

文章编号: 1001-3806(2017)05-0637-07

组合激光对单晶硅热作用的数值分析

钟发成, 吕雪明, 李佳桂, 沈中华, 陆健, 倪晓武*

(南京理工大学 理学院, 南京 210094)

摘要: 为了提高激光加工中单晶硅材料对激光能量的耦合效率, 采用一个短脉冲激光和一个长脉冲激光形成组合激光辐照单晶硅, 使用 COMSOL 软件对该过程进行模拟, 得到了组合激光长短脉冲间的延迟时间和长脉冲激光能量密度的变化对作用效果的影响, 并与总能量相等的毫秒激光单独作用的效果进行比较; 实验测量得到的不同能量密度的激光作用单晶硅后损伤形貌, 与数值计算结果的趋势吻合。结果表明, 组合激光能提高材料对激光的耦合效率; 不同的延迟时间会影响组合激光的作用效果, 最佳延迟时间为 0.1ms; 组合激光中毫秒激光能量密度占比较低时, 作用效能较明显, 随着毫秒激光能量密度占比的提高, 对作用效果的提升相对变缓。该研究结果可以为组合激光的应用提供理论和实验依据。

关键词: 激光技术; 组合激光; 单晶硅; 激光能量; 最佳延迟时间

中图分类号: TG665 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.05.004

Numerical analysis of thermal effect of the combined laser on single crystal silicon

ZHONG Facheng, LÜ Xueming, LI Jiagui, SHEN Zhonghua, LU Jian, NI Xiaowu

(College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve coupling efficiency of laser energy of monocrystalline silicon in laser processing, a short laser pulse and a long laser pulse were used to form a combined pulse to irradiate the monocrystalline silicon. The process was simulated by using COMSOL software. The influences of the delay time of combination laser and the laser energy density of long pulse on the process effect were obtained. The effect was compared with that of individual action millisecond laser under the equal total energy. The measured damage morphologies of monocrystalline silicon irradiated by lasers with different power intensities were in agreement with the trend of numerical results. The results show that the combined laser can improve the coupling efficiency of laser. The different delay time would affect the process effect of the combined laser. The optimum delay time is 0.1ms. When the ratio of the millisecond laser energy density in the combined laser is relatively low, the effect is obvious. With the increase of the ratio of the millisecond laser energy density, the enhancement of the effect is relatively slow. The research results can provide theoretical and experimental basis for the application of combined laser.

Key words: laser technique; the combined laser; single crystal silicon; laser energy; the optimum delay time

引言

随着激光与物质相互作用的研究不断发展, 为提高材料对激光能量的耦合效率, 人们提出了组合激光^[1]的概念。组合激光即用两束或者多束不同特性的脉冲激光组合成脉冲串, 使用脉宽为纳秒量级的短脉冲激光辐照材料表面, 利用其高功率的特性, 能够快速提高材料表面的温度, 但是纳秒激光包含的总能量较小, 因而引起局部功率损伤居多。相比而言, 脉宽为

毫秒量级的激光单脉冲携带数百甚至数千焦耳的能量, 可以导致材料产生大面积的损伤。提出组合激光的中心思想就是要利用短脉冲的高功率激光快速提升目标表面温度, 进而根据材料吸收率与温度成正相关的关系^[2], 改变材料表面对后续激光能量的吸收特性, 提高材料对激光能量的耦合效率且产生初始损伤; 随后的长脉冲激光束利用其携带的激光能量进一步加大损伤面积和深度。通过使用由毫秒激光与纳秒激光形成的组合激光共同作用于材料, 可以有效地提高损伤效能。

目前, 人们在研究联合使用两束激光与材料的相互作用时, 主要关注的是联合作用模式相对于单束模式的优缺点以及不同组合参量对激光热作用效能的影响。FORSMAN 等人^[3]利用脉宽为 3ns、时间间隔为几

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61605079)

作者简介: 钟发成(1982-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光与物质相互作用的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jsnjnxw@gmail.com

