

文章编号: 2095-4980(2021)02-0352-04

PDSOI NMOS 器件激光模拟光电流效应

任尚清^{a,b}, 王博博^{a,b}, 蒋春生^{a,b}, 钟乐^{a,b}, 孙鹏^{a,b}, 解磊^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为获得N型金属氧化物半导体(NMOS)器件在 γ 射线辐照条件下的光电流特性, 采用激光模拟技术, 利用部分耗尽型绝缘体上硅(PDSOI)工艺NMOS器件进行激光照射试验, 获得不同尺寸和拓扑结构器件在激光照射条件下光电流和激光入射能量之间的关系。利用TCAD仿真工具进行器件的光电流仿真, 对比TCAD仿真与激光模拟试验数据, 两组数据结果基本一致, 验证了激光模拟技术的可行性和准确性。通过与理论计算得到的光电流进行对比, 获得了理论计算与试验光电流之间的关系, 并由此得到器件寄生双极晶体管在激光照射条件下的放大倍数。

关键词: N型金属氧化物半导体器件; 部分耗尽型绝缘体上硅; 激光模拟; 光电流

中图分类号: TN304.2⁺¹

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019450

Photocurrent effect of PDSOI NMOS device by laser simulation

REN Shangqing^{a,b}, WANG Bobo^{a,b}, JIANG Chunsheng^{a,b}, ZHONG Le^{a,b}, SUN Peng^{a,b}, XIE Lei^{a,b}
(a. Microsystems and Terahertz Research Center, Chengdu Sichuan 610200, China; b. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The laser simulation method is adopted to study the photocurrent characteristics of N-Metal-Oxide-Semiconductor(NMOS) devices under gamma ray irradiation. The laser experiments are carried out, and the relationship between photocurrent and laser incident energy is obtained for Partial-Depleted Silicon On Insulator(PDSOI) NMOS devices with different sizes and different structures. The photocurrent characteristics of devices are simulated by using TCAD simulation tool. By comparing TCAD simulation and laser experiment data, the results of the two groups of data are basically consistent, which verifies the feasibility and accuracy of the laser simulation technology. The relationship of photocurrent between theoretical calculations and laser experiments is obtained, based on which, the magnification factor of the parasitic bipolar transistor is calculated under the laser condition.

Keywords: NMOS device; Partial-Depleted Silicon On Insulator; laser simulation; photocurrent

随着传统体硅 CMOS 工艺技术特征尺寸的不断缩小, CMOS 工艺在工艺复杂度、漏电及研发成本等方面面临着越来越大的挑战^[1]。绝缘体上硅(SOI)工艺, 以其独特的结构, 即全介质隔离和埋氧隔离, 具有工艺简单, 集成度高, 功耗低等优点, 成为学术界及产业界关注的重点^[2-3]。SOI 工艺分为部分耗尽型 SOI(PDSOI)和全耗尽型 SOI, 其中 PDSOI 不存在前后栅之间的耦合作用^[4], 获得更多应用。SOI MOS 器件还具有良好的抗门锁效应和抗单粒子效应能力, 扩展了 SOI 工艺的应用领域^[5-7]。尽管 SOI 工艺器件体积相比于传统器件大大减小, 但在脉冲 γ 射线辐照条件下依然会表现出明显的光电流效应。传统的脉冲 γ 射线辐照试验环境非常复杂, 试验成本昂贵, 时间周期长, 不利于器件的光电流效应研究^[8], 因此开发新的等效试验环境条件显得尤为必要^[9-12]。本文采用激光模拟技术开展 PDSOI NMOS 器件的光电流效应研究。

1 激光模拟原理

根据 Habing^[13]的研究, 脉冲激光可在半导体材料中产生与脉冲 γ 射线辐照相似的电学特性。特定波长的脉

收稿日期: 2019-11-07; 修回日期: 2020-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(619041164)

作者简介: 任尚清(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为 SOI 器件、工艺及可靠性研究。email:renshangqing_mtrc@caep.cn

