

文章编号: 0253-2239(2009)03-0743-04

飞秒激光形成的半导体低维结构与发光

张荣涛¹ 许 丽² 吴克跃³

(¹ 贵州大学贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025
² 山西大同大学物理系, 山西 大同 037003; ³ 皖西学院数理系, 安徽 六安 237012)

摘要 采用飞秒激光辐照硅和硅锗样品,用扫描电子显微镜(SEM)观察样品,发现样品上产生了某些低维结构。用飞秒激光作用产生等离子体相干驻波对硅和硅锗表面的融蚀模型来解释低维结构的形成机制,发现硅的表面周期约为 400 nm 的光栅结构在波长 719 nm 处有较强的光致荧光(PL)峰。该光致荧光的发光强度较小,其机制可从激光的脉宽和重复率两个方面来分析。当激光辐照的能量明显超过硅的融蚀阈值时,光栅形状消失,另一种锥状结构开始形成。控制加工条件,可以获得用于衍射和微分束的纳米光栅。

关键词 激光技术; 飞秒激光; 低维结构; 等离子体波; 光致荧光

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0743

Emission of Low-Dimensional Structures Formed by Femtosecond Laser Interaction with Semiconductor

Zhang Rongtao¹ Xu Li² Wu Keyue³

¹ Key Laboratory of Photoelectron Technology and Application, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China
² Physics College, Shaanxi Datong University, Datong, Shaanxi 037003, China
³ Department of Mathematic and Physics, West Anhui University, Liu'an, Anhui 237012, China

Abstract The interaction of ultra-short pulses (120 fs) of laser radiation (800 nm) with Si and SiGe samples was analyzed. Some kinds of low-dimensional structures were found. An ablation model was proposed to explain the effect. It has been noticed that a grating shape in 400 nm period scale occurs on surface of silicon. It is found that the grating of one-dimensional structure has an intensive photoluminescence (PL) whose peak is at wavelength 719 nm. The PL peak is smaller, and its mechanism is analyzed from the pulse width and repetitive rate of laser. When the irradiation energy on silicon increases to exceed the ablation threshold for the grating shape to be broken and a kind of sharp conical structure begins to set up. Controlling preparing condition, a high-quality nano-grating can be made on silicon base for diffracting and micro-splitting of beam.

Key words laser technique; femtosecond laser; low-dimensional structures; plasma wave; photoluminescence

1 引 言

飞秒激光具有超短脉冲和超高强度特性,能制备各种显微结构材料^[1~5]。脉冲激光辐照硅样品能形成硅表面的微结构图样^[6~10]。Mazur 小组发现飞秒激光加工样品后的结构有低带隙光吸收和光电流特

征^[11,12],这些样品的发光特性不是很明显。目前,激光辐照生成的低维结构及其发光特性值得进一步研究。本文采用飞秒激光辐照硅和硅锗样品,发现某些特殊的低维结构。提出融蚀模型来解释其形成机制,从激光的脉宽和重复率两个方面来进行分析。

收稿日期: 2008-08-26; **收到修改稿日期**: 2008-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(10764002)和贵州省研究生创新基金(省研理工 2007001)资助课题。

作者简介: 张荣涛(1981—),男,硕士研究生,主要从事光电子与光纤光学等方面的研究。

E-mail: zhang1981rt@163.com

导师简介: 黄伟其(1954—),男,教授,主要从事凝聚态光学、光电子、光纤通信和非线性光学等方面的研究。

E-mail: wqhuang2001@yahoo.com

2 实 验

A, B, C 样品分别用三个过程来制备:

1) 将电阻率 $10 \sim 20 \Omega\text{cm}$ 的 P 型 Si (取向为 (100) 方向) 样品放在乙醇和甲醇的混合液中充分清洗, 然后用飞秒激光辐照样品几秒钟 (激光波长 800 nm , 脉宽 120 fs)。用扩束镜控制到达样品上激光的能量密度。

2) 利用分子束外延法, 制作不掺杂应变 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层 (厚 2000 nm , $x=0.25$) 样品。样品在乙醇液中清洗 20 min , 接着进行飞秒激光辐照。

