

文章编号: 0258-7025(2004)03-0273-04

激光辐照硅、锗材料形成表面波纹的实验研究

袁永华^{1,2}, 刘颂豪², 孙承纬¹, 廖常俊², 王伟平¹, 罗 飞¹

(¹ 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; ² 华南师范大学量子电子学研究所, 广东 广州 510631)

摘要 用光学显微镜分别测量了 1.06 μm 激光辐照硅、锗材料形成表面波纹的形貌特征。在激光辐照材料形成初始表面波纹之后, 后继激光对最终波纹的增长起正反馈作用。当激光功率密度略大于材料损伤阈值时, 材料表面呈现周期性的波纹结构; 当激光功率密度远大于材料损伤阈值时, 材料熔融区内出现无规则的随机分布波纹。激光辐照硅、锗材料产生的波纹结构与材料的性能、表面状况和实验中使用的激光参数密切相关。同时, 分析了表面波纹结构对激光光束传输特性, 以及激光与材料相互作用产生破坏效应的影响。

关键词 激光技术; 表面波纹; 红外材料; 损伤阈值; 显微镜

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Study of Surface Ripple on Laser-Induced Si/Ge Material

YUAN Yong-hua^{1,2}, LIU Song-hao², SUN Cheng-wei¹,

LIAO Chang-jun², WANG Wei-ping¹, LUO Fei¹

¹Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China

Abstract The surface ripple modality of Si/Ge material 1.06 μm laser-induced is measured by optical microscope. It indicates that the subsequent laser will cause positive feedback to increase the ripple after the appearance of laser-induced materials' initial ripple. When power density of laser beam is close to damage threshold, periodical ripple will present on surface of the material; and when the density exceeds damage threshold, stochastic distribution will appear in melting area of the material. The surface ripple modalities occur on Si and Ge materials whose characteristics are dependent on the material property, surface status. At the same time, the infections of the surface ripple structures are analyzed for the laser beam propagation characteristics and the damage effects of laser beam interactions with materials.

Key words laser technique; surface ripple; infrared material; damage threshold; microscope

1 引言

随着激光与材料相互作用破坏机理和效应研究的深入开展, 人们通过大量的实验发现^[1~4]: 当激光辐照材料光学表面的功率密度(或能量密度)在损伤阈值附近时, 往往会形成自发的、周期性的、也是永久性的表面波纹(ripple), 也称为激光引起的周期表

面结构(LIPSS)。

激光辐照材料光学表面形成波纹的机制复杂、规律很难掌握^[5,6]。随着实验研究材料的不断增加, 新的波纹现象不断涌现。目前, 还没有激光辐照材料光学表面形成波纹过程的统一、详细和完整的理论解释。

硅、锗等半导体材料不但是常用的红外系统窗

收稿日期: 2002-12-09; 收到修改稿日期: 2003-07-15

基金项目: 国家 863 激光技术领域和中国工程物理研究院基金(编号: 20020424)资助项目。

作者简介: 袁永华(1955—), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光与材料作用的失效机理和效应的研究。E-mail: yuanyh7693

口材料,而且也是红外滤光片的基体材料。本文通过激光辐照硅、锗材料形成表面波纹的实验研究,分析了材料表面波纹产生的机理,以及波纹生成与激光功率密度、材料特性的关系。

2 实验系统

激光辐照硅、锗材料光学表面形成波纹的实验系统如图 1 所示。图中激光器分别为波长 $1.06\ \mu\text{m}$, 脉冲半宽度约 $10\ \text{ns}$, 偏振方向为布儒斯特角输出的 Q 开关 Nd:YAG 脉冲激光器和 Nd:YAG 连续激光器, 激光通过平板玻璃、透镜到达实验样品的透过率约为 0.84 , 实验样品分别是表面抛光为镜面的硅、锗材料。光束分析仪用于实时监测激光辐照在实验样品上的光斑尺寸和强度分布。功率计或能量计用于实时检测激光器输出功率或能量。用光学显微镜和原子力显微镜 (AFM) 观察激光辐照实验样品后表面波纹的结构和形貌特征。

