

皮秒激光功率变化对激光诱导晶体硅变化的影响

杨成娟^{1,2}, 梅雪松³, 王文君³, 田延岭^{1,2}, 张大卫^{1,2}, 崔良玉^{1,2}

- (1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072;
2. 机制设计理论与装备设计教育部重点实验室 天津大学, 天津 300072;
3. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了深入了解皮秒激光烧蚀对晶体硅所造成的影响, 使用不同平均功率下的皮秒脉冲激光辐照晶体硅, 然后使用 X 射线光电子能谱仪和透射电子显微镜, 分别对被烧蚀晶体硅的化学成分与微观组织结构进行观察与分析。研究发现: 随着激光脉冲平均功率的增加, 烧蚀产物中晶体硅的相对含量不断下降, 而 SiO₂ 的相对含量则逐步上升; 与此同时, 材料的无定形化程度也随之加剧。最终认为: 因激光脉冲平均功率增加而逐渐升高的激光能量密度是诱导上述实验结果出现的主要原因, 并最终不断扩大并加剧着材料所受到热与机械损伤的范围与程度。

关键词: 晶体硅; 皮秒激光; 激光脉冲功率变化; 化学成分; 微观组织结构

中图分类号: TN249; TN305.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0106006

Influence of laser power variation on laser-induced changes of crystalline silicon

Yang Chengjuan^{1,2}, Mei Xuesong³, Wang Wenjun³, Tian Yanling^{1,2}, Zhang Dawei^{1,2}, Cui Liangyu^{1,2}

- (1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to understand the influence of picosecond laser irradiation on crystalline silicon, laser-induced changes of crystalline silicon by picosecond laser ablation with different average laser powers were studied. Then X-ray photoelectron spectroscopy and transmission electron microscope were used to analyze the influence of average laser power variation on final chemical composition and microstructure of the ablated silicon, respectively. It is concluded that, with the increase of average laser power, the relative content of Si in ablation product keeps falling, by contrast, the relative content of SiO₂ gradually rises. At the same time, the increase of average laser power intensifies the amorphization degree of microstructure of ablated silicon. Finally, it is deduced that the increased laser fluence resulted from average laser power increasing is the main reason for all of above experimental results, and also to enlarge and deepen the thermal and mechanical damages in ablated silicon.

Key words: crystalline silicon; picosecond laser; laser pulse power variation; chemical composition; microstructure

收稿日期: 2015-05-13; 修订日期: 2015-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(51405333, 51175372, 51275337); 天津大学自主创新基金(1405);