3) 样品及清理方式与 1) 相同。用纳秒激光辐照样品 20 s (激光波长 1064 nm , 功率为 30 W , 重复率分别为 20 Hz 和 1000 Hz)。

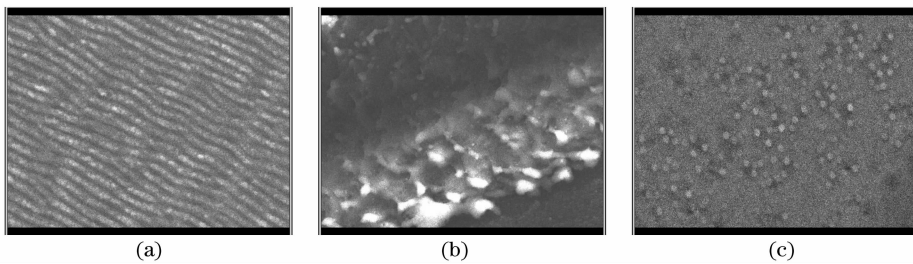


图 1 样品 A 上用激光照射得到的低维结构。(a) 当辐照能量接近硅基的融蚀阈值时, 硅基上形成的光栅结构; (b) 辐照能量明显超过阈值能量时形成的柱状结构; (c) 控制辐照能量在硅基上形成的量子点结构

Fig. 1 Low-dimensional structures of sample A formed by laser irradiation. (a) Grating structure formed on the silicon surface when the irradiation energy reaches to the level near the ablation threshold; (b) sharp conical structure when the irradiation energy increases to exceed the ablation threshold obviously; (c) micro-particle structure on the silicon by controlling of irradiation energy

图 2 为样品 B [对应 2) 过程] 上用激光照射得到的低维结构。弱激光照射使 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层裂成线条型, 如图 2(a) 所示。强激光辐照能使 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层沿着确定的方向裂成微带型, 并且卷曲形成半管型结构, 如图 2(b) 所示。图 3 为样品 A 光栅结构上强烈的光致荧光光谱。而样品 A 的其他结构和样品 B

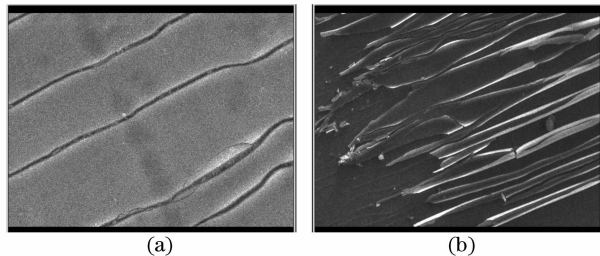


图 2 样品 B 上用激光照射得到的低维结构。(a) 弱激光照射形成的线条形结构; (b) 强激光辐照形成的半管结构
Fig. 2 Low-dimensional structures of sample B. (a) micro-strap pieces under weak the laser irradiation; (b) half-tube-shape structures screwed under the stronger laser irradiation

用扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品的低维结构。图 1 为样品 A [对应 1) 过程] 上用激光照射得到的低维结构。在样品 A 上, 硅表面形成周期为 400 nm 的一维光栅结构, 如图 1(a) 所示, 此时激光束斑直径 $100 \mu\text{m}$, 速率 1000 p/s , 作用时间 2 s , 功率为 0.2 J/cm^2 (接近硅的融蚀阈值: 0.17 J/cm^2)。提出飞秒激光作用产生等离子体相干驻波对硅和硅锗表面的融蚀模型来解释低维结构的形成机制。控制激光束斑的直径可以改变样品上辐照的能量。当硅样品上飞秒激光辐照的能量明显超过硅的融蚀阈值时, 光栅形状消失, 另一种锥状结构开始形成, 如图 1(b) 所示。随着束斑直径的改变, 控制能量照射到硅样品上能形成量子点结构, 如图 1(c) 所示。

