 50 ns,脉冲幅值约为 0.40 V。

4 结 论

利用皮秒脉冲激光模拟验证了 SiGe BiCMOS 线性器件的 SET 效应,获取了 SET 效应波形及截面随脉冲激光能量变化的相互关系。实验中发现,运算放大器 THS4304 器件诱发的 SET 波形的脉冲宽度或半峰高宽度随着入射脉冲激光束能量增大均会增大;当脉冲激光能量在 15.0~120.0 nJ 范围内时,诱发运算放大器 THS4304 产生的 SET 脉冲宽度处于 10~50 ns 范围内,脉冲幅值处于 1.5~3.2 V 范围内。同时,试验结果表明:随着脉冲激光能量的增大,运算放大器 THS4304 器件 SET 敏感性增强;SET 截面最小

约为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, 最大约为 $2.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 。随着激光能量增大, SET 截面逐渐增大, 最后达到饱和状态。同样, 在稳压器 TPS760 器件的脉冲激光模拟单粒子效应试验中, SET 波形也出现类似随脉冲激光能量增大而瞬态脉冲宽度和脉冲幅值均增大的变化趋势, 当脉冲激光能量在 15.0~50.0 nJ 范围内时, 诱发稳压器 TPS760 产生的 SET 脉冲宽度处于 50~100 ns 范围内, 脉冲幅值处于 0.3~1.5 V 范围内。而其 SEL 截面最小约为 $2.08 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, 最大约为 $4.15 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, SET 截面最小约为 $4.67 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, 最大约为 $3.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 。随着激光能量增大, SEL 截面逐渐增大, 最后达到饱和状态, 单粒子瞬态截面逐渐增大, 但仍未达到饱和状态。

参考文献:

- [1] Li Hongzheng. Discussion of SiGe BiCMOS technology process integration [J]. *Electronics and Packaging*, 2012, 15 (12): 34-37. (in Chinese)
李红征. SiGe BiCMOS 工艺集成技术研究[J]. 电子与封装, 2012, 15(12): 34-37.
- [2] Rao J B L, Mital R, Patel D P, et al. Low-cost phased array antenna for satellite communications on mobile earth stations [C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology, 2013: 214-219.
- [3] Zhang Jinxin, Guo Hongxia, Wen Lin, et al. Influencing factors of SiGe heterojunction bipolar transistor single-event effect in laser microbeam simulation test [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2433-2438.
张晋新, 郭红霞, 文林, 等. 锗硅异质结晶体管单粒子效应激光微束模拟[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(9): 2433-2438.
- [4] Cao Zhou, Xue Yuxiong, Yang Shiyu, et al. Laser simulation of single event effects[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2006, 12 (3): 166-172. (in Chinese)
曹洲, 薛玉雄, 杨世宇, 等. 单粒子效应激光模拟试验技术研究[J]. 真空与低温, 2006, 12(3): 166-172.
- [5] Chugg A, Jones R, Moutrie M, et al. Probing the charge-collection sensitivity profile using a picosecond pulsed laser at a range of wavelength[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 49(6): 2969-2976.
- [6] Buchner Stephen P, Florent Miller, Vincent Pouget, et al. Pulsed-laser testing for single-event effects investigations[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, 60(3): 1852-1875.
- [7] Pease R L, Sternberg A L, Boulghassoul Y, et al. Comparison of SET's in bipolar linear circuits generated with an ion microbeam, laser light and circuit simulation [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 49 (6): 3163-3170.
- [8] Wang Dekun, Cao Zhou, Liu Hainan, et al. Backside piuse laser testing for single event effect [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2011, 45(7): 884-887. (in Chinese)
王德坤, 曹洲, 刘海南, 等. 脉冲激光背照射单粒子效应实验研究[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(7): 884-887.
- [9] Egorov A N, Chumakov A I, Mavritskiy O B, et al. Femtosecond laser simulation facility for SEE IC testing[C]//2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop Record, 2014: 247-250.
- [10] Gordienko A V, Mavritskii O B, Egorov A N, et al. Correlation of the ionisation response at selected points of IC sensitive regions with SEE sensitivity parameters under pulsed laser irradiation[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(12): 1173-1178.
- [11] Armstrong S E, Loveless T D, Hicks J R, et al. Phase-dependent single-event sensitivity analysis of high-speed A/MS circuits extracted from asynchronous measurements [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 58 (6): 1066-1071.
- [12] Wang Hongbo, Li Qin. Radiation effects and protection technology for optical components of fiber optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 682-687. (in Chinese)
王洪波, 李勤. 光纤陀螺光学器件的空间辐射效应及防护技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 682-687.
- [13] Zhang Hao, Wang Xincheng, Li Bo, et al. Research on single event latchup protection technology for micro-satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1444-1449. (in Chinese)
张昊, 王新升, 李博, 等. 微小卫星单粒子闩锁防护技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1444-1449.