天津市装备设计与制造技术重点实验室(天津大学)开放课题

作者简介: 杨成娟(1983-), 女, 博士后, 主要从事超快激光微/纳加工技术及分子动力学仿真方面的研究。Email: cjtju@tju.edu.cn

0 引言

在过去的几十年间,硅基工艺推动着集成电路和微电子技术的不断发展,它无处不在,以自己的娇小身材为社会的生产方式和人们的生活方式带来巨大的改变,成为现代产业和科学技术发展的基础。因而,硅材料作为电子与信息技术革命中推动电子元器件发展的一种最为重要的信息技术材料,而受到广泛关注。然而微电子技术的巨大成功在许多领域引发了一场微小型化革命,以加工微米/纳米结构和系统为目的的微米/纳米技术(Micro/Nano Technology)在此背景下应运而生。一方面利用物理化学方法将原子和分子组装起来,形成具有一定功能的微米/纳米结构。另一方面利用精细加工手段加工出微米/纳米级结构。前者导致了纳米生物学、纳米化学等边缘学科的产生,后者则在小型机械制造领域开始了一场新的革命,导致了微电子机械系统(MEMS)的产生。目前微型加工技术主要有基于从半导体集成电路微细加工工艺中发展起来的硅平面加工和体加工工艺,20世纪80年代中期以后在LIGA加工(微型铸模电镀工艺)、准LIGA加工、超微细加工、微细电火花加工(EDM)、等离子加工、激光加工、离子束加工、电子束加工、快速原型制造(RPM)以及键合技术等微细加工工艺方面取得了相当大的进展^[1-3]。其中超快激光因其极窄的脉冲宽度、极高峰值能量、极小的聚焦光斑尺寸和热与机械影响区域、非接触式加工等诸多特性,为人类提供了前所未有的实验手段并帮助人类获得其他加工方法无法比拟的加工结果。此外,超快激光因其多光子效应的存在而区别于传统长脉冲激光烧蚀材料的作用机制^[4]使得其在3D材料超精细机械加工与处理为主的工业生产、电子信息与通讯、生物与医学卫生、国防与军事建设、科教文娱^[5-8]等很多领域得到了广泛应用。基于硅材料巨大的技术重要性和超快激光无与伦比的加工优势,使用超快激光对硅材料进行加工处理,已成为当今世界研究与应用的热点技术。而想要更好地掌控超快激光对硅材料的加工过程,就必须首先对超快激光与硅材料之间的相互作用机制进行全面而深入的研究。

基于Langevin动力学方法,使分子动力学(MD)

仿真模型和一维热扩散模型进行耦合,将被耦合的两种仿真方法用于超快激光脉冲与硅之间相互作用过程的数值模拟,并对材料的阈值能量密度进行仿真估测,所得仿真结果与实验测量值相近^[9]。有研究表明,使用皮秒脉冲激光烧蚀硅材料,硅的熔化与再凝固过程导致了在被烧蚀孔洞周围形成一层规则的晶体结构材料。并通过使用相互结合的MD/FD仿真方法得到了皮秒激光脉冲与硅相互作用过程中激光参数与最终所形成的微结构之间的关系^[10]。基于爆炸性结晶化的第一原子尺度计算原理发现:无定形材料(Si或Ge)的晶体态固体-液体界面温度被晶体侧热浴所控制,然而液体-无定形态固体界面温度则不依赖于无定形侧热浴温度。同时,此项研究还对Si或Ge的不同晶体形貌对于不同的热损失条件的依赖程度进行了分析^[11]。对于晶体硅无定形化机制的多角度研究结果揭示了晶体硅无定形机制可能涉及到硅中的玻璃态转化^[12]。使用非平衡分子动力学(NEMD)仿真,在晶体硅上重度B-掺杂的无定形硅的激光热处理过程中,通过观察扩散系数、三体势能大小以及每层中固体原子的比例来确定固体-液体界面位置^[12-13]。C. Yang, X. Xu等继续针对皮秒脉冲激光烧蚀晶体硅的微观过程进行了MD仿真研究,最终对包含界面动力学等问题在内的相关热动力学现象进行了合理解释^[14]。

人们在超快激光辐照诱导晶体硅改变的实验研究方面也进行了深入的多样化研究。20世纪80年代,Bloembergen等首先发现可见与紫外波段皮秒激光脉冲辐照单晶硅能够产生无定形非晶化现象^[15]。随后,Liu等发现激光辐照单晶硅能够在无定形层上诱导产生几十纳米厚度的无定形上表面层^[16]。进一步的研究显示经激光辐照之后的材料在晶体状态和无定形非晶状态之间的转变与凝固过程中液体-固体界面移动速率有关:即当液体-固体界面移动速率(凝固速率)大于某一临界阈值时,激光辐射会导致被加工材料的无定形非晶化^[17]。很明显,实际的凝固速率受到局部温度梯度和熔化后瞬时冷却条件的强烈影响,其中瞬时冷却条件可由脉冲波长、脉冲持续时间、空间光束剖面等激光参数以及其他相关的材料光学与热力学特性来确定。基于Bloembergen等的开拓性工作以及飞秒激光器的出现与普及,飞秒激光诱导半导体材料(硅、III-V型化合物砷化镓

