

# 激光辐照单晶硅材料的发展现状与展望

曾家铭, 李昌立\*

长春理工大学, 吉林 长春

收稿日期: 2022年4月25日; 录用日期: 2022年5月23日; 发布日期: 2022年5月30日

## 摘要

单晶硅是常用的红外窗口材料和红外滤波片的基底材料, 也是半导体器件和光伏器件的基础材料, 被广泛应用于红外滤波片、芯片、太阳能电池板等。单晶硅的加工方式有传统机械加工和激光加工。由于单晶硅属于脆性材料, 传统的机械加工效率不高且容易出现切面不平滑或者产生炸裂等问题, 影响加工质量。而激光加工相比于金刚石刀具加工具有定位精度高、效率高等优点, 目前激光加工技术已经被广泛应用于单晶硅加工领域。而激光与物质相互作用这门科学是激光加工技术的基础, 不同脉宽的激光器适用于不同种类的加工。本文以激光脉宽分类, 分别介绍其辐照单晶硅材料的发展现状, 总结其各自特点, 提出单晶硅激光加工工艺需要解决的技术问题。

## 关键词

单晶硅, 激光加工, 发展趋势

# Development Status and Prospect of Laser Irradiated Monocrystalline Silicon Materials

Jiaming Zeng, Changli Li\*

Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 25<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2022; published: May 30<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Monocrystalline silicon is a common infrared window material and the base material of infrared filter. It is also the basic material of semiconductor devices and photovoltaic devices. It is widely used in infrared filter, chip, solar panel and so on. The processing methods of monocrystalline silicon include traditional mechanical processing and laser processing. Because monocrystalline sil-

\*通讯作者。

icon is a brittle material, the traditional machining efficiency is not high, and it is easy to have problems such as uneven section or burst, which affects the machining quality. Compared with diamond tool processing, laser processing has the advantages of high positioning accuracy and high efficiency. At present, laser processing technology has been widely used in the field of monocrystalline silicon processing. The science of the interaction between laser and matter is the basis of laser processing technology. Lasers with different pulse widths are suitable for different kinds of processing. Based on the classification of laser pulse width, this paper introduces the development status of irradiated monocrystalline silicon materials, summarizes their respective characteristics, and puts forward the technical problems to be solved in monocrystalline silicon laser processing technology.

## Keywords

Monocrystalline Silicon, Laser Processing, Development Trend

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

自 20 世纪以来, 半导体科学与技术发展迅速, 已经形成了 IT、光伏和照明等产业群。单晶硅非常普遍的应用于国防技术和国民经济的方方面面, 是光电子领域的主要材料。因此单晶硅材料的加工工艺极为重要。传统的单晶硅加工方式有线切割、铣加工以及金刚石工具加工等[1], 而传统加工存在着精度不好、加工效率不高等问题。激光加工相较于传统刀具加工, 其加工精度更高, 且激光加工属于非接触加工不会对靶材产生机械挤压, 满足对半导体材料的加工要求。研究激光与单晶硅相互作用这门科学对于激光加工单晶硅领域而言至关重要。目前各种脉宽的激光器在辐照单晶硅材料方面都有研究, 本文对于这些研究成果进行了详细分析, 指出需要改进的地方, 对于提高单晶硅激光加工工艺具有指导意义。

## 2. 激光辐照单晶硅材料的研究现状

### 1) 毫秒脉冲激光辐照单晶硅的研究

毫秒激光的研究集中在损伤阈值、烧蚀特性以及打孔效率上。2015 年周桂勇通过 1-on-1 和 1000-on-1 测试的方法进行了高斯毫秒脉冲激光辐照单晶硅的损伤实验研究, 得到了两种测试方法的激光损伤阈值以及损伤概率和激光功率密度的关系; 数值计算了单晶硅在激光辐照下的温度变化过程和应力变化过程, 研究了在光斑半径不变的情况下, 提高脉冲能量后靶材温度和应力的不同结果; 研究表明多脉冲相较于单脉冲对于单晶硅的损伤阈值更低; 低功率密度毫秒脉冲激光对单晶硅的损伤主要为热力耦合损伤; 高功率密度毫秒脉冲激光对单晶硅的损伤主要为熔融汽化烧蚀损伤[2]。同年, 郭明针对不同能量密度的毫秒脉冲激光对于单晶硅表面形态的影响进行了实验研究, 由于光的散射和干涉, 单晶硅表面会出现涟漪状波状微结构, 提高激光能量密度后单晶硅表面出现了解理现象。熔融和气化的表面形态主要由载流子动力和等离子体波导致[3]。