收稿日期: 2016-12-11; 收到修改稿日期: 2016-12-29

十纳秒的两束相同脉宽的纳秒激光组成的双脉冲激光对不同厚度的不锈钢和铝打孔,结果表明,该双脉冲激光的打孔效率提高了 3 ~ 10 倍,并且孔的质量也得到大幅提高。WANG 等人^[4]把脉宽 21ns、脉冲间隔为 52ns 的两束激光辐照在不锈钢表面,发现相同能量的双脉冲在空气中的打孔效率比单脉冲提高了 1 倍。LEHANE 等人^[5]把脉宽为 0.15ms 和 3.5ms 的脉冲激光联合起来用于不锈钢打孔,研究了两束脉冲之间的时间间隔对打孔效率的影响,并且得到了最佳延迟时间。JIAO 等人^[6-7]从数值计算和实验测量两个方面研究了重频激光与连续激光联合辐照 Q235 钢靶和 45# 钢靶,结果表明:采用高功率脉冲激光对钢靶表面进行一定程度的预辐照可以改变材料表面的吸收率,从而大幅提高材料吸收后续激光的能力。XIAO 等人^[8-9]对长脉冲激光与连续激光联合辐照铝合金的温度场与应力场进行了仿真,结果表明:使用连续激光预热材料能显著增强长脉冲激光的作用效果;两束激光的时间间隔大于某特定值时,脉冲激光所造成的温升才会逐渐增加;激光辐照中心点的最高温度和熔池的大小主要由峰值功率较高的长脉冲激光决定,如果选择合适的连续激光预热尤其是当连续激光的功率密度达到 10^5 W/cm^2 量级时,联合作用激光能显著增大熔池的尺寸并适量提高辐照中心点的温度。但是针对长脉冲激光和短脉冲激光联合作用模式,不同组合参量对激光作用效能的影响鲜有报道。

研究激光与物质的相互作用对应的物理效应时,数值仿真是一种重要的研究方法。为了探究不同的组合参量对组合激光热效能的影响,本文中以单晶硅为研究对象,利用有限元分析方法研究了其在不同组合参量下的温度场,在考虑了吸收率随温度变化的情况下,分析了组合激光间长短脉冲发射起始时刻的时间间隔、长脉冲能量密度的变化对单晶硅熔池的影响。继而进行的验证实验结果与仿真结果较好地吻合。

1 理论模型

在建立激光辐照单晶硅的物理模型时,假设激光垂直辐照在单晶硅表面,并且入射光束的横截面强度按高斯型分布,建立了 2 维轴对称有限元模型对激光辐照过程进行数值模拟,如图 1 所示。

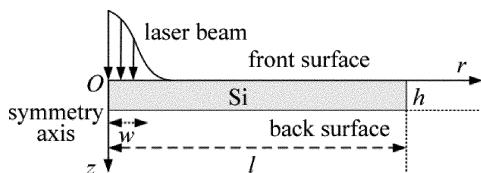


Fig. 1 Schematic diagram of laser irradiation

图 1 中, z 为对称轴; l 为单晶硅材料的半径, 取为 3mm; h 为单晶硅的厚度, 取为 1mm; O 为靶材的中心点; r 为激光光斑半径; w 为激光光斑半径。为了简化计算, 做了一些假设: (1) 材料是各向同性的; (2) 激光作用过程中未出现气化现象; (3) 不考虑材料液化后的流动, 且液相区域仍作为热传导处理。

本文中选用的是 Nd:YAG 脉冲激光器, 其激光波长为 1064nm, 光子能量为 $h\nu = 1.17 \text{ eV}$, 其中 ν 表示频率, 单晶硅的禁带宽度 $E = 1.12 \text{ eV}$, 当满足 $h\nu > E$ 时, 初始吸收主要为本征吸收, 产生大量自由载流子, 随后自由载流子在吸收能量的同时向周围扩散, 通过和晶格的耦合将能量传递给晶格, 这种能量的沉积致使材料升温, 进而产生熔融和气化。

对于脉宽为毫秒量级及纳秒量级的激光与单晶硅材料作用的 2 维轴对称模型中, 热传导方程^[10]为:

$$\rho c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \kappa \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + Q(r, z, t) \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度, c 为比热容, $T(r, z, t)$ 表示瞬时温度, κ 为热导率, t 为时间; 一般来讲, 材料的物理参量 (如比热容、热传导率、表面反射率、吸收系数) 随温度变化而变化, $Q(r, z, t)$ 表示内热源, 是空间和时间的相关函数。

根据高斯光束的空间分布^[10]可以表示为:

$$I(r, z) = \frac{2I_0}{\pi w^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (2)$$

式中, I_0 为峰值功率。

用 τ 代表脉宽, 激光随时间分布可用函数 $g(t)$ ^[10] 表示:

$$g(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t \leq \tau) \\ 0, & (t > \tau) \end{cases} \quad (3)$$