和铈化钢等)状态改变的动力学问题^[18]逐渐取代皮秒激光而成为学者研究的热点。Jimmy Jia 等通过使用单脉冲烧蚀阈值附近的飞秒脉冲激光在绝缘硅片结构器件中的单晶硅薄膜表面钻削微小孔洞, 观察发现于孔洞边缘形成无定形硅层, 认为这一现象主要是由于熔融液体层材料的凝固速率非常快以至于直接跳过结晶化过程, 而直接冷却形成无定形非晶状态结构^[19]。真空条件下使用飞秒激光辐照晶体硅, 当脉冲能量小于 300 nJ 时, 仅在凹坑外边缘部分观察到较高密度的缺陷及多晶态物质, 凹坑内部材料仍保持单晶状态。即使飞秒激光脉冲能量再继续小幅度升高, 也不会导致扩展缺陷的产生^[10]。而 J. Bonse 及其课题组研究人员使用脉冲宽度为 130 fs, 波长 800 nm 的单个 Ti:sapphire 飞秒激光脉冲, 在激光能量密度值低于 0.7 J/cm² 时烧蚀<111>晶体硅, 在最终烧蚀产物中观察到了无定形非晶态硅的存在, 随后改变激光能量密度, 发现产物中有无定形非晶态与多晶态薄层材料、再结晶材料的存在, 并对单脉冲熔化与再结晶阈值能量密度进行了确定^[9]。当激光能量密度高于熔化阈值两倍时, 飞秒激光辐照晶体硅将会在被辐照材料表面诱导产生几十纳米厚的无定形层形成^[20]。同样使用 130fs 脉冲宽度的单个 Ti:sapphire 飞秒激光脉冲, 当激光能量密度在熔化与烧蚀阈值之间时辐照 n 掺杂<111>单晶硅片, 在最终烧蚀产物表面诱导产生无定形层, 定量评估后认为材料的熔化深度与无定形层厚度呈线性关系^[21]。通过使用显微拉曼光谱, 人们还发现单晶硅的残余应力和无定形化现象与入射激光脉冲宽度、激光能量密度等激光参数之间存在一定的函数关系^[22]。另外, 实验还发现: 激光极化现象对飞秒激光加工硅晶片诱导所产生的残余应力和无定形化现象有着不可忽略的影响。晶体硅经三次谐波紫外 Ti:sapphire 飞秒激光脉冲辐照后能够形成约 7 nm 均匀厚度的无定形硅层, 且无定形层之下的材料内部不存在晶格缺陷, 此无定形层厚度亦等于材料熔化区域厚度, 这与泵浦-探测成像测量方法所测得的熔化深度相一致。进一步研究显示此时材料的无定形化阈值能量密度为 0.044 J/cm²^[22-24]。

尽管针对激光脉冲烧蚀诱导半导体材料变化的研究最早源于皮秒激光作为辐照光源, 然而随着脉冲持续时间更短的飞秒激光的异军突起, 针对皮秒

脉冲激光诱导半导体材料变化的热动力学现象便鲜有更为深入的研究。为了进一步揭示皮秒激光烧蚀诱导半导体材料变化的本质, 文中以晶体硅为研究对象, 利用 X 射线光电子能谱仪 (XPS, X-ray Photoelectron Spectroscopy) 和透射电子显微镜 (TEM, Transmission Electron Microscope), 分别从化学成分与微观组织结构的角度, 针对皮秒激光脉冲平均功率变化对被烧蚀晶体硅所发生变化的影响及其内在机理进行分析与讨论。