2018 年贾志超用毫秒脉冲激光对硅片打孔时, 发现激光功率密度大于  $1 \text{ MW/cm}^2$  时, 会发生滑移现象。而功率过高时, 会产生等离子体, 而要实现高效率的烧蚀, 就要避免形成等离子体, 随后作者通过理论计算得到产生等离子体的激光功率密度阈值约为  $1.5 \text{ GW/cm}^2$ 。作者为了满足烧蚀要求并且避免产生

等离子体, 采用序列脉冲方式加工硅片[4]。

2019年张永祥针对毫秒脉冲激光作用单晶硅产生的燃烧波进行了研究, 研究发现在激光辐照过程中, 激光支持燃烧波的速度与激光辐照时间成正比。如果不改变激光其它参数, 激光支持燃烧波的速度与激光能量大小成正比; 激光支持燃烧波的速度与脉宽成反比[5]。

2020年郭明研究了毫秒脉冲激光对单晶硅的热损伤, 研究发现, 能量密度较高时, 材料在激光的作用下会发生烧蚀损伤, 并且会出现致燃波现象, 由于致燃波的作用, 应力损伤区域和物质喷溅区域有所交叉, 损伤面积与脉冲个数成正比[6]。

### 2) 纳秒脉冲激光辐照单晶硅的研究

纳秒脉冲激光多用于研究材料表面微结构加工。2010年袁春华利用纳秒脉冲激光诱导硅表面微结构, 单晶硅在激光的辐照下表面升温熔化, 产生张力波, 单晶硅材料的蒸发和沉积在辐照区形成锥形微结构。辐照 500 个脉冲后, 材料表面形成了较多的锥形微结构, 如果一直增加脉冲个数, 锥形微结构会逐渐消失, 形成烧蚀坑, 坑的边缘有少量微结构[7]。

与袁春华在固定点用纳秒脉冲诱导微结构不同, 2012年常利阳使纳秒脉冲激光相对于靶材具有一个扫描速度, 研究了激光的能量密度和扫描速度对于微结构的影响。不改变激光扫描速度, 激光能量密度低时, 表面微结构为鱼鳞状波纹结构, 能量密度较高时, 表面微结构为絮状多孔不规则结构。当能量密度为  $50 \text{ J/cm}^2$  时, 提高激光扫描速度, 微结构由液态硅凝固形成的小颗粒转变为鱼鳞状波纹结构。继续提高激光扫描速度, 微结构会变得平整[8]。

2012年王克甫研究了高能纳秒脉冲激光作用单晶硅的相爆炸过程, 提出在高能纳秒脉冲激光的作用下单晶硅复杂的烧蚀形貌是由相爆炸导致的, 相爆炸导致单晶硅液-气混合物飞溅, 形成坑状结构, 飞溅物降温后在材料表面形成条状和点状冷却物[9]。2019年肖超使用纳秒脉冲激光比较了单纵模和多纵模模式对于单晶硅材料的损伤特性。研究发现在两种模式下, 激光对单晶硅的损伤形貌和损伤阈值基本相同[10]。

2014年谢长鑫对于单纳秒脉冲激光诱导硅表面的微结构的形成原因进行了研究, 研究表明温度分布不均匀引起的热毛细流作用以及表面活性剂浓度导致的毛细作用共同原因下, 材料会形成弹坑状、尖峰和边缘隆起等形貌[11]。

2021年储成龙用紫外纳秒脉冲激光刻蚀单晶硅靶材, 当扫描次数为单次时, 要想获得理想的刻蚀深度和宽度, 就要增大激光能量密度, 而能量密度的激光脉冲会使靶材产生更多的飞溅物, 且靶材会出现裂纹影响加工质量。如果增加激光的扫描次数, 则能够在较小的激光能量密度条件下, 获得想要的刻蚀深度和宽度, 同时能避免由于激光能量密度太大对靶材造成的损伤[12]。2022年储成龙用纳秒脉冲激光加工单晶硅表面微结构发现, 通过提高光斑的扫描速度降低光斑重叠率, 可以减小热影响区, 减小重凝层面积, 获得均匀的表面微结构, 以此来提高激光加工单晶硅表面微结构的质量[13]。