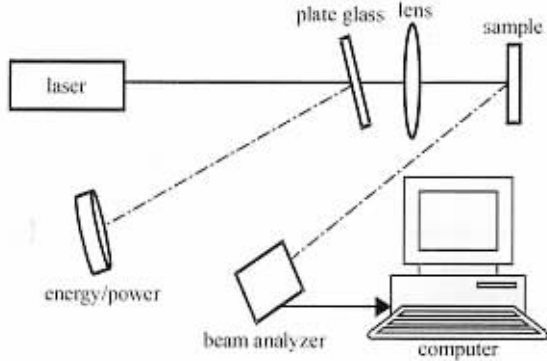


图 1 激光辐照红外滤光片及材料产生波纹的实验系统

Fig. 1 Experimental system for ripple formed by laser irradiating IR filter and material

3 实验结果分析

在激光波长 $1.06\ \mu\text{m}$, 能量 $32.89\ \text{mJ}$, 激光在靶面光斑直径 $5\ \text{mm}$, 脉冲半宽度约 $10\ \text{ns}$ 和偏振方向为布儒斯特角的条件下, 相应激光辐照锗材料的能量密度约为 $14.07\ \text{J}/\text{cm}^2$, 图 2 给出脉冲激光辐照硅材料引起表面损伤形貌和形成的表面波纹结构。从图 2 可以看出, 脉冲激光能量在实验样品上的分布很不均匀, 在激光能量密度高的区域, 材料破坏严重。在硅材料局部损伤区附近明显存在着凸起的平行等间距波纹, 波纹间隔约为 $8\ \mu\text{m}$ 。因此, 可以认为形成表面波纹的激光能量密度在硅材料的损伤阈值附近。万方数据

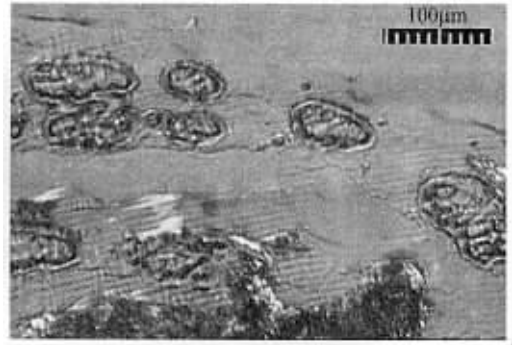


图 2 脉冲激光辐照硅材料表面形成的波纹图案
Fig. 2 Pattern of the ripple when material irradiated by pulsed laser

材料光学表面产生波纹的起因是激光辐照在材料缺陷或尘埃粒子上的散射。由于散射光与入射激光都是相干的, 彼此干涉后, 受到调制的光辐照在材料表面上形成干涉图案。在某一方向的干涉效应与入射光束的偏振态有关。在材料的光滑表面上, 可以观察到等间距的平行条纹。条纹与入射光束的偏振方向平行。

受到调制的光辐照在材料表面上形成波纹的基本过程是: 在激光辐照下材料熔化, 产生形变, 然后又重新固化, 形变也随之“冻结”。产生形变的机理与吸收的光通量以及材料特性有关。表面形变是最常见, 也是最有效的散射体, 但是“潜藏的”图形, 像晶格温度或自由载流子密度的横向变化, 似乎也可能导致某种程度的散射, 即使对几何光滑的表面也是如此。无论初态如何, 来自不同散射源的散射场总要发生相互作用, 波纹的衍射又产生二次波纹。最后的图形包含在几个间隔频率上的傅里叶分量中。这样, 一旦一种条纹被刻在材料表面上, 它就能长久地与后续光波相干, 使入射激光完全地或部分地叠加在上面。