1 实验仪器与参数

文中将厚度约为 0.5 mm 的晶体硅片作为实验样品, 使用由奥地利 HighQlaser 公司生产的 Nd:VAN 皮秒激光系统 (picoREGENTM Model: IC-1500 ps Nd:VAN REG AMP with SHG & THG S/N: IN00060, HR picosecond laser system) 所输出的脉冲持续时间为 10 ps±1.5 ps、波长 λ=1 064 nm、脉冲重复频率为 f=1 000 Hz 的激光脉冲, 经过 50 倍物镜聚焦, 入射到实验样品表面, 进行焦点处加工, 且光束质量因子 M²<1.5。主要实验内容为: 在不同的激光平均功率条件下, 开展“平行条纹”加工, 并且相邻两条纹互相交叠, 最终形成一个面积较大的矩形激光烧蚀区域, 以便后期化学成分与微观组织结构的观察。实验中的重要参数已在表 1 中给出。

表 1 皮秒激光烧蚀实验重要参数

Tab.1 Parameters in picosecond laser ablation experiment

Laser average power/mW	4	15	20	30
Scanning speed /μm·s ⁻¹			100	
Spot radius/μm			5.65	
Laser fluence /J·cm ⁻²	3.99	14.96	19.94	29.91

2 实验结果与讨论

2.1 激光能量密度变化对材料化学成分的影响

使用 ThermoFisher Scientific 公司生产的 K-Aepna 型 X 射线光电子能谱仪进行元素化学成分及其构成形式分析。与未经激光辐照处理过的晶体硅样品的 XPS 元素分析图进行比较^[25], 从图 1~4 中所