冲激光照射到半导体材料上会将激光能量均匀沉积在半导体材料上，从而激发出电子—空穴对，并在耗尽层电场作用下形成光电流。因此实验选择的激光所产生的光子能量应该大于硅(Si)的禁带宽度。本实验使用的激光波长 $\lambda=1\ 064\ \text{nm}$ ，根据光子能量计算公式： $E_0=hc/\lambda$ ，其中 $h=6.625\times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}$ 为普朗克常量， $c=2.998\times 10^8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为真空中光速，因此光子能量为 1.17 eV，略大于 Si 的禁带宽度。

引用 γ 射线辐照理论， $1\ \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的辐照在 Si 材料中的电子—空穴对产生因子 $g_0=4.3\times 10^{13}\ \text{rad}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，电子产生率 G 为：

$$G = g_0 \times D \tag{1}$$

式中 D 为剂量率($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)^[14]。

实验中使用的激光的脉宽 $W=10\ \text{ns}$ ，激光光斑直径 $d=4\ \text{mm}$ 。因此激光的功率密度 P 为：

$$P = \frac{J}{W \times \pi \times (d/2)^2} \tag{2}$$

式中 J 为激光能量。

激光能量与等效剂量率之间的关系为：

$$D = K \times P \tag{3}$$

式中 K 为拟合系数。

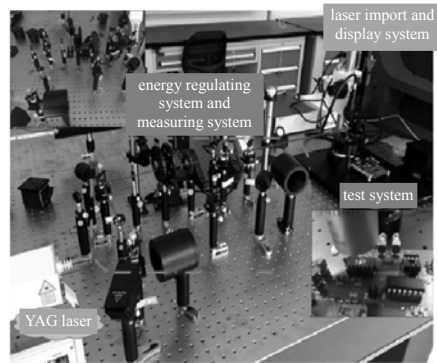
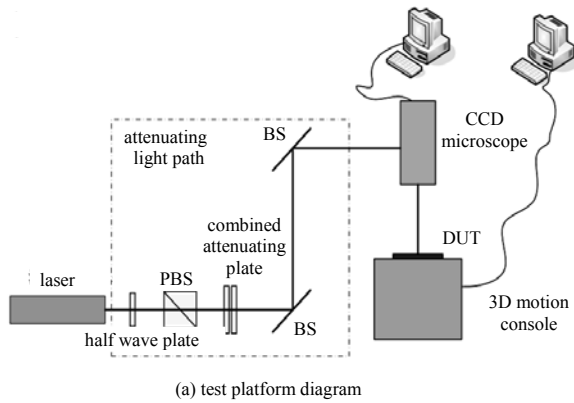
在激光照射下，半导体器件产生的光电流 I_g 为：

$$I_g = qGV\beta \tag{4}$$

式中： q 为单位电荷； V 为待测器件在激光辐照下的灵敏体积； β 为放大系数^[15-16]。

2 激光模拟实验

激光模拟实验在中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心的激光模拟实验研究平台上开展。平台由激光器、调节光路、控制与测试系统组成，图 1 为试验平台原理示意图和试验平台实物图。



(a) test platform diagram

(b) laser simulation facility

Fig.1 Schematic diagram
图 1 激光模拟试验平台

实验中的测试器件为采用 PDSOI 工艺的 T 栅结构 MOS 器件。器件硅膜厚度为 100 nm，器件沟道宽长比(W/L)分别为 $100\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$ (1.2 V, 3.3 V 工作电压)、 $60\ \mu\text{m}/0.13\ \mu\text{m}$ (1.2 V 工作电压)、 $60\ \mu\text{m}/0.35\ \mu\text{m}$ (3.3V 工作电压)。其中，沟道宽长比为 $60\ \mu\text{m}/0.13\ \mu\text{m}$ 和 $60\ \mu\text{m}/0.35\ \mu\text{m}$ 的器件均为 200 个器件并联结构，以提高实验的信号响应。

激光模拟试验测试电路如图 2 所示。测试器件(DUT)漏端串联一个上拉电阻后接电源正极，源端串联一个电阻后接地，串联电阻用以提供合适的静态偏置电压。由于光电流数值在微安量级，为保证测试的准确性，采用了间接测试光电流的方法，即采用跨足放大器电路测量输出电压，通过计算输出电压和电阻的比值确定光电流的大小。