### 3) 飞秒脉冲激光辐照单晶硅的研究

飞秒激光具有峰值功率高、热影响区小等特点, 飞秒激光在单晶硅材料微结构加工上有独特优势。通过在单晶硅材料表面加工微结构可以改变材料的颜色、疏水特性以及光学特性。

为了提高硅材料的对光的吸收率, 2013年马鹏飞利用飞秒激光对硅表面进行扫描刻蚀, 刻蚀形成的沟槽底部密布着微纳米颗粒, 降低了硅材料的反射率, 提高了吸收率。微纳米结构数量先是随着能量密度的增加而增加, 能量密度到达一定值后继续升高能量密度, 微纳米结构逐渐消失, 被微米结构取代[14]。同年周强为了加工出规则分布并且周期可控的单晶硅表面微结构, 使用多光束干涉的办法对加工的场分布进行调制, 加工出了规则均匀的微结构[15]。

由于飞秒激光加工单晶硅过程中会出现热波现象, 使得靶材内部出现融化和再凝固, 破坏原有的晶

体结构, 影响加工质量, 为了解决这个问题, 2014年周卫国利用水导激光加工硅材料, 相比于直接作用飞秒激光, 水导激光加工材料的热影响区更小, 存在时间更短, 抑制了热波的传播, 有效提高了加工质量[16]。

微结构能影响材料的疏水性能, 为了研究液滴在单晶硅表面的铺展机理, 2021年杨奇彪利用飞秒激光在单晶硅表面加工方形微凹坑阵列, 分析了不同能量密度下激光加工出的微结构对于液滴铺展速度的影响[17]。

#### 4) 连续激光辐照单晶硅的研究

目前在连续激光作用单晶硅的方向上, 有关于温度场和应力场的研究。2004年彭玉峰利用格林函数方法计算了连续激光作用下单晶硅的温度场分布, 通过这种方法得到了靶材温度场分布的解析形式, 给出了不同吸收系数与靶材温升的关系式及其关系曲线, 给出了光斑半径与靶材温度变化的关系曲线。计算结果表明在材料温度场的计算上, 材料以及激光的参数如: 热容、热导率、密度、功率密度、能量分布以及辐照时间等对于计算结果影响很大。在数值计算过程中要将这些因素考虑进方程式, 才能使计算结果更加精准[18]。

2005年崔金玲研究了单晶硅的热畸变特性。作者利用格林函数方法计算单晶硅的温度分布和热变形。发现在激光作用的初始阶段, 单晶硅的热变形量增加的速度很快, 随着激光的继续作用, 靶材的热变形量增加的速度变缓[19]。

#### 5) 组合激光辐照单晶硅的研究

在组合激光方面的研究主要是集中在提高材料对激光的耦合效率上, 2015年李桂桂和2016年钟发成在纳秒-毫秒组合激光作用单晶硅材料上进行了研究, 他们研究发现组合激光能提高材料对激光的耦合效率, 分析了纳秒-毫秒延迟时间和能量配比对于激光作用靶材效果的影响, 结果表明延迟时间能影响组合脉冲激光的作用效果, 存在最佳延迟时间, 提高纳秒激光能量密度, 最佳延迟时间会缩短[20][21]。

2018年张明鑫对纳秒-连续组合激光辐照单晶硅的应力场进行了数值分析, 模型中的纳秒脉冲激光和连续激光的光斑半径均为0.15 mm, 计算结果表明, 在相同的平均功率密度条件下, 纳秒-连续组合激光辐照靶材产生的应力要大于连续激光产生的应力, 更容易对靶材造成应力损伤[22]。

### 3. 总结

毫秒脉冲激光和连续激光多用于激光打孔和激光切割, 纳秒和飞秒激光由于功率密度高, 在辐照单晶硅靶材过程中容易击穿空气和形成等离子体, 导致烧蚀效率低, 因此这类短脉冲激光器不适合用于打孔和切割等工艺中。纳秒激光和飞秒激光多用于单晶硅表面微结构的加工, 纳秒激光器相较于飞秒激光器, 其价格相对便宜, 加工效率高, 但是仍然难以避免加工过程中出现的热损伤等问题。飞秒激光的峰值功率高、热影响区小, 飞秒激光用于单晶硅微结构加工具有独特优势, 飞秒激光可以在极小的区域内辐照单晶硅, 使得能量扩散的范围非常小, 对辐照区周围的材料几乎无影响, 达到高精度和低损伤的加工效果, 但是如果飞秒激光的能量过高, 或者对材料加工的次数太多时, 仍然会出现明显的液态相重凝现象。因此飞秒激光适合对较薄的单晶硅加工, 而对于具有一定厚度的单晶硅材料, 出于成本考虑也可用纳秒激光对其加工。单晶硅材料对于组合激光的耦合效率要高于单个激光, 在相同的激光能量下, 组合激光对于单晶硅的烧蚀效率要高于单个激光。但是组合激光辐照材料产生的热应力也要更大, 更容易对靶材造成应力损伤。