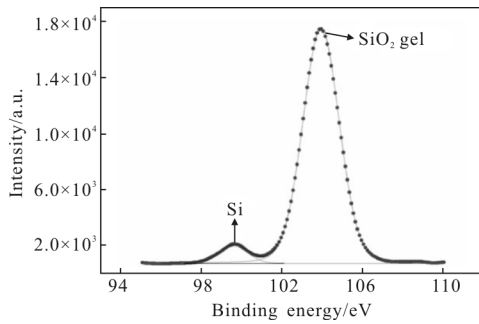


图 1 平均功率为 4 mW 时 XPS 结果

Fig.1 XPS result when laser power is 4 mW

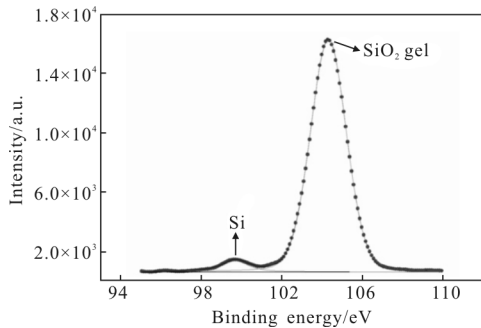


图 2 平均功率为 15 mW 时 XPS 结果

Fig.2 XPS result when laser power is 15 mW

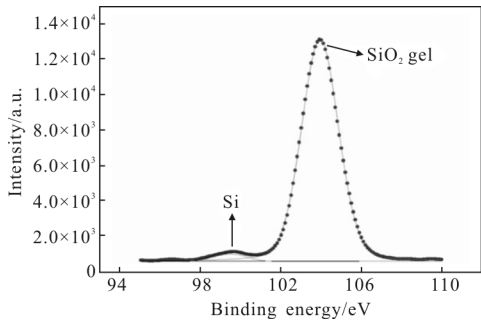


图 3 平均功率为 20 mW 时 XPS 结果

Fig.3 XPS result when laser power is 20 mW

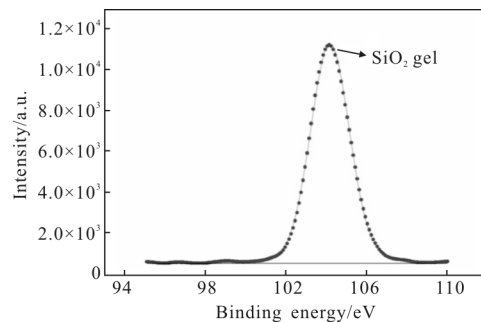


图 4 平均功率为 30 mW 时 XPS 结果

Fig.4 XPS result when laser power is 30 mW

4 mW、15 mW、20 mW、30 mW 时,4 种激光烧蚀产物的主要化学成分均分别为单质硅(Si)和 SiO₂,并且各烧蚀产物中单质硅(Si)的含量、SiO₂ 的含量、单质硅与 SiO₂ 含量之比均呈现逐渐降低的趋势,如表 2 所示。由此说明:随着激光脉冲平均功率的增加,烧蚀产物中 SiO₂ 含量的下降速率低于单质硅含量的降低速率,因而 SiO₂ 的相对含量实质上是逐渐升高的。造成这一实验结果的主要原因可归结为:激光脉冲平均功率的增加导致了激光能量密度的升高,入射激光能量对材料所造成的热与机械影响范围不断扩大,从而促使越来越多的单质硅参与到与空气发生的、以氧化反应为主的化学反应中来,最终加速了单质硅的消耗与 SiO₂ 的生成。

表 2 XPS 峰值信息

Tab.2 Peak information of XPS results

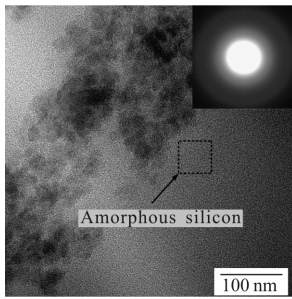
Laser average power	4	15	20	30
CPS1/mW	1 247.28	749.51	401.32	≈ 0
CPS2/mW	16 830.06	15 726.51	12 618.97	10 791.42
CPS1/ CPS2	7.41%	4.77%	3.18%	≈ 0

2.2 激光能量密度变化对材料微观组织结构的影响

使用日本电子株式会社 (JEOL) JEM2100 透射电子显微镜对 4 种不同激光脉冲平均功率下的皮秒激光与晶体硅的最终烧蚀产物微观组织结构进行分析。基于 TEM 电子衍射图样分析原理:单晶结构的 TEM 电子衍射图样主要由许多整齐排列的光斑构成;多晶体结构的 TEM 电子衍射图样呈现出一系列具有不同半径的同心圆环的集合;而无定形非晶结构的 TEM 电子衍射图样则主要由一个弥散的中心光斑及其外围一个或多个弥散衍射环构成^[25]。

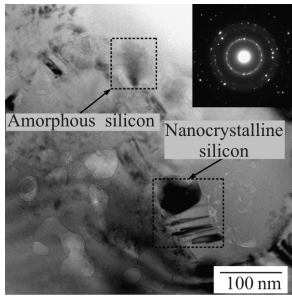
与参考文献[26]中未经激光辐照处理过的晶体硅样品的 TEM 电子衍射图样进行对比,由图 5~8 所示的皮秒激光辐照晶体硅所得烧蚀产物的 TEM 分析结果可知,皮秒激光脉冲平均功率分别为 4 mW、15 mW、20 mW 和 30 mW 条件下晶体硅的主要烧蚀产物结构成分基本相同,均为无定形非晶与纳米晶结构。然而纵观图 5(b)、6(b)、7(b)、8(b)中无定形非晶与纳米晶的电子衍射图样发现:其弥散中心光斑外围衍射环的弥散现象愈加严重。结合表 3 中的数据,随着皮秒激光脉冲平均功率的升高,存在于无定形非晶结构中的硅元素含量稳步增长,而存在于纳米晶

示的 XPS 结果可以看到:激光脉冲平均功率分别为



(a) 无定形非晶及其电子衍射图样

(a) Amorphous silicon and its TEM electron diffraction pattern

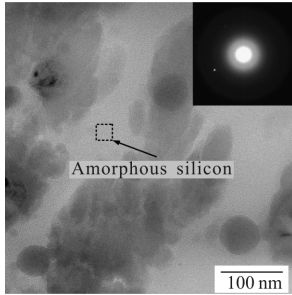


(b) 无定形非晶+纳米晶及其电子衍射图样

(b) Amorphous silicon+nanocrystalline silicon and their TEM electron diffraction pattern