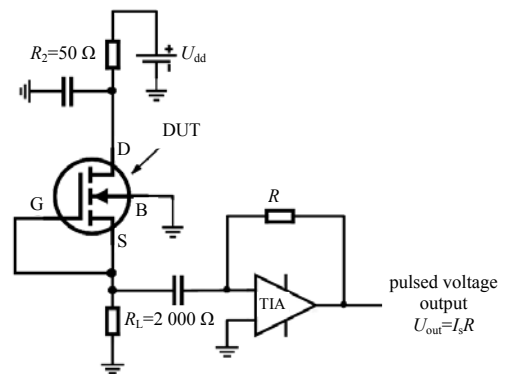


Fig.2 Test circuit for laser simulation
图 2 激光模拟试验测试电路图

3 实验数据与分析

对于不同工作电压、不同结构的 PDSOI NMOS 器件, 在激光模拟试验中表现出类似的光电特性, 因此以工作电压为 1.2 V, $W/L=60\ \mu\text{m}/0.13\ \mu\text{m}$, 200 并联的 T 栅器件作为样品进行分析。

图 3 为在脉冲激光照射下输出的脉冲电压波形。随着激光能量的增大, 输出的脉冲电压幅值呈线性增大, 如图 4 所示。通过式 $U_{\text{out}}=I_s R$ ($R=74\ \text{k}\Omega$), 可得到器件源端的光电流 I_s 。图 5 为待测器件源端电流与激光能量之间的关系曲线。根据式(2)~(3)可得到激光能量与 γ 辐照剂量率之间的关系, 拟合系数 $K=5.96\times 10^5\ \text{rad}(\text{Si})\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2[9,17]}$, 图 6 为激光模拟试验条件下等效剂量率与光电流之间的关系曲线。