热源 Q ^[10] 可以写为:

$$Q(r, z, t) = (1 - R) \alpha I(r, z) g(t) \exp(-\alpha z) \quad (4)$$

式中, R 和 α 分别是波长为 1064nm 对应的反射率和吸收系数, 它们都是与温度相关的函数。

边界条件为:

$$\begin{aligned} -\kappa \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} &= -\kappa \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=l} = 0 \\ -\kappa \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{z=h} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

初始条件为:

$$T(r, z, t) \Big|_{t=0} = T_0 \quad (6)$$

初始温度为:

$$T_0 = 300\text{K} \quad (7)$$

式中, l 和 h 分别表示硅片的半径和厚度。毫秒激光的脉宽为 1ms, 纳秒激光的脉宽为 10ns。单晶硅的熔点是 1685K, 沸点是 3538K, 熔化潜热是 1800J/g, 其它热物理参量如表 1 所示。

Table 1 Thermal physical parameters of single crystal silicon^[11-14]

parameter	solid	liquid
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$2330 - 2.19 \times 10^{-2} T$	$2540 - 2.19 \times 10^{-2} T - 1.21 \times 10^{-5} T^2$
$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$352.43 + 1.78 T - 2.21 \times 10^{-3} T^2 + 1.3 \times 10^{-6} T^3 - 2.83 \times 10^{-10} T^4$	1021.84
$\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$299 / (T - 99)$	0.62
$R (1064\text{nm})$	0.33	0.72
α / m^{-1}	$1023 \times (T/T_0)^4$	8.6×10^7

2 计算结果与分析

2.1 组合激光可行性分析

为比较材料对组合激光与单独毫秒激光的耦合效率, 首先研究不同能量的单独毫秒激光辐照单晶硅后光斑中心温度的变化。毫秒激光能量分别取 500mJ, 700mJ 和 900mJ, 光斑半径为 500 μm , 图 2 为它们分别辐照单晶硅片后光斑中心点温度随时间的变化。从图 2 中可以看出, 激光能量为 500mJ 的毫秒激光辐照单晶硅片 1ms, 辐照中心点温度从 0 时刻开始迅速上升, 在 1ms 时达到 1685K, 然后开始迅速下降, 但是不同时刻的温升速率不尽相同, 这是因为随着激光辐照时间的延续, 靶材被逐渐加热, 温度越来越高, 其对激光能量的吸收率逐步加大, 所以温升速率亦逐渐变大。当温度接近熔点 1685K 时, 由于熔融潜热的存在温升速率逐渐变小。当激光能量为 700mJ 和 900mJ 时, 由于能量较大, 辐照中心点的温度能更快地到熔点, 此后还有后续激光能量的输入, 因此温度能继续上升, 但上升得较为缓慢, 在 1ms 后, 激光停止辐照, 辐照中心点由于没有能量的输入, 温度迅速下降至 1685K, 此后保持一段时间(即降温平台期), 然后再迅速下降, 这是因为靶材存在凝固潜热。能量为 900mJ 的激光辐照后

的平台期要比能量为 700mJ 的更长, 这是因为能量为 900mJ 的激光辐照后熔融区域更大, 中心点凝固所需的时间更长。

下面研究由纳秒激光和毫秒激光构成的组合激光对单晶硅片辐照时, 不同延迟时间下辐照中心点温度随时间的变化情况。纳秒激光的能量为 8mJ, 光斑半径为 100 μm ; 毫秒激光的能量为 492mJ, 光斑半径为 500 μm , 将其构成组合激光。用该组合激光辐照单晶硅片时, Δt 为延迟时间, 延迟时间是以毫秒激光发起时刻为起始点, 如果纳秒激光在毫秒激光之前, Δt 为负值, 纳秒激光在毫秒激光之后, Δt 为正值。图 3 中给出了不同延时的组合激光辐照中心点温度与时间的变化关系。 $\Delta t = 0\text{ms}$ 对应着纳秒激光和毫秒激光同时辐照靶材, 在辐照后中心点迅速升温达到 2700K 左右, 然后又迅速降温至 1685K, 此后有一个短暂的平台期, 然后再次降温至 500K 左右, 此后再次迅速升温, 在 1ms 即毫秒激光加载结束时达到 1685K, 此后再次经历短暂的平台期, 然后逐渐降至室温。这是因为纳秒激光的功率密度较大, 其辐照区域因为吸收纳秒激光的能量迅速升温并熔融, 但纳秒激光的脉宽只有 10ns, 在其加载结束后, 毫秒激光辐照范围内(除去纳秒激光的辐照区域)的温度较低, 虽然有毫秒激光继续提供能量, 但不足以维持辐照中心点的熔融状态, 其能量从中心向周围扩散, 因此在经历短暂的平台期后温度再次下降, 但随着时间的增长, 辐照中心点吸收了更多的毫秒激光能量后再次升温, 当毫秒激光结束时, 温度达到 1685K, 下面再次经历一个短暂的平台期, 然后温度逐渐降至室温, 两个平台期都是因为靶材存在凝固潜热。 $\Delta t = 0.3\text{ms}$ 对应的温升曲线与 $\Delta t = 0\text{ms}$ 的有些相似, 但它的第 1 个平台期更长, 这是因为此时毫秒激光已经辐照了 0.3ms, 靶材吸收了较多的毫秒激光能量, 温度也更高, 因此其辐照中心凝固所需的时间也 longer。 $\Delta t = 0.8\text{ms}$ 对应的温升曲线只有一个平台期, 这是因为纳秒激光辐照结束时, 毫秒激光已经辐照了 0.8ms, 靶材吸收了更多的毫秒激光能量, 后面毫秒