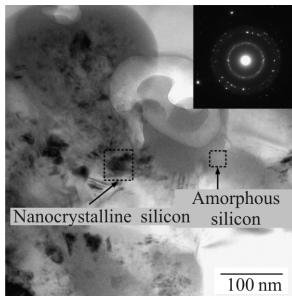
图 5 平均功率为 4 mW 时 TEM 结果

Fig.5 TEM result when laser power is 4 mW



(a) 无定形非晶及其电子衍射图样

(a) Amorphous silicon and its TEM electron diffraction pattern

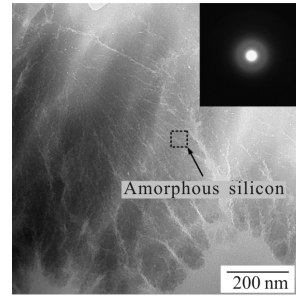


(b) 无定形非晶+纳米晶及其电子衍射图样

(b) Amorphous silicon+nanocrystalline silicon and their TEM electron diffraction pattern

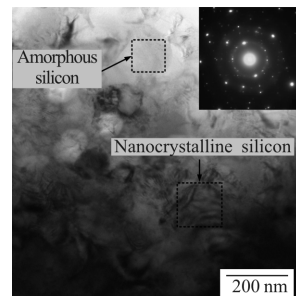
图 6 平均功率为 15 mW 时 TEM 结果

Fig.6 TEM result when laser power is 15 mW



(a) 无定形非晶及其电子衍射图样

(a) Amorphous silicon and its TEM electron diffraction pattern

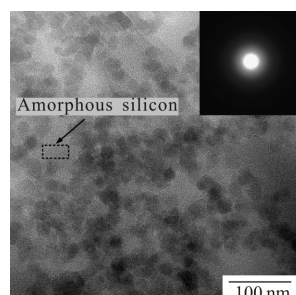


(b) 无定形非晶+纳米晶及其电子衍射图样

(b) Amorphous silicon+nanocrystalline silicon and their TEM electron diffraction pattern

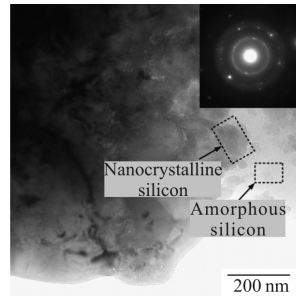
图 7 平均功率为 20 mW 时 TEM 结果

Fig.7 TEM result when laser power is 20 mW



(a) 无定形非晶及其电子衍射图样

(a) Amorphous silicon and its TEM electron diffraction pattern



(b) 无定形非晶+纳米晶及其电子衍射图样

(b) Amorphous silicon+nanocrystalline silicon and their TEM electron diffraction pattern

图 8 平均功率为 30 mW 时 TEM 结果

Fig.8 TEM result when laser power is 30 mW

结构中的硅元素含量则呈现轻微降低的趋势。由此可以判定:随着皮秒激光脉冲平均功率的增加,烧蚀产物内部无定形非晶结构所占比例逐渐升高,而纳米晶的含量则相对下降。导致上述实验现象的根本原因可推断为:皮秒激光脉冲平均功率的增加造成了激光能量密度的升高,入射激光能量对被烧蚀晶体硅所造成的热与机械影响程度逐渐加深,促使越来越多的晶体硅不断吸收激光能量后失去了原有规则排布的稳定晶格状态,被无定形化为无定形非晶状态硅,最终加剧了材料的无定形化程度。

表 3 TEM Si 元素含量分析结果

Tab.3 Analysis result of proportion of Si by TEM

Laser average power /mW	Proportion of Si	
	Amorphous silicon/%	Nanocrystalline siliconAnaly/%
4	74.18	98.27
15	96.69	98.15
20	97.64	96.88
30	98.19	96.53