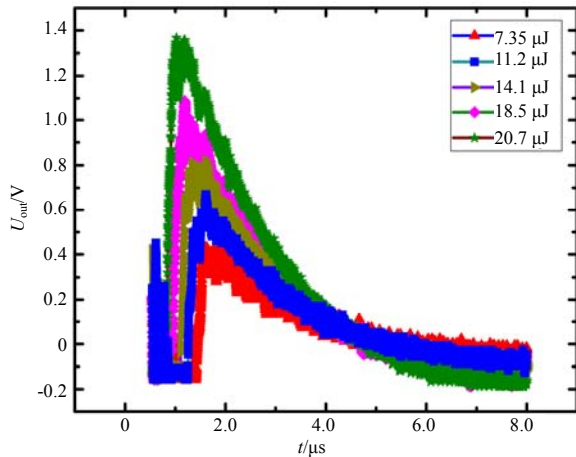


Fig.3 Output $U-t$ curves of laser simulation experiment
图 3 测试电路输出电压随时间变化曲线

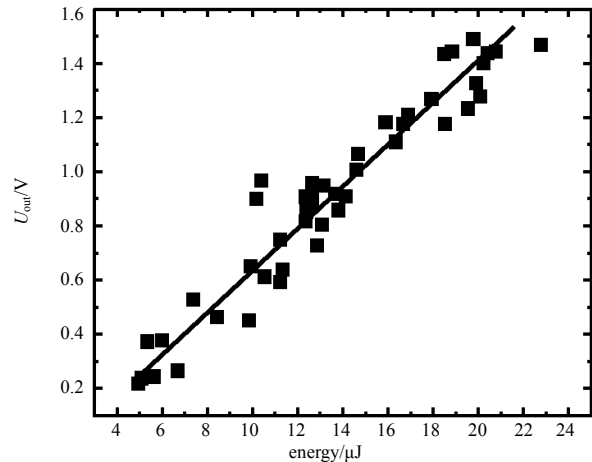


Fig.4 Output $U-E$ curve of laser simulation experiment
图 4 测试电路输出电压与激光能量之间的关系曲线

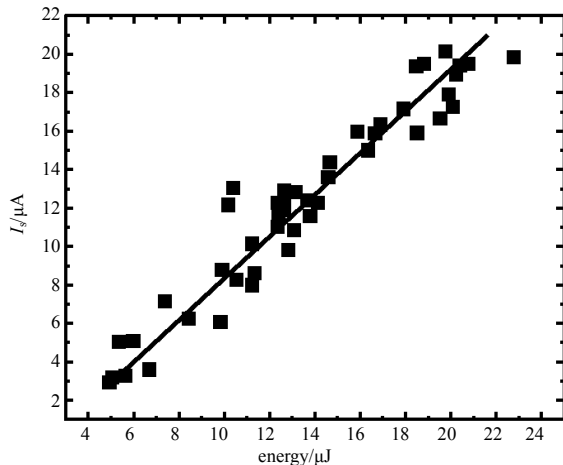


Fig.5 Output $I-E$ curve of laser simulation experiment
图 5 测试器件源端电流与激光能量之间的关系曲线

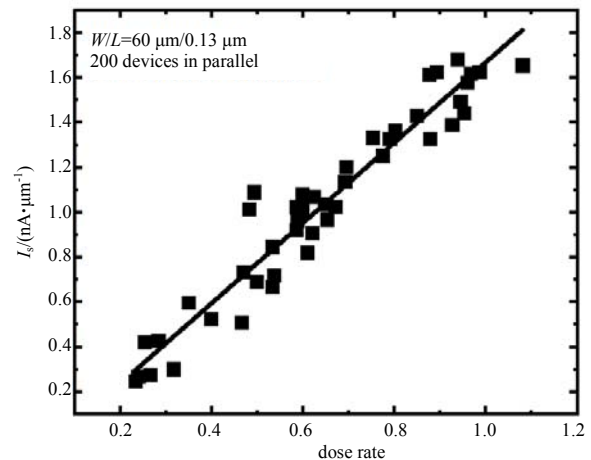


Fig.6 Output $I-D$ curve of laser simulation experiment
图 6 等效剂量率与器件光电流之间的关系曲线

为验证激光模拟试验数据的准确性, 采用 Synopsys 公司的 Sentaurus TCAD 仿真软件进行器件光电流仿真。图 7 为工作电压为 1.2 V 的不同栅长器件的剂量率与光电流的关系曲线。比对 2 组数据发现, TCAD 仿真数据和激光模拟试验数据基本一致, 验证了激光模拟技术的可行性和准确性。

从图 2 可知, 晶体管在激光照射条件下, 漏端接高电压, 源端和衬底接地。晶体管的漏端、衬底和源端可以形成寄生 NPN 双极晶体管。在激光照射过程中, 由于体电阻的存在, 光电流流过体电阻必然产生电压降, 从而在体-源端之间形成电势差。当体-源端之间的电势差大于体-源形成的 PN 结的内建电势时, 寄生 NPN 晶体管将处于放大状态, 光电流将被放大。结合式(4)和图 6 中的数据, 可得 $0.5 < \beta < 3$ 。需要注意的是, 在计算光电流灵敏体积时, 不仅要考虑耗尽区, 还需要考虑临近耗尽区的一个载流子扩散长度的区域。载流子的扩散长度 L 是扩散系数 D 与载流子寿命 τ 乘积的平方根, 即 $L=(D\tau)^{1/2}$, 扩散系数与载流子寿命受掺杂浓度的影响, 器件内部不同区域, 掺杂浓度不同, 因此灵敏体积呈现一个不规则的曲面体, 准确地进行理论计算存在一定难度。可以通过分区法, 计算得到近似值。

4 结论

利用激光模拟技术进行了 PDSOI 工艺 NMOS 器件的光电流效应特性研究。通过激光模拟试验, 获得了不同工作电压、不同结构器件在激光照射条件下光电流和激光入射能量之间的关系, 进而获得激光照射下的等效剂量率与光电流之间的关系。同时利用 TCAD 仿真工具进行了器件光电流的仿真, 通过对比 TCAD 仿真结果与激光模拟试验结果, 获得了一致的辐照剂量与光电流关系。通过与理论计算得到的光电流进行对比, 计算了器件寄生双极晶体管在激光照射条件下的光电流放大倍数。

