

文章编号: 0253-2239(2010)05-1413-05

脉冲激光对绝缘体上硅材料的损伤机理研究

付 博 张翠娟 罗 飞 张大勇 申永明 刘国栋 袁永华 罗 福

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 绝缘体上硅(SOI)材料的激光损伤特性研究对基于该材料的光学器件在激光环境中的应用具有重要价值。本文使用 1064 nm 脉冲激光对 SOI 材料进行了辐照实验,在脉冲宽度分别为 190 ps 和 280 μ s 的条件下,测得的损伤阈值能量密度分别为 2.5 J/cm² 和 19.8 J/cm²,SOI 材料表面的激光损伤模式也存在明显差别。根据实验结果,利用 ANSYS 软件的热分析模块,采用有限元方法数值模拟了激光辐照结束后 SOI 材料内部的温度场分布,并结合损伤形貌的观测对 SOI 材料的激光损伤机制进行了讨论。

关键词 光学材料;SOI 材料;激光损伤阈值;脉冲激光;损伤机理

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1413

Studies on Pulsed Laser Induced Damage of Silicon on Insulator Material

Fu Bo Zhang Cuijuan Luo Fei Zhang Dayong Shen Yongming

Liu Guodong Yuan Yonghua Luo Fu

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Research on laser-induced damage of silicon-on-insulator (SOI) material is quite important for applications of optical devices based on this material. Irradiation experiment is performed on SOI material with 1064 nm pulsed laser. For pulse width of 190 ps and 280 μ s, the laser-induced damage threshold values are measured to be 2.5 and 19.8 J/cm², respectively. Damage patterns induced by the two pulse lasers are also different from each other. According to the experimental results, the temperature distributions in the SOI material after laser pulse duration are simulated by a finite element analysis method with the ANSYS heat analysis module. Based on observation to the damage morphologies, the laser-induced damage mechanism of SOI material is discussed.

Key words optical material; silicon-on-insulator material; laser-induced damage threshold; pulse laser; damage mechanism

1 引 言

绝缘体上硅(SOI)材料具有广阔的应用前景^[1],它在微处理器^[2]、三维集成电路^[3]、光通信^[4]、微机械^[5]以及医学生物^[6]等领域内都有明显的竞争优势及发展潜力。近年来,随着硅光电集成和光子集成概念的提出,SOI 材料被广泛用于生产光调制器、光开关和光探测器等器件^[7~9],采用 SOI 衬底还可制作红外热电传感器。然而,由于硅材料带隙比较窄(在 300 K 为 1.12 eV),在近红外波段也存在较大的本征吸收,所以在近红外波段的强光辐照下极易发生损伤,这严重限制了它在光通信和探测器等方面的应用。因此,研究 SOI 材料的激光损伤特性,对基于 SOI 材料的光电器件设计具有非常重要

的意义。以往人们对硅的激光损伤研究主要针对单晶硅材料^[10~12],关于 SOI 材料激光辐照特性^[13]和损伤机理的报道则相对较少,所以本文中重点研究了 1064 nm 脉冲激光作用下 SOI 材料的损伤特性,并结合数值模拟的结果对损伤机理进行了探讨。

2 实验样品

使用的 SOI 样品是采用注氧隔离技术(SIMOX)制备的^[14]。在制备过程中,氧离子被注入硅片里,与硅发生反应形成 SiO₂ 沉淀物。由于注入对硅片的结构造成相当大的损坏,SiO₂ 沉淀物的均匀性也不很好。随后进行高温退火以消除注入时的晶格损伤,并可通过扩散和化学驱动力形成均匀

收稿日期: 2009-06-05; 收到修改稿日期: 2009-07-07

作者简介: 付 博(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事强激光效应方面的研究。E-mail: fubo@mail.nankai.edu.cn

性一致的 SiO₂ 埋层。图 1 为样品的结构示意图,最下面为体硅,厚度约 550 μm;中间为 SiO₂ 绝缘氧化埋层,厚度约 375 nm;最上面为顶硅(100)层,厚度约 10 μm。