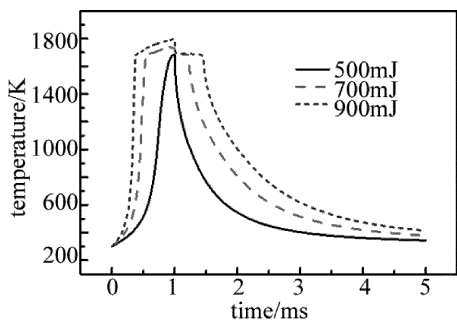


Fig. 2 Relationship between temperature of the center induced by the millisecond laser and time with different energies

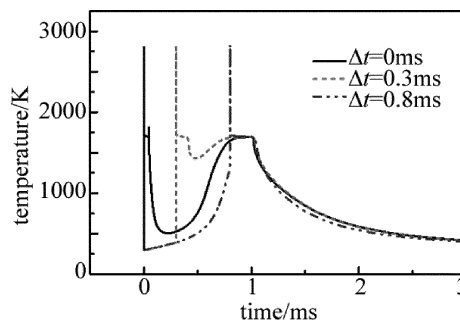


Fig. 3 Relationship between temperature of the center induced by the combined laser and Δt with different delay times

激光继续提供能量维持了中心点的熔融状态,直至毫秒激光辐照结束后,中心点温度再次经历一个平台期,这个平台期是中心点的凝固过程,这是两个平台期合拢的结果。结合3条曲线可以看出,纳秒激光辐照后中心点温度较高,但随着延迟时间的逐渐增大,降温的幅度变小。材料吸收率与温度是正相关的,纳秒辐照后产生的高温可以提高材料对激光的吸收率,因而可见组合激光能使材料吸收更多激光能量。

选取 $\Delta t = 0.1\text{ms}$ 的组合激光,分析它们对单晶硅作用后的熔融范围,然后与相同能量的单独毫秒激光的作用效果相比较,进而说明组合激光能提高材料对激光能量的耦合效率。这里分别使用总能量均为 500mJ 的单独毫秒激光和组合激光辐照单晶硅片,其中组合激光中毫秒激光能量 492mJ ,纳秒激光能量为 8mJ 。从图4和图5中可以看出,激光作用结束时辐照中心点都达到了熔点,但无论是径向还是轴向组合激光的熔融范围都要比单毫秒激光的大。由此可见,在入射激光能量相同时,组合激光可以加强激光的作用效果,提高材料对激光能量的耦合效率。下面将进一步研究延迟时间和两束激光能量配比对作用效果的影响。

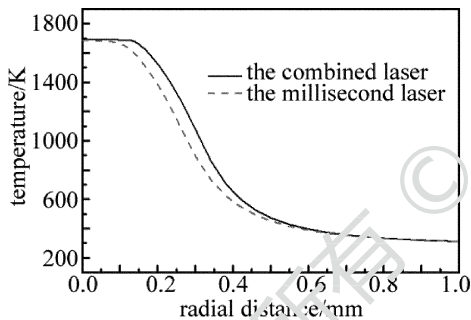


Fig. 4 Relationship between temperature and radial distance after laser irradiation

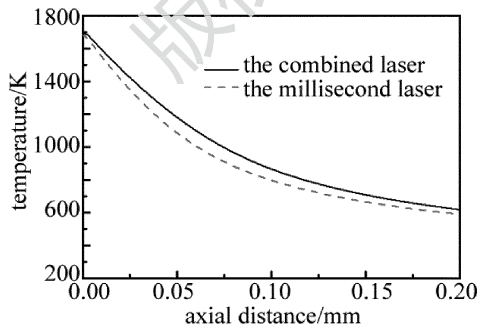


Fig. 5 Relationship between temperature and axial distance after laser irradiation