结构发出的光致荧光较弱。图 4(a) 为样品 C 经纳秒激光辐照后形成的网状结构, 图 4(b) 为硅网状结构在波长为 706 nm 的 PL 峰^[13,14]。图 5 为 532 nm 激光照射在周期约为 400 nm 光栅结构上发出的衍射图样。

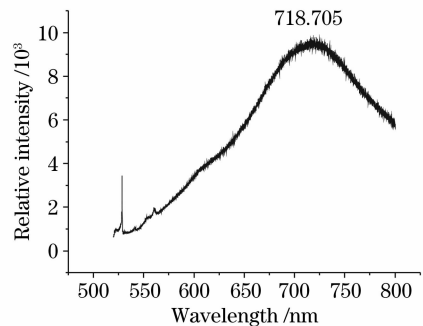


图 3 样品 A 上光栅结构的光致荧光光谱

Fig. 3 Intensive PL emission spectrum on the grating structure of sample A

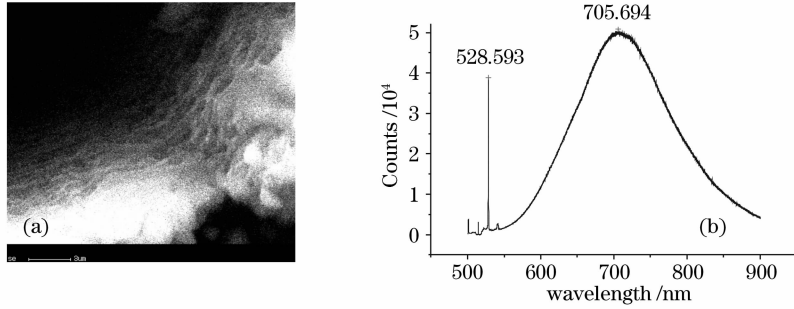


图 4 激光辐照后形成的硅网状结构(a)及其在波长 706 nm 处的 PL 峰(b)

Fig. 4 Hole-net structure of silicon after laser irradiation (a) and the PL peak at wavelength 706 nm (b)

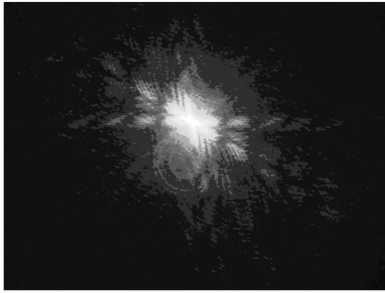


图 5 用 532nm 激光束照射光栅结构时的衍射图样

Fig. 5 Diffraction pattern of grating structure irradiated by 532 nm laser beam

4 结 论

采用波长 800 nm, 脉宽 120 fs 的飞秒激光辐照硅和硅锗样品, 可以加工出各种低维结构。这些低维结构有较强的光致荧光发光, 但飞秒激光辐照硅和硅锗样品生成低维结构的光致荧光的发光强度比纳秒激光辐照硅和硅锗样品生成低维结构的光致荧光的发光强度弱。当飞秒激光辐照的能量明显超过硅的熔融阈值时, 光栅形状消失, 另一种锥状结构开始形成。控制加工条件能在硅基上形成高质量的纳米光栅, 在光学和光电子集成方面有很好的应用前景。

3 讨 论

样品上形成光栅结构的关键技术是通过改变激光束斑大小来调节飞秒激光融蚀阈值附近照射能量得到等离子体驻波。激光辐照样品生成电子空穴对, 形成等离子体振荡, 其周期频率表达为 $\omega = e(n/m\epsilon)^{1/2}$, 等离子体频率 ω 与电荷密度 n 的均方根成正比, 与激光融蚀强度的均方根成反比, 因此飞秒激光有足够的强度引起脉冲等离子体振动。