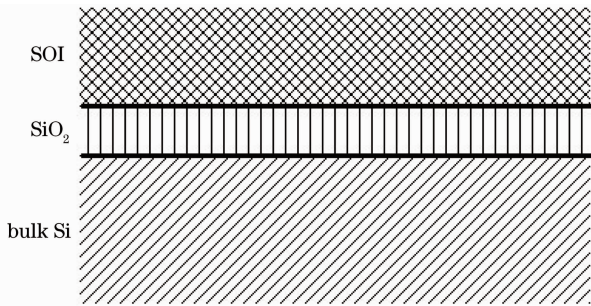


图 1 SOI 材料的结构示意图

Fig. 1 Cross-sectional view of SOI material

3 实验结果

使用如图 2 所示的光路进行了 SOI 材料的激光损伤实验。1064 nm 的激光被分束器 BS 分成两束,反射光束进入探测器 D1,透射光束经透镜 L(焦距 300 mm)聚焦,产生一束能量密度和光斑尺寸均合适的损伤激光垂直照射到 SOI 样品表面。样品固定在可进行精确调节的二维平移台上,以实现测试点位置的选择。激光的能量可以通过改变激光器工作电流连续调节。通过预先对 BS 的分光比进行定标,实验过程中就可以由探测器 D1 实时监测激光脉冲的能量。He-Ne 激光主要用于对样品表面的损伤状态进行实时监测,它以 45° 入射到样品上,与损伤激光的光斑相重合,其反射光由探测器 D2 接收。为防止 1064 nm 激光的散射光进入探测器对结果造成干扰,在 D2 前加一光阑和光谱通带中心为 632.8 nm 的窄带滤光片将散射光滤掉。

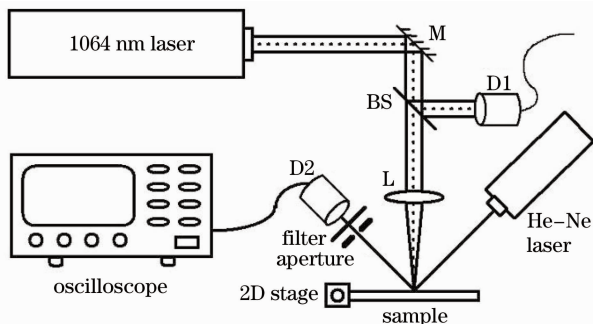


图 2 SOI 材料的激光损伤实验光路图

Fig. 2 Experimental setup of laser-induced damage of SOI material

激光光斑面积是根据国际标准 ISO 11254 的定义,通过测试等效面上光束能量的空间分布,以激光

强度峰值的 $1/e^2$ 对应的曲线内面积作为激光束的有效面积。实验中,用光束分析仪测得的光斑直径约为 0.5 mm。损伤阈值的测量采用了 1-on-1 方式,每完成一次激光辐照,将样品移动 3 mm,以保证每次出光只照射到样品表面没有被激光辐照过的地方,以避免前次辐照对后面的实验产生影响。损伤阈值定义为损伤概率为零的最大激光辐照能量密度。实验中使用了脉冲宽度分别为 190 ps 和 280 μs 的 1064 nm 激光,测得的单脉冲损伤阈值能量密度分别为 2.5 J/cm² 和 19.8 J/cm²。

4 分析与讨论

激光对光学材料的损伤主要是由光学材料对辐照激光能量的吸收造成的。对于半导体材料,本征吸收通常是造成激光破坏的主导因素。由于硅的带隙在 300 K 时约为 1.12 eV,而 1064 nm 激光的光子能量为 1.17 eV,所以在 1064 nm 的激光辐照下,硅将具有很大的本征吸收。材料对入射激光的吸收造成能量沉积,使材料内的温度上升,并在沿着温度梯度的方向产生应力,热和力的耦合作用最终导致材料熔化、碎裂等宏观破坏。除了本征吸收,材料中的杂质、缺陷、位错等会更大程度地增加对作用激光的吸收,造成微区热沉积,通过光电离、光化学、光声或其他效应成为诱发材料破坏的初始中心^[15]。

随着激光工作体制的不同,强激光对光学材料的破坏机理和破坏形态也千差万别。在实验中,两种不同脉宽的激光作用下,样品表面的损伤也表现出明显的差异:在 190 ps 的短脉冲激光作用下,如图 3(a)和(b)所示,实验样品表面损伤区边界清晰且平滑,损伤区内出现起伏的褶皱和波纹,随着激光脉冲能量密度的增加,损伤区面积增大,损伤形貌特征无明显差别;在 280 μs 的长脉冲激光作用下,如图 3(c)和(d)所示,样品表面损伤主要表现为熔融烧蚀与热应力破坏的共同作用,随着激光脉冲能量密度的增加,除了烧蚀区面积增大外,由于热传导造成的热应力破坏区也有所扩展。显然,两种脉冲激光辐照下样品表面损伤形貌的差异应该归因于二者作用方式的不同。对短脉冲激光而言,功率密度高达约 10¹⁰ W/cm²,顶 Si 层在辐照时间内可沉积约 5 mJ 的能量,这些热量不能有效地向周围区域传导,从而导致局部温度急剧上升并形成极大的温度梯度约为 9×10⁶ °C/m,中心区域的温度达到 Si 的熔点。辐照结束后,通过热扩散、热辐射等能量输运形式,辐照区和极小范围的热影响区内顶 Si 层的温