参考文献:

- [1] MCHALE J. Maxwell technologies to provide rad-hard computing for polar satellite[J]. Military & Aerospace Electronics, 2005.
- [2] KUO J B,SU K W. CMOS VLSI engineering[M]. Berlin:Springer, 1998.
- [3] KUO J B,LIN S C. Fundamentals of SOI CMOS circuits[M]. [S.l.]:John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [4] SCHWANK J R,SHANEYFELT M R,FLEETWOOD D M,et al. Radiation effects in MOS oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008,55(4):1833-1853.
- [5] COLINGE J P. Silicon on insulator technology:materials to VLSI[M]. 2nd ed. Berlin:Springer, 1997.
- [6] SCHWANK J R,FERLET-CAVROIS V,SHANEYFELT M R,et al. Radiation effects in SOI technologies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003,50(3):522-538.
- [7] BARNABY H J,MCLAIN M L,ESQUEDA I S,et al. Modeling ionizing radiation effects in solid state materials and CMOS devices[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I:Regular Papers, 2009,56(8):1870-1883.
- [8] ELLIS T D,KIM Y D. Use of a pulsed laser as an aid to transient upset testing of 1^2L LSI micro circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978,25(6):1489-1493.
- [9] 李沫,孙鹏,宋宇,等. 半导体器件辐射电离效应的激光模拟方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):160-168. (LI Mo,SUN Peng,SONG Yu,et al. Basic principles and research progress of laser simulation of ionization radiation effect in semiconductor devices[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1):160-168.)
- [10] LI Mo,SUN Peng,ZHANG Jian,et al. Research on laser radiation for simulating dose rate effects in semiconductor materials[C]// 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology(ICEICT). Harbin,China: IEEE, 2016:540-543.
- [11] SKOROBOGATOV P K,NIKIFOROV A Y,EGOROV A N. Optimization of laser irradiation parameters for simulation of a transient radiation response in thin-film silicon-based microcircuits[J]. Russian Microelectronics, 2015(44):8-21.
- [12] 孙鹏,李沫,杨庆鑫,等. 硅在脉冲激光作用下温度积累效应的数值模拟[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):158-163. (SUN Peng,LI Mo,YANG Qingxin,et al. Numerical simulation of the accumulative photo-thermal effect in silicon under illumination with sequential laser pulses[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):158-163.)
- [13] 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.
- [14] NIKIFOROV A Y,SKOROBOGATOV P K. Dose rate laser simulation tests adequacy: shadowing and high intensity effects analysis[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996,43(6):3115-3121.
- [15] WIRTH J L,ROGERS S C. The transient response of transistors and diodes to ionizing radiation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1964,11(5):24-38.
- [16] HOFFMAN J R,HALL W E,DUNN D E. Modeling transient radiation effects in power MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1987,34(6):1381-1385.
- [17] LIANG Kun,SUN Peng,LI Mo,et al. Laser simulation technology research of transient dose rate effect in SOI device[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017,51(1):187-192.

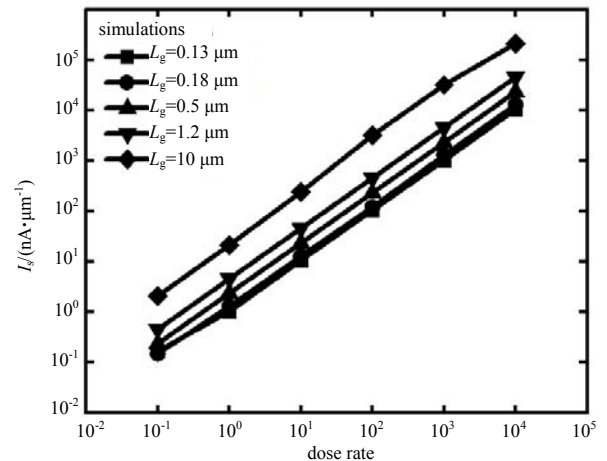


Fig.7 Output I - D curves of TCAD simulation results

图 7 TCAD 仿真得到的器件源端光电流与 γ 辐照剂量率之间的关系曲线