飞秒激光脉冲比较窄, 能量较为集中, 瞬时强度大, 打在硅上能使硅的表面完全融蚀, 形成的结构比较光滑; 纳秒激光脉冲比较宽, 能量不是很集中, 强度相对较小, 激光辐照形成较多的结构缺陷, 使形成的结构较为复杂, 毛刺较多, 低维结构丰富, 从而发光较强。另一方面, 激光脉冲的重复率越高, 照射到样品上的脉冲位置变化越复杂, 前后脉冲叠加致使形成的结构较为复杂, 毛刺较多, 低维结构丰富, 从而发光也较强。

硅基上光栅结构的荧光辐射的增强效应起源于表面结构。目前, 可能最重要的事情是寻找硅和锗的一些特殊低维结构来改善发光效果。在应用方面, 控制硅基上的飞秒激光辐照加工条件, 能获得用于衍射和微分束的纳米光栅。

参 考 文 献

- 1 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: Frontier in laser precision micromachining[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 595~622
何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 595~622
- 2 Sun Xiaohui, Zhou Changhe. Fabrication of microoptical elements with femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 133~137
孙晓慧, 周常河. 飞秒激光加工微光学元件的研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 133~137
- 3 Guo Xiaodong, Li Ruxin, Yu Bingkun *et al.*. Femtosecond laser pulses induced nanostructures on ZnO in different ablation conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 1017~1020
郭晓东, 李儒新, 余昂鲲 等. 不同烧蚀条件下飞秒激光脉冲诱导 ZnO 纳米结构研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 1017~1020
- 4 Li Ping, Wang Yu, Feng Guojin *et al.*. Study of silicon microstructuring using ultra-short laser pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1688~1691
李 平, 王 煜, 冯国进 等. 超短激光脉冲对硅表面微构造的研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1688~1691
- 5 Wu Xiaojun, Jia Tianqing, Zhao Fuli *et al.*. Fabrication of nanostructures on 6H-SiC crystal induced by femtosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 105~110
吴晓君, 贾天卿, 赵福利 等. 飞秒激光在 6H-SiC 晶体表面制备纳米微结构[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 105~110
- 6 Yuan Yonghua, Liu Songhao, Sun Chengwei *et al.*. Study of the characteristics of the surface ripple on Si material irradiated by pulsed laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 239~242
袁永华, 刘颂豪, 孙承伟 等. 脉冲激光辐照硅材料引起表面波纹的特性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 239~242

- 7 P. M. Fauchet, A. E. Siegman. Surface ripples on silicon and gallium arsenide under picosecond laser illumination[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**(9): 824~826
- 8 S. S. Li, K. Chang, J. B. Xia. Effective-mass theory for hierarchical self-assembly of GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum dots[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(15): 155301
- 9 M. Bonm, D. N. Denzler, S. Frunk *et al.*. Competition between electron-phonon coupling and hot-electron transport[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(2): 1101
- 10 Huang Weiqi, Xu Li, Wu Keyue *et al.*. Enhancement of photoluminescence emission in low-dimensiona structures formed by irradiation of laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(5): 053517
- 11 M. Y. Shen, C. H. Crouch, J. E. Carey *et al.*. Formation of regular arrays of silicon microspikes by femtosecond laser irradiation through a mask[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(11): 1715
- 12 Ali Serpenguzel, Adnan Kurt, Ibrahim Inanç *et al.*. Luminescence of black silicon[J]. *J. Nanophoton*, 2008, **2**: 021770
- 13 W. Q. Huang, S. R. Liu. Self-assembled germanium nanostructures by laser-assisted oxidation[J]. *Chinese Physics*, 2006, **15**(2): 390~393
黄伟其,刘世荣. 激光辅助氧化后的自组织锗纳晶结构[J]. *中国物理*, 2006, **15**(2): 390~393
- 14 Huang Weiqi, Liu Shirong. PL spectra and quantum confinement analysis of Ge nanostructures in rapid oxidation of SiGe substrate[J]. *Modern Physics Letters B*, 2005, **19**(30): 1767~1774

《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于2009年12月正刊上推出“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光制造”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

截稿日期:2009年9月30日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjc.htm>)直接上传稿件(主题标明“激光制造”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjc@mail.shnc.ac.cn(主题标明“激光制造”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请发邮件至zhgjc@mail.shnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部