度可达到熔化温度,在实验样品表面形成凹陷。辐照区边缘波纹状形貌可能是短脉冲激光产生的热应力波在辐照区边界被反射后相干叠加的结果。在辐照结束后的冷却过程中,热影响区材料处于较高温度的时,力学性能将下降,材料收缩应变所产生的应力将使处于热影响区内的材料产生皱褶等力学效应。对长脉冲激光而言,其辐照功率相对较低,约为 10^5 W/cm^2 量级,在整个能量沉积过程中,热扩散和

热辐射等能量耗散机制在较长的时间内发挥作用,辐照区内材料温度升高达到材料的熔化温度,实验样品表现为典型的熔融烧蚀形貌,并可观察到喷溅的痕迹,其中黑色区域为凹陷较深、起伏较大的区域,熔融区不均匀也反映了入射激光强度的空间分布。辐照区内规则的 90° 裂纹,是硅(100)平面上服从 C_2 对称性的典型特征,可能是辐照结束后,冷却过程中材料收缩应变产生的应力所致。

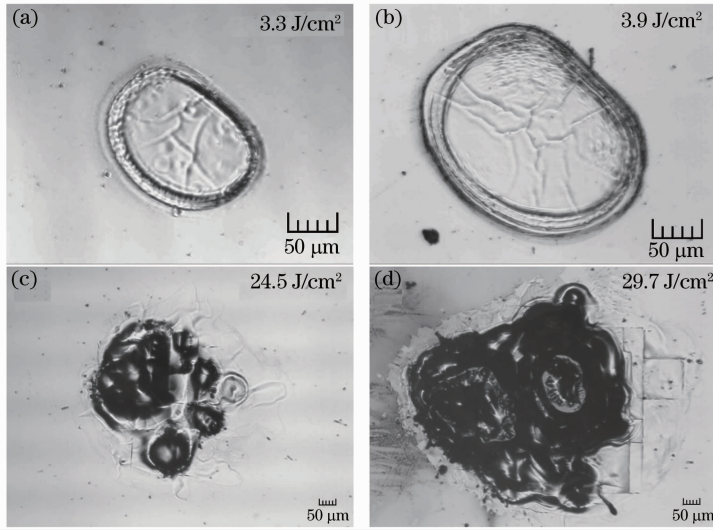


图 3 脉冲激光对 SOI 材料的典型损伤形貌。(a), (b) 脉宽 190 ps; (c), (d) 脉宽 280 μs

Fig. 3 Damage micrographs of SOI with 1064 nm pulsed laser. (a), (b) pulse duration of 190 ps; (c), (d) pulse duration of 280 μs

利用 ANSYS 有限元分析软件,根据表 1^[15,17] 中列出的 SOI 样品主要组成材料的物理特性参数和实验测得的结果,模拟了脉冲激光作用后样品内部的温度场分布^[16]。在建立模型时,沿着激光入射的方向上,样品各层的厚度取为实际的厚度;垂直激光入射的方向上,将样品半径取为光斑半径的 20 倍,为 5 mm。为了减少运算量,建模过程中仅考虑材料结构较为理想的情况,未引入任何杂质或缺陷,也未涉及顶 Si 层和 SiO_2 层之间复杂的过渡层结构。图 4 为沿着激光辐照区域中轴方向的温度分布,可以看出,两种不同脉宽的激光辐照后,样品内部的温度分布情况明显不同。由于顶 Si 层和 SiO_2 层较薄,对激光的吸收距离短,激光经过这两层后,仍有一部分作用于体 Si 层才被全部吸收。对于短脉冲激光(190 ps),温度最高的区域出现在顶 Si 层表面,由于作用时间极短,顶 Si 层和 SiO_2 层中的热扩散距离 $\sqrt{4k\tau}$ (k 为热扩散率) 分别仅为 $1.1 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 和 $2 \times 10^{-6} \text{ cm}$,远小于这两层的厚度,吸收的热量来不及向周围和衬底扩散,而 SiO_2 层对激光的吸收系数又很小,所以材料内部的温度场在 SiO_2 层出现明显的断裂带;对于长脉冲激光(280 μs),顶 Si 层和 SiO_2 层中的热