2.2 延迟时间对组合激光作用效果的影响

固定纳秒激光的能量为 8mJ ,光斑半径为 $100\mu\text{m}$;毫秒激光的能量为 492mJ ,光斑半径为 $500\mu\text{m}$,研究延迟时间对组合激光作用效果的影响。用组合激光辐照单晶硅

片, Δt 为延迟时间,通过改变 Δt 观察其作用效果。

从图6和图7中可以看出,组合激光作用单晶硅后,单晶硅熔融半径和深度都随延迟时间先增加后减小,并且在 $\Delta t = 0.1\text{ms}$ 同时达到峰值点,因此定义该峰值点对应的时间为最佳延迟时间。由此可见,延迟时间能明显影响组合激光的作用效果。这是因为在纳秒激光结束后,靶材的纳秒辐照区域温度较高,而除此之外的毫秒激光辐照区域温度较低,纳秒激光辐照区域的能量要向其周围扩散,造成其周围的温度升高,辐照中心点的温度降低,从图3中可以看出, Δt 越小,辐照中心点的温度降低的幅度越大,但作用后的影响时间却更长; Δt 越大,辐照中心点的温度降低的幅度越小,辐照中心区域维持较高温,但纳秒激光作用后影响的时间却较短,考虑到靶材的吸收率与温度正相关,因此延长高温时间能加大材料对激光的吸收,从而增加了组合激光作用效果。由此得到了最佳延迟时间,为 $\Delta t = 0.1\text{ms}$ 。

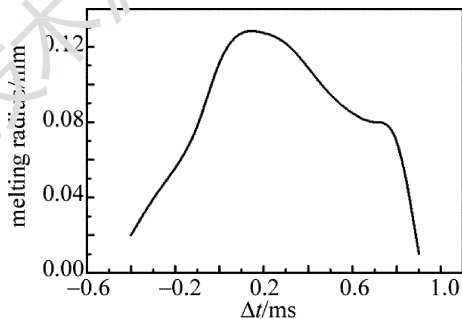


Fig. 6 Relationship between melting radius and delay time

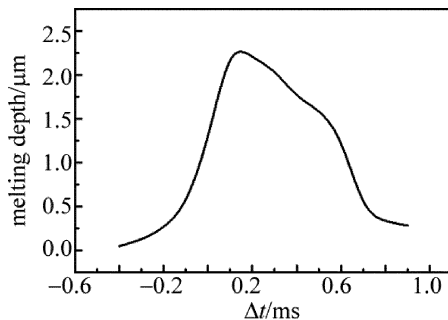


Fig. 7 Relationship between melting depth and delay time

2.3 毫秒激光能量变化对组合激光作用效果影响

下面固定纳秒激光的能量和延迟时间,进一步研究毫秒激光能量变化对组合作用效果的影响,然后与总能量相等的单毫秒激光的作用效果进行比较。这里纳秒激光能量保持 8mJ 不变,光斑半径为 $100\mu\text{m}$,改变组合激光中毫秒激光能量,并使组合激光总能量与单毫秒激光能量相等,毫秒激光的光斑半径为 $500\mu\text{m}$, Δt 取最佳延迟时间 0.1ms 。

从图8可以看出,组合激光和单毫秒激光致靶材的熔融半径都随能量的增大而增大,并且增大的趋势

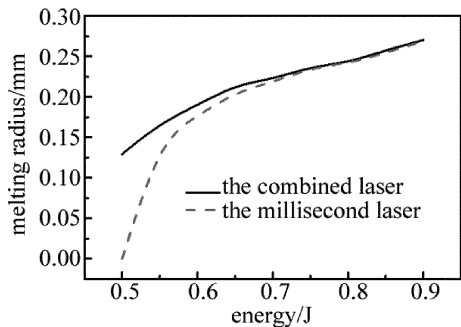


Fig. 8 Relationship between melting radius and energy after laser irradiation
越来越平缓,在能量大于 0.75J 时,二者的熔融半径趋于相等。由图 9 可知,组合激光和单毫秒激光致靶材的熔融半径的比值随毫秒激光能量增大而减小,在毫秒激光能量大于 0.75J 时,二者熔融半径的比值趋于 1。