许多波纹图案的基本轮廓可以用简单的几何光学来理解。环境空气中与样品表面相距 z 的类点散射源 (比如尘埃粒子) 也可以产生类似的图形。它包含一个共焦的椭圆系统 (在正入射条件下为圆形), 并且满足

$$r_n = n\lambda [B_1 + \sqrt{1 + B_2(1 - B_1^2)}] / (1 - B_1^2) \quad (1)$$

式中, r_n 为通过散射体到 n 条条纹的垂线的距离, $B_1 = \cos\phi \sin\theta$, $B_2 = 2z / (n\lambda \cos\theta)$, 其中 θ 为光束入射角, 从表面法向算起; ϕ 为样品表面的极化角, 从入射平面算起。在激光波长 $1.06\ \mu\text{m}$, 输出功率 $30\ \text{W}$, 激光在靶面光斑直径 $0.75\ \text{mm}$, 辐照时间 $10\ \text{s}$ 的条件

下,相应激光辐照锗材料的功率密度约为 $6.79 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$,图 3 给出连续激光辐照锗材料引起的损伤形貌和形成的表面波纹结构。从图中可以看出,在锗材料烧蚀坑的边缘叠加了几套波纹,说明形成表面波纹的激光功率密度在锗材料的损伤阈值附近。通常,长时间激光辐照锗材料表面波纹的增长过程要经历如下的反馈循环:初始材料光学表面的变化—光散射—材料表面变化的增加。在一定的条件下,初始形成表面波纹后的激光对波纹的增长起正反馈作用。如激光辐照材料引起熔融液体流动,使波纹的峰值幅度增加,或者谷底加深。线状散射体(例如表面刻痕)与点状散射体不同,其条纹与散射体平行,间隔为 $\lambda/(1 \mp \sin\theta)^{[7]}$,图中波纹宽度约为 $1 \mu\text{m}$ 。



图 3 连续激光对锗材料的损伤形貌和产生的波纹结构

Fig. 3 Wave crest and trough of the ripple when material irradiated by CW laser

从图 2 和图 3 可以看出,在靠近材料损伤区边缘形成的表面波纹,可能是激光的散射、干涉、衍射和热变形机理起主要作用,其特征是在激光功率密度(或能量密度)接近或在实验样品损伤阈值附近时,材料表面上出现周期性的波纹结构。实验中,观察到硅、锗材料被激光辐照后的波纹形状和分布差别很大,可能与材料特性有关。

当激光辐照材料的强度远远高于熔化阈值时,就会发生均匀的熔化,而熔化温度的横向变化所产生的力,将波纹刻在材料上。液体的表面张力随着温度的升高而减小,而且液体有从较热的区域向较冷区域扩张的趋势。在稳定光束作用下,将产生凸凹状形变。而在扫描光束作用下,将产生波纹。对于短脉冲,表面温度的调制将使熔化的深度和持续时间受到调制。在能量密度约为 53.39 J/cm^2 的脉冲激光辐照锗材料后,在熔融区内产生的无规则波纹图案就是一个典型的例证,如图 4 所示。

此外,还有另一种使材料熔化态产生表面波纹的

根源,那就是表面氧化。它可以把固体驻留在熔化层表面,使表面变得像牛奶那样起皱。最好的例子就是在能量密度为 32.53 J/cm^2 条件下,脉冲激光辐照硅材料后,用光学显微镜观察熔融区域,得到的表面起皱波纹图案如图 5 所示。从图中可以看出,硅材料熔融区起皱波纹的间隔大约为 $1 \mu\text{m}$,但不是平行直线波纹。

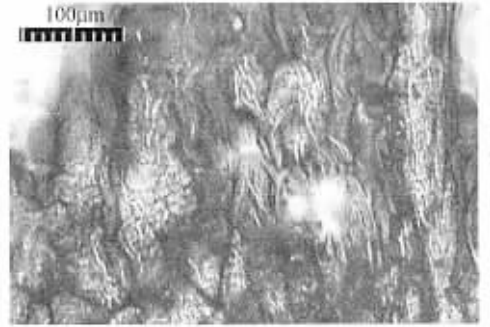


图 4 连续激光对锗材料熔融区产生的无规则波纹

Fig. 4 Modality and pattern of Ge material in melting area when irradiated by CW laser