扩散距离 $\sqrt{4k\tau}$ 分别为 $1.3 \times 10^{-2} \text{ cm}$ 和 $2.6 \times 10^{-3} \text{ cm}$,远大于顶 Si 层和 SiO_2 层的厚度,所以吸收的热量有足够的时间发生扩散,使顶 Si 层内的温度趋于相同, SiO_2 层的温度也显著升高。使用实验测得的长脉冲激光损伤阈值 19.8 J/cm^2 计算的辐照后样品最高温度为 1491°C ,要高于短脉冲激光损伤阈值 2.5 J/cm^2 算得的样品表面最高温度 1369°C ,这是由于在计算过程中将材料的边界视为绝热边界,未考虑材料与周围环境的热交换。使用图 3 中发生损伤时的激光能量密度进行计算,两种脉冲作用下样品的最高温度均超过 Si 的熔点,这是与对实验损伤区域的观察分析结果相符的。

表 1 SOI 样品主要组成材料的物理特性

Table 1 Properties of main components in SOI material

	Si	SiO_2
Density / (g/cm^3)	2.33	2.64
Specific heat / [$\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$]	0.70	0.79
Thermal diffusivity / (cm^2/s)	0.166	0.006
Absorption coefficient / cm^{-1}	~ 1000	1
Refractive index	3.7	1.5
Melting point / K	1685	1880

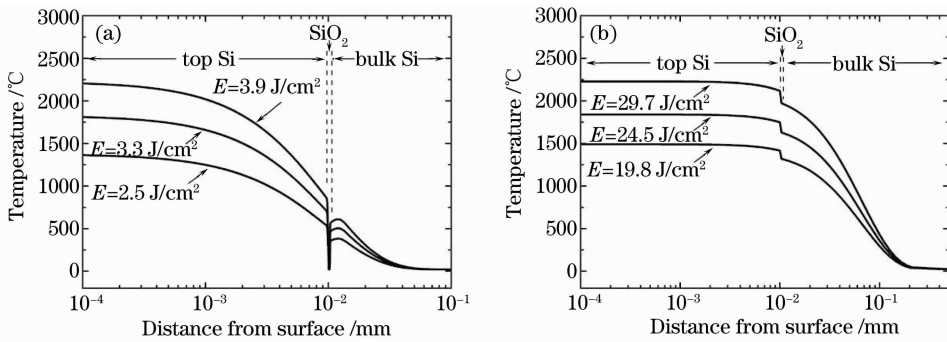


图 4 脉冲激光辐照后光斑中心轴向的温度场分布。(a) 脉宽 190 ps; (b) 脉宽 280 μs
Fig. 4 Temperature distribution along the axis of laser beam after the pulsed laser irradiation.

(a) pulse duration of 190 ps; (b) pulse duration of 280 μs

值得一提的是, SiO_2 层的存在, 如同一道热障, 严重阻碍了顶 Si 层向体 Si 层的热传导。图 5 为短脉冲激光(190 ps)辐照后, 光斑中心轴向的温度场分布随时间的变化关系。可以看出, 激光辐照结束后, 又经过 9 μs 的时间, 顶 Si 层内沉积的热量才通过 SiO_2 层, 使 SiO_2 层的温度与两侧 Si 层的温度相接近, 而在均匀的 Si 材料中, 热量传过与 SiO_2 层厚度相同的距离仅需约 2 ns。事实上, 在基于 SOI 材料的电子学器件中这种现象也相当普遍^[18]。在器件加电的过程中, 电流会不断产生热量, 而器件中独特的绝缘氧化埋层结构, 使热量在有源区内积累, 导致器件温度升高, 工作性能下降。这种现象也被称为“自加热效应”, 它在一定程度上限制了 SOI 技术的应用。

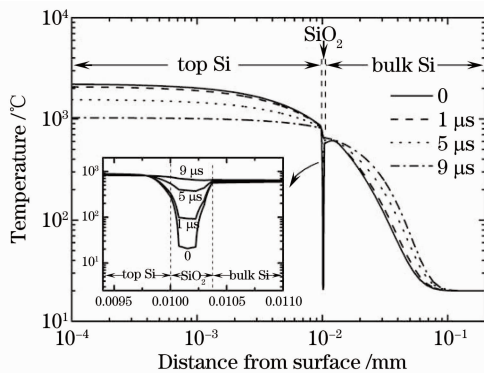


图 5 短脉冲激光辐照后不同时间光斑中心轴向的温度场分布

Fig. 5 Temperature distribution along the axis of laser beam with different time delays after the short-pulse irradiation