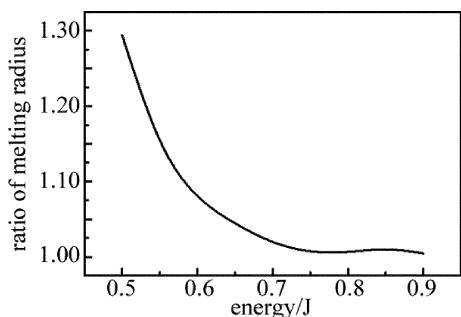


Fig. 9 Relationship between the ratio of melting radius and energy

从图 10 和图 11 可以看出,随着单毫秒激光能量的变大,组合激光和单毫秒激光致靶材的熔融深度近似线性增大,组合激光致靶材的熔融深度大于单毫秒的作用效果,但由于总体熔融深度的增加,它们的比值逐渐降低,在毫秒激光能量大于 0.75J 时,二者熔融深度的比值趋于 1。由此可见:毫秒激光能量占比越低,其与纳秒激光组合后的作用效果的劣势就越明显,随着毫秒激光能量占比的提高,组合激光和单毫秒激光的作用效果趋于相同。这主要由以下几个方面原因导致的:(1)由于纳秒激光的能量是固定的,随着毫秒激光能量的提高,纳秒激光在组合激光中的占比逐渐变低,纳秒激光对组合激光作用效果的影响越来越小;(2)随着毫秒激光能量占比的提高,毫秒激光已经能够对靶材造成很大的能量损伤,后续加入的纳秒激光

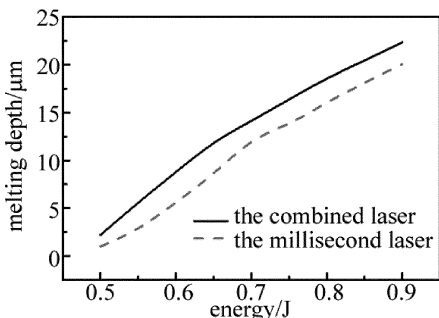


Fig. 10 Relationship between melting depth and energy after laser irradiation

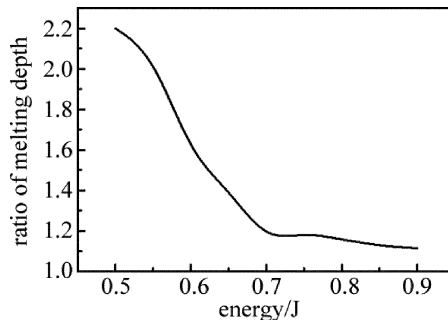


Fig. 11 Relationship between the ratio of melting depth and energy
带来的功率损伤效果就不甚明显。

3 实验验证

3.1 实验装置和样品

为验证前面得到的结论,进行了相关的实验。图 12 为实验装置示意图。纳秒激光与毫秒激光都来自输出波长 1064nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器,毫秒激光器为 Beam-tech Optronics Co., Ltd 的 Melar_50 型激光器,脉宽在 0.5ms~2.5ms 之间可调,最大输出能量为 50J。纳秒激光器型号为 DAWA-200,脉宽为 7ns,最大输出能量为 200mJ。纳秒激光和毫秒激光分别通过分光片(Beam splitter, BS),然后通过衰减片衰减后由透镜 L₁ 聚焦,照射到靶材表面上,控制纳秒光斑半径为 0.1mm,控制毫秒光斑半径为 0.5mm,能量计实时检测激光能量,控制纳秒激光能量为 8mJ,同时改变毫秒激光的能量。靶材被固定在实验平台上,可以通过操控步进电机来改变靶材的位置。实验中用 DG535 数字延时脉冲发生器控制两台激光器之间的延迟时间,在实验装置中光电二极管用来探测两束激光之间的脉冲延迟时间,两束激光的脉冲延迟时间的定义和数值模拟时相同。实验中所用样品为 P 型掺杂<100>单晶硅片,半径为 25.4mm,厚度为 0.5mm,实验前用异丙醇、氢氟酸和去离子水清洗单晶硅片的表面。实验在室温常压下的空气下进行。图中 PBS 为偏振分光棱镜(polarized beam splitter)。