3 结 论

皮秒激光不但具有纳秒、毫秒等长脉冲激光无法比拟的极高峰值能量,同时又拥有飞秒激光脉冲羡慕不已的较高平均功率,因而被广泛应用于微/纳加工、生物医学、国防军事等诸多领域。了解和掌握皮秒激光与材料烧蚀过程的作用机制,对于合理设计与精确控制加工过程、获得理想的加工结果具有重要的科学指导意义。文中主要围绕“皮秒激光辐照诱导晶体硅发生变化”这一科学问题,具体针对皮秒激光脉冲平均功率变化对材料所造成的影响,分别使用 XPS 和 TEM,从化学成分与微观组织结构两方面对被烧蚀晶体硅所产生的变化进行分析,并对其影响机制进行讨论,最终得到以下结论:

(1) 平均功率分别为 4 mW、15 mW、20 mW 和 30 mW 条件下,皮秒激光脉冲与晶体硅相互作用所得烧蚀产物的主要化学成分并没有随激光脉冲平均功率的变化而发生本质改变,均主要包含单质硅和 SiO₂。然而激光脉冲平均功率的增加导致了激光能量密度的升高,由此产生的入射激光能量对被烧蚀材料所造成的热与机械影响范围不断扩大是加速单

质硅消耗和 SiO₂ 生成的主要诱因。

(2) 皮秒激光脉冲平均功率从 4~30 mW 的变化,同样也没有对其与晶体硅的主要烧蚀产物结构成分造成本质影响,均以无定形非晶结构和纳米晶结构为主。但是随着皮秒激光脉冲平均功率的增加,激光能量密度也逐渐提高,这便不断加剧着入射激光能量对被烧蚀晶体硅所造成的热与机械影响的程度,最终促使材料的无定形化程度加深,纳米晶等其他微观组织结构逐渐消失。

(3) 由此可见,激光能量密度的高低是决定被烧蚀材料所受到热与机械影响范围和程度的直接因素。该研究所得结果对于深化皮秒激光与半导体材料相互作用机理的认知,推进皮秒激光加工技术在制造工业中的应用具有重要意义。

参 考 文 献 :

- [1] Huang Yinquan. Application of laser in the fabrication of microelectronic devices [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1991, 20(3): 1-5. (in Chinese)
黄印权. 激光在微电子器件制造中的应用[J]. 红外与激光工程, 1991, 20(3): 1-5.
- [2] Zhu Qianbin. Status, development trend and key technology of Micro mechanical processing technology [J]. *Precise Manufacturing & Automation*, 2002, 2: 9-11. (in Chinese)
朱骞彬. 微型机械加工技术发展现状和趋势及其关键技术[J]. 精密制造与自动化, 2002, 2: 9-11.
- [3] He Yilong, Zhang Lixian, Li Ting, et al. Technology of silicon-based MEMS [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23(4): 523-526. (in Chinese)
郝一龙, 张立宪, 李婷, 等. 硅基 MEMS 技术 [J]. 机械强度, 2001, 23(4): 523-526.
- [4] Wang X, Xu X. Thermoelastic wave in metal induced by ultrafast laser pulses [J]. *J Therm Stresses*, 2002, 25 (5): 457-473.
- [5] Henyk M, Costache F, Reif J. Femtosecond laser ablation from sodium chloride and barium fluoride[J]. *Appl Surf Sci*, 2002, 186(1): 381-384.
- [6] Juhasz T, Loesel F H, Kurtz R M, et al. Corneal refractive surgery with femtosecond lasers[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 1999, 5(4): 902-910.
- [7] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [8] Cui Chengyun, Cui Xigui, Shi Guifeng. Surface morphology