图 5 脉冲激光辐照硅材料熔融区产生的起皱波纹

Fig. 5 Pattern of crinkly ripple in melting area of Si material irradiated by pulsed laser

从图 4 和图 5 可以看出,硅、锗两种材料在熔融区内产生波纹图案的差别很大。锗材料在熔融区出现无规则波纹图案;而硅材料在熔融区内,则出现起皱的波纹图案。材料熔融区内无规则波纹图案形成的机制比损伤区边缘形成规则波纹要复杂得多,可能是激光辐照材料的热和流体力学机制起主要作用。

4 表面波纹的形成机制及应用前景

实验结果表明,在激光辐照功率密度略大于材料损伤阈值的条件下,材料形成表面规则的波纹。当激光辐照功率密度远大于材料损伤阈值时,材料熔融区内形成无规则波纹。硅、锗材料被激光辐照

后产生的表面波纹形状和分布差别很大,并与材料特性有关。激光辐照材料形成表面波纹的机制非常复杂,它可能涉及到:激光的散射、干涉和衍射;材料的电磁性质以及对入射激光能量的吸收;激光辐照材料产生的热效应;材料熔化、重结晶和气化等相变过程;材料电子和空穴的密度改变;各种缺陷的形成和化学变化等复杂因素,可能还有其他机制的存在。在实际应用中,激光辐照材料形成的表面波纹往往是多种机制复合增长叠加的综合结果,究竟是哪一种机制起主要作用,材料特性、表面状况和实验中使用的激光参量起重要作用。

考虑到激光辐照材料形成表面波纹技术的可能应用,主要感兴趣的是在材料损伤阈值附近,激光引起材料的周期性表面波纹结构。激光与材料相互作用形成的表面波纹结构,会改变材料表面的光学特性,使材料表面对入射激光的吸收系数增大,它有助于激光对材料的损伤。在激光辐照材料过程中,一旦材料表面形成波纹图案,表面波纹就会对后继激光产生散射,使激光束的反射方向发生改变,导致反射能量严重下降;如果激光束经材料表面波纹透射,与没有形成波纹的材料相比,透射激光的光斑尺寸

增大,强度分布也会发生相应的变化。因此,元件材料表面波纹的形成对激光传输是不利的。

参 考 文 献

- 1 J. F. Young, J. S. Preston, H. M. Van Driel *et al.*. Laser induced periodic surface structure. II: experiments on Ge, Si, Al and brass [J]. *Phys. Rev. B*, 1983, **27**(2):1155~1172
- 2 A. V. Demchuk, V. A. Labunov. Surface morphology and structure modification of silicon layers induced by nanosecond laser radiation [J]. *Applied Surface Science*, 1995, **86**:353~358
- 3 J. J. Yu, Y. F. Lu. Laser engineered rippling interfaces for developing microtextures, adherent coatings and surface coupling [C]. *SPIE*, 1999, **3898**:252~262
- 4 J. J. Yu, Y. F. Yu. Effects of rapid thermal annealing on ripple growth in excimer laser-irradiated silicon-dioxide/silicon substrates [J]. *Applied Surface Science*, 2000, **154-155**:670~674
- 5 P. M. Fauchet, A. E. Siegman. Surface ripples on silicon and gallium arsenide under picosecond pulse illumination [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**(9):824~826
- 6 Y. F. Lu, J. J. Yu, W. K. Chol. Theoretical analysis of laser-induced periodic structures at silicon-dioxide/silicon and silicon-dioxide/aluminum interfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(23):3439~3440
- 7 J. F. Young, J. E. Sipe, J. S. Preston *et al.*. Laser-induced periodic surface damage and radiation remnants [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**(3):261~264