析和温升特性的数值模拟发现: 在脉宽 190 ps 的短脉冲激光作用下, SOI 材料的损伤主要是由于短时间内大量的能量沉积造成的表面熔融; 在脉宽 280 μs 的长脉冲激光作用下, SOI 材料的损伤主要表现为熔融烧蚀和热-力耦合作用下的解理剥蚀。 SiO_2 绝缘氧化埋层的存在, 严重阻碍了顶 Si 层内热量向衬底的扩散, 因此在器件设计过程中应当考虑“自加热效应”对整体性能的影响。

参 考 文 献

- 1 S. Cristoloveanu. Introduction to silicon on insulator materials and devices [J]. *Microelectronic Engineering*, 1997, **39**(1-4): 145~154
- 2 P. K. Vasudev. CMOS device and interconnect technology enhancements for low power/low voltage applications [J]. *Solid-State Electronics*, 1996, **39**(4): 481~488
- 3 S. Pae, T. Su. Multiple layers of silicon-on-insulator islands fabrication by selective epitaxial growth [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 1999, **20**(5): 194~196
- 4 S. Tsao, H. Guo, C. Ko. 1×2 and 2×2 SOI switch applying in optical communication network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(S): 783~784
- 5 J. Du, W. H. Ko, D. J. Young. Single crystal silicon MEMS fabrication based on smartcut technique [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, **112**(1): 116~121
- 6 W. Mokwa. Advanced sensors and microsystems on SOI [J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2000, **10**(1): 147~153
- 7 Jiang Xiaoqing, Li Baiyang, Tang Yanzhe *et al.*. Design and fabrication of the star coupler based on SOI material [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8): 465~467
- 8 Jia Xiaoling, Gao Fan, Zhang Feng. Design and optimization of a new type 3×3 Silicon-on-insulator multimode interference optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1208~1213
- 9 贾晓玲, 高凡, 张峰. 新型 SOI 基 3×3 多模干涉波导光开关的优化设计 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1208~1213
- 10 Zhiyong Li, Jinzhong Yu, Shaowu Chen *et al.*. Paired interference 3 dB coupler based on SOI rib waveguides with anisotropic chemical wet etching [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 215~217
- 11 Weidong Gao, Meiqiong Zhan, Jianda Shao *et al.*. Laser-induced damage of single-crystalline silicon under different 1064 nm Nd:YAG laser modes [C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 286~290

5 结 论

研究了 1064 nm 脉冲激光对 SOI 材料的损伤特性。通过对样品在激光辐照后损伤形貌的观察分

- 11 Yuan Yonghua, Liu Songhao, Sun Chengwei *et al.*. Study of surface ripple on laser-induced Si/ Ge material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 273~276
袁永华, 刘颂豪, 孙承伟 等. 激光辐照硅、锗材料形成表面波纹的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 273~276
- 12 Li Yuhua, Ma Fajun, Dai Nengli *et al.*. Ultra-short pulsed laser-induced damage in inorganic silicon materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 1009~1013
李玉华, 马法君, 戴能利 等. 超短脉冲激光对无机硅材料的损伤[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 1009~1013
- 13 Liu Guodong, Wang Guibing, Li Jianfeng *et al.*. Ultrafast carrier dynamics in surface of silicon-on-insulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 752~755
刘国栋, 王贵兵, 李剑锋 等. 绝缘衬底上硅表面载流子的超快动力学研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 752~755
- 14 陈可炜. SIMOX SOI 材料红外光学以及电学性能研究[D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士学位论文, 2003
- 15 Sun Chengwei, Lu qisheng, Fan zhengxiu *et al.*. Effects of Laser Irradiation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002
孙承伟, 陆启生, 范正修 等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 16 Wang Xucheng, Shao Min. The Basic Theory and Numerical Method of the Finite Element[M]. Beijing: Qinghua University press, 1977
王勖成, 邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 17 M. Kruer, R. Allen, L. Esterowitz *et al.*. Laser damage in silicon photodiodes [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1976, **8**(5): 453~458
- 18 Ding Yanfang. Studies of new SOI materials and relevant technologies & applications[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. 20~21
丁艳芳. 特种 SOI 材料及相关技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007. 20~21