### 4. 展望

在激光辐照单晶硅材料的发展现状中, 不同脉宽的激光有其独特优势的加工领域。但是几乎所有脉

宽的激光器在加工单晶硅材料时都会对靶材产生温度梯度, 进而产生热应力, 难以避免应力损伤的问题, 而目前对于这个问题没有较好的解决方法。由于单晶硅是脆性材料, 激光辐照单晶硅过程中产生的应力可能会使单晶硅产生裂纹甚至炸裂。单晶硅激光加工过程中的应力损伤现象严重影响了加工质量。如果能减小各个脉宽的激光器在辐照单晶硅材料过程中产生的热应力, 达到减小应力损伤的效果, 这对于单晶硅激光加工领域而言意义重大, 能够促进单晶硅激光加工领域的发展。

## 参考文献

- [1] 袁根福, 曾晓雁. 固体激光铣削单晶硅表面形貌研究[J]. 应用激光, 2005, 25(3): 145-147.
- [2] 周桂勇. 长脉冲辐照单晶硅的损伤特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2015.
- [3] 郭明, 金光勇, 高勋, 等. 长脉冲激光辐照单晶硅的表面形态[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(5): 548-552.
- [4] 贾志超. 近红外激光辐照致硅热应力损伤机理研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [5] 张永祥, 郭明. 毫秒激光辐照单晶硅产生燃烧波仿真及实验[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(5): 566-570.
- [6] 郭明, 张永祥, 李宏. 脉冲串毫秒激光对单晶硅的热损伤[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 199-205.
- [7] 袁春华, 李晓红, 唐多昌, 等. 纳秒激光脉冲诱导硅表面微结构[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 393-396.
- [8] 常利阳, 李晓红, 邱荣, 等. 532nm 纳秒激光辐照下的单晶硅表面微结构及荧光特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2599-2603.
- [9] 王克甫, 张秋慧. 高能纳秒激光烧蚀单晶硅的微观结构[J]. 激光杂志, 2012, 33(5): 36-37.
- [10] 谢长鑫, 李晓红, 朱敏, 等. 单脉冲纳秒激光诱导硅表面微结构[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(11): 114101.
- [11] 肖超, 王毕艺, 官上洪, 等. 不同模式纳秒激光诱导单晶硅损伤特性研究[J]. 激光杂志, 2019, 40(11): 67-70.
- [12] 张全利, 储成龙, 翟健超, 等. 紫外纳秒脉冲激光烧蚀单晶硅表面特征创成机制[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 508-520.
- [13] 储成龙, 汪奇文, 张振, 等. 单晶硅表面微结构纳秒脉冲激光加工研究[J]. 机械制造, 2022, 6(1): 23-26.
- [14] 马鹏飞, 王克栋, 常方高, 等. 不同能量密度的飞秒激光辐照对单晶硅的影响研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(2): 273-277.
- [15] 周强. 飞秒激光制备单晶硅表面微结构研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安邮电大学, 2013.
- [16] 周卫国. 基于分子动力学的飞秒激光烧蚀硅的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [17] 杨奇彪, 卞若男, 王杰, 等. 飞秒激光制备梯度润湿性单晶硅表面[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 175-180.
- [18] 彭玉峰, 盛朝霞, 张虎, 等. 激光辐照下固体材料的温度分布理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(10): 1225-1228.
- [19] 崔金玲, 彭玉峰, 程祖海. 强激光作用下单晶硅的热畸变特性研究[J]. 河南师范大学学报, 2005, 33(3): 36-38.
- [20] 李桂桂. 组合激光对单晶硅热作用的数值分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [21] 钟发成. 组合脉冲激光致单晶硅热作用的数值计算[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [22] 张明鑫, 聂劲松, 孙可, 等. 组合激光辐照单晶硅的热作用数值分析[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1106011.