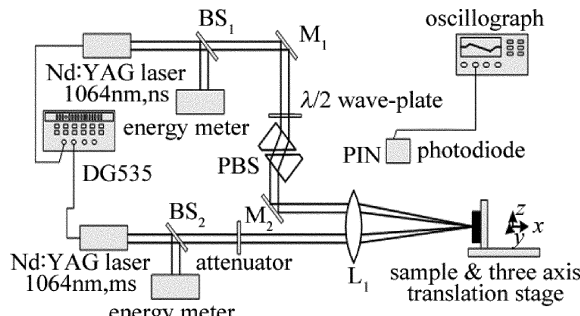


Fig. 12 Diagram of experimental device

3.2 实验结果与分析

图 13 为不同能量密度下的毫秒激光与延迟时间

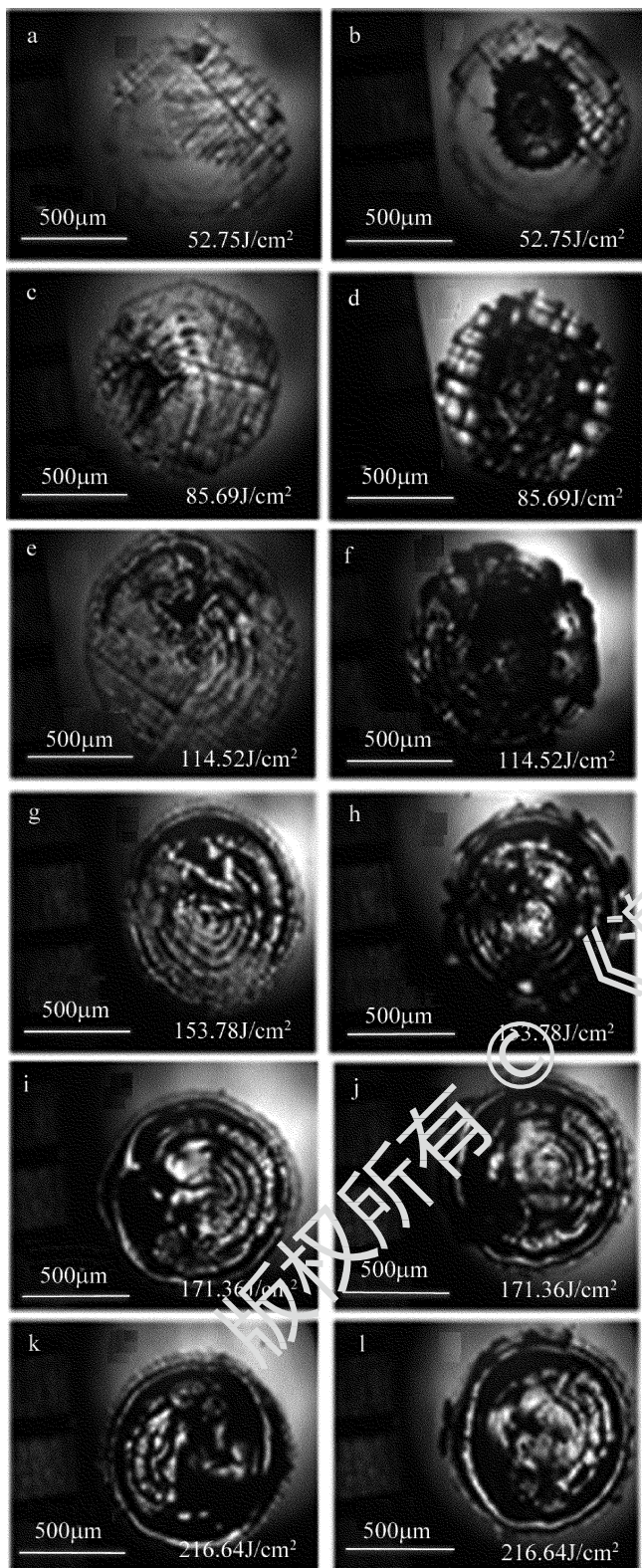


Fig. 13 Damage morphology

a, c, e, g, i, k—the millisecond laser b, d, f, h, j, l—the combined laser $\Delta t = 0.1 \text{ms}$ 且和单毫秒相同能量的组合激光致单晶硅片的损伤形貌图。图 13a 是能量为 414mJ 的单毫秒的损伤形貌图, 相应的能量密度为 52.75J/cm^2 , 由于能量密度较小, 毫秒激光未造成单晶硅的熔融, 但在激光辐照区域却出现了解理裂纹, 这是因为辐照结束后, 辐