- of non-metallic solid materials after laser carving [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3932–3936. (in Chinese)
- 崔承云, 崔熙贵, 石贵峰. 激光雕刻非金属材料的面形貌[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3932–3936.
- [9] Bonse J, Brzezinka K-W, Meixner A. Modifying single-crystalline silicon by femtosecond laser pulses: an analysis by micro Raman spectroscopy, scanning laser microscopy and atomic force microscopy [J]. *Appl Surf Sci*, 2004, 221(1): 215–230.
- [10] Borowiec A, Mackenzie M, Weatherly G, et al. Transmission and scanning electron microscopy studies of single femtosecond-laser-pulse ablation of silicon[J]. *Appl Phys A-Mater*, 2003, 76(2): 201–207.
- [11] Russo R E, Mao X, Gonzalez J J, et al. Femtosecond laser ablation ICP-MS [J]. *J Anal Atom Spectrom*, 2002, 17(9): 1072–1075.
- [12] Men Haining. The mechanics and application during femtosecond laser and solid material interaction [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, 2006. (in Chinese)
- 门海宁. 飞秒激光与固体材料相互作用机理与应用研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2006.
- [13] Choi T Y, Hwang D J, Grigoropoulos C P. Ultrafast laser-induced crystallization of amorphous silicon films [J]. *Opt Eng*, 2003, 42(11): 3383–3388.
- [14] Yang C, Wang Y, Xu X. Molecular dynamics studies of ultrafast laser-induced phase and structural change in crystalline silicon [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2012, 55: 6060–6066.
- [15] Yen R, Liu J, Kurz H, et al. Space-time resolved reflectivity measurements of picosecond laser-pulse induced phase transitions in (111) silicon surface layers [J]. *Appl Phys A-Mater*, 1982, 27(3): 153–160.
- [16] Liu P, Yen R, Bloembergen N, et al. Picosecond laser-induced melting and resolidification morphology on Si [J]. *Appl Phys Lett*, 1979, 34(12): 864–866.
- [17] Cerný R, Cháb V, Ivlev G, et al. Modeling the phase-change processes in pulsed laser-irradiated InSb [J]. *Phys Rev B*, 1999, 59(16): 10685–10690.
- [18] Kim AM-T, Callan J P, Roeser CAD, et al. Ultrafast dynamics and phase changes in crystalline and amorphous GaAs[J]. *Phys Rev B*, 2002, 66(245203): 1–13.
- [19] Jia J, Li M, Thompson C V. Amorphization of silicon by femtosecond laser pulses [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(16): 3205–3207.
- [20] Rogers M S, Grigoropoulos C P, Minor A M, et al. Absence of amorphous phase in high power femtosecond laser-ablated silicon[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(011111): 1–3.
- [21] Bonse J. All-optical characterization of single femtosecond laser-pulse-induced amorphization in silicon [J]. *Appl Phys A-Mater*, 2006, 84(1–2): 63–66.
- [22] Izawa Y, Tokita S, Fujita M, et al. Ultrathin amorphization of single-crystal silicon by ultraviolet femtosecond laser pulse irradiation[J]. *J Appl Phys*, 2009, 105(064909): 1–4.
- [23] Kiani A, Venkatakrishnan K, Tan B. Micro/nano scale amorphization of silicon by femtosecond laser irradiation[J]. *Opt Express*, 2009, 17(19): 16518–16526.
- [24] Bärsch N, Körber K, Ostendorf A, et al. Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys A-Mater*, 2003, 77(2): 237–242.
- [25] Milovanovi Dubravka S, Petrovic Suzana M, Shulepov Mikhail A, et al. Titanium alloy surface modification by excimer laser irradiation [J]. *Opt Laser Technol*, 2013, 54: 419–427.
- [26] Yang C J, Mei X S, Wang W J. Comparative experimental study of laser-induced transitions in crystalline silicon by femtosecond, picosecond and millisecond Laser ablation [J]. *Radiat Eff Defect S*, 2014, 169(3): 194–203.