照区域降温导致材料的热应力的增大, 超出了单晶硅的抗拉强度^[15]; 图 13b 是总能量为 414mJ 的组合激光的损伤形貌图, 辐照中心已经熔融, 并且形成凹坑, 有迁移物质离开材料; 图 13c 是能量为 672mJ 的单毫秒的损伤形貌图, 相对应的能量密度为 85.69J/cm^2 , 从图中可以看到, 单独毫秒激光已经造成了单晶硅部分区域的熔融; 从图 13d 可以看出, 相等能量的组合激光致单晶硅的熔融范围更大。通过对比图 13a、图 13c、图 13e、图 13g 这 4 幅图可见, 随着毫秒激光能量密度的增加, 单晶硅的熔融范围显著加大, 从图 13b、图 13d、图 13f、图 13h 这 4 幅图中也能看出同样的情况, 这与图 8 中给出的损伤变化趋势相吻合。通过图 13a、图 13b、图 13c、图 13d 和图 13e、图 13f、图 13g、图 13h 这样两两对比可以发现, 当毫秒激光能量密度在 153.78J/cm^2 以下时, 组合激光的作用效果比较明显。通过分别对比图 13i、图 13j 和图 13k、图 13l 这几幅损伤形貌图, 在毫秒激光能量密度大于 171.36J/cm^2 时, 组合激光作用效果的优势不明显, 这和图 8 与图 9 中给出的趋势吻合。但是实验结果和模拟的结果存在一定的差异, 这是因为: 为了便于找到规律, 数值模拟中只考虑了温度对吸收率的影响, 实际上纳秒激光的功率密度很大, 在其辐照的过程中必然存在非线性效应; 另外, 单晶硅的表面缺陷和杂质等也同样会影响对激光能量的吸收, 这些都会造成实验结果和模拟结果的差异。

4 结论

针对组合激光的工作模式, 利用有限元软件 COMSOL 计算了不同组合参量作用下单晶硅的温度变化情况。

(1) 组合激光对于加强激光作用效能, 提高材料对激光能量的耦合效率具有显著的提升作用。

(2) 在相同的人射激光总能量时, 延迟时间能影响组合激光作用效果, 且可以得到最佳延迟时间。

(3) 毫秒激光的能量对组合激光作用效果影响较大, 毫秒激光能量占比越低, 其与纳秒激光组合后的作用效果的优势越明显, 随着毫秒激光能量占比的提高, 组合激光和单毫秒激光的作用效果趋于相同。

参考文献

[1] PAN Y, ZHANG H, CHEN J, *et al.* Millisecond laser machining of transparent materials assisted by nanosecond laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 765-775.
 [2] LI L Q, CHEN Y B, TAO W. Reserch on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(11): 1783-1788 (in Chinese)
 [3] FORSMAN A C, BANKS P S, PERRY M D, *et al.* Doublepulse ma-

- ching as a techniques for the enhancement of material removal rates in laser machining of metals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(3):033302.
- [4] WANG X D, MICHALOWSKI A, WALTER D, *et al.* Laser drilling of stainless steel with nanosecond double-pulse[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(2):148-153.
- [5] LEHANE C, KWOK H S. Enhanced drilling using a dual-pulse Nd:YAG laser[J]. *Applied Physics*, 2001, A73(1):45-48.
- [6] JIAO L G, ZHAO G M, CHEN M S. Simulation of temperature rise of 45[#] steel target irradiated by combined laser in the two dimensional cases[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1):42-46 (in Chinese).
- [7] JIAO L G, ZHAO G M, CHEN M S. Investigation on the irradiation effects of Q235 steel targets by combined laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5):848-852 (in Chinese).
- [8] XIAO Q, HE H X, XIA H J. Stress simulation on aluminium alloy irradiated by long pulsed laser and continuous wave laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11):1103002 (in Chinese).
- [9] XIAO Q, HE H X, XIA H J. Temperature field simulation on aluminium alloy irradiated by long pulsed laser and continuous wave laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8):0803009 (in Chinese).
- [10] WANG X, QIN Y, WANG B, *et al.* Numerical and experimental study of the thermal stress of silicon induced by a millisecond laser [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21):3725-3732.
- [11] LIM D J, KI H, MAZUMDER J. Mass removal modes in the laser ablation of silicon by a Q-switched diode-pumped solid-state laser (DPSSL)[J]. *Journal of Physics*, 2006, D39(12):2624-2635.
- [12] MASOLIN A, BOUCHARD P O, MARTINI R, *et al.* Thermo-mechanical and fracture properties in single-crystal silicon[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(3):979-988.
- [13] TAO S, WU B X, ZHOU Y, *et al.* Thermal modeling and experimental study of infrared nanosecond laser ablation of silicon[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(12):123507.
- [14] YAMAGUCHI K, ITAGAKI K. Measurement of high temperature heat content of silicon by drop calorimetry[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2002, 69(5):1059-1066.
- [15] WANG X. The thermal and mechanical effects during pulsed laser interaction with semiconductor materials and the application of laser scribing on the CIGS thin film solar cell[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013: 49-50 (in Chinese).