

文章编号 1004-924X(2011)02-0437-08

长脉冲激光与硅相互作用气化过程的数值模拟

张 梁,倪晓武,陆 建,刘 剑,戴 罡
(南京理工大学理学院,江苏南京 210094)

摘要: 为了研究毫秒量级脉宽激光与半导体材料的相互作用机理,建立了一维有限元模型,对长脉冲激光与硅相互作用的气化现象进行了数值模拟。在计算中,利用热焓法处理了固-液相变过程,并根据热流方程考虑了气化产生的能量损失。在入射激光功率密度相同的条件下,定量地描绘了不同脉宽激光辐照材料的温度分布,前表面的温度历史,以及气化速度和气化深度,并估算出气化深度为 $0.5 \mu\text{m}$ 时,物质蒸汽使激光产生光学自聚焦现象的激光功率阈值仅为 0.2 W ,此阈值远小于长脉冲激光的功率。因此,在长脉冲激光与硅材料相互作用过程中,气化的物质蒸汽会使后续激光产生光学自聚焦现象。得到的结果可为长脉冲激光的应用提供理论依据。

关键词: ms 脉冲激光;硅;气化速度;气化深度

中图分类号: TN249;TN305 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0437

Numerical simulation of vaporization effect of long pulsed laser interaction with silicon

Zhang Liang, NI Xiao-wu, LU Jian, Liu Jian, Dai Gang

(Department of Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To explore the mechanism of the long-pulse laser interaction with semiconductor materials, a one-dimensional finite element calculational model was established to investigate the vaporization effect of the long-pulse laser interaction with the silicon. In the calculation, Enthalpy method was used to resolve the process of solid-liquid phase change, and the heat flux equation was used to analyze the energy loss of vaporization. With the certain incident laser power density and different pulse widths, the long pulse laser interaction with the silicon in the process of melting and vaporization phenomena was simulated. The vaporization velocity, temperature evolvment, and the effect of vaporization on ablation depth during and after the laser irradiation were emphatically analyzed. Furthermore, the atomic vapor induced self-focusing threshold by laser transmission was estimated to be about 0.2 W when vaporization depth was about $0.5 \mu\text{m}$, which was far less than the long-pulse laser power. Therefore, the follow-up laser will cause optical self-focusing phenomenon by vaporization in the long pulse laser interaction with the silicon, obtained results can provide the theoretical basis for the research on the mechanism of the laser interaction with the silicon.

Key words: ms pulse laser; silicon; vaporization velocity; vaporization depth

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:江苏省创新基金资助项目(No. AD20286)

1 引言

激光对半导体材料的破坏主要分为热破坏和冲击破坏^[1]。脉宽为 ms 量级的长脉冲激光与半导体材料相互作用时,主要表现为热效应。该热效应包括熔融和气化等现象,而气化是激光切割物质的主要物理机制之一,因此研究激光与材料相互作用的气化现象有一定的实际意义^[1-3]。

在脉宽为 ns 量级的激光束与硅相互作用气化研究中,Xinyu Tan^[4]使用有限差分法模拟了波长为 266 nm 的激光与硅材料相互作用,期间特别考虑了由于硅表面气化产生的能量损失,得到了材料表面的气化速度、气化深度以及温度分布。LIU Dan^[5]使用相同的方法模拟了波长为 248 nm,脉宽为 25 ns 的准分子激光与半导体硅的相互作用过程,期间不但考虑了硅表面气化产生的能量损失,而且考虑了所产生激光等离子体对后续激光束的屏蔽效应,也得到了材料表面的气化速度,气化深度以及温度分布。Sha Tao^[6]使用有限元方法模拟了波长为 1.064 μm ,脉宽为 200 ns 的激光与硅相互作用的气化现象,因使用了有限元方法,可以不必估计材料表面气化的弛豫时间与材料的熔融深度,得到了材料熔融深度和温度分布,以及材料表面的气化速度与气化深度。上述文献所模拟的硅表面气化深度与实验切割硅材料时得到的深度均吻合。

材料表面被气化后,所形成的物质蒸汽将飞溅到材料外部,物质蒸汽将吸收激光能量并且进行膨胀。激光在原子蒸汽中传播时,会产生非线性光学现象,脉冲激光在纳、铯、铷、钙、钾、钡原子蒸汽传输过程中观察到光学自聚焦、自陷等现象^[8]。

与脉宽为 ns 量级的短脉冲激光相比,脉宽为 ms 量级的长脉冲激光作用的能量密度大,作用时间长,功率密度相对较低,因而呈现热熔深度长,效率高的特点。在长脉冲激光与半导体材料相互作用的研究中,陈彦北^[7]利用有限元法分析了单晶硅的热应力损伤;丁玮环^[2]等对长脉冲激光与

半导体材料相互作用的熔融现象进行了数值模拟,但均未考虑作用期间存在的气化现象。

本文着重研究了长脉冲激光与硅相互作用过程中出现的气化现象。在长脉冲激光与铝相互作用的实验中,在激光功率密度较低时,所形成的损伤为锥形孔,但是,由于束腰的限制,激光直径随着远离焦平面的距离增加而增加^[9]。因此,在激光传输过程中,可能存在光学自聚焦等现象。本文亦着重研究了长脉冲激光与硅相互作用过程中出现的气化现象,并对气化气体产生自聚焦现象进行论证。建立了一维长脉冲激光辐照半导体材料产生热传导的有限元模型,对功率密度为 $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$,脉宽长度分别为 1 ms, 1.5 ms 和 2 ms 的长脉冲激光与半导体材料相互作用过程进行了数值模拟。在计算中,使用热焓法处理熔融相变过程,根据热流方程计算了了气化产生的能量损失,得到了不同激光功率密度与硅相互作用后的温度场分布,以及不同时刻的气化速度、气化深度,并且估算了气化深度为 0.5 μm 时,激光在蒸汽中传播产生光学自聚焦现象的阈值。

2 模型的建立和参数的选择

2.1 理论模型

激光垂直照射半导体硅表面的一维模型如图 1 所示。其中 z 为激光入射方向, L 为硅的厚度, v_z 为材料表面的气化速度。

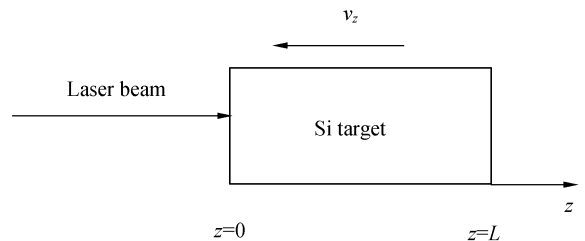


图 1 激光辐照半导体硅表面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of theoretical model of laser irradiating Si plate

计算中假设环境温度为 27 °C。为简化计算,忽略了液相对流以及由热对流和热辐射造成的边界损失,且材料熔融和气化后仍作为热传导处理。由于激光辐照时间比较短,因此忽略了材料发生熔融后,熔融部分受重力的影响。硅表面气化后,气化表层下将会有过热液体存在^[6],故当材料温度高于沸点时仍可采用液态硅的热物理参数;气化后的硅蒸汽仍然吸收激光能量,所用的物理参数与液态硅一致。

2.2 热传导方程

热焓法的热传导方程为^[6]

$$\frac{\partial H}{\partial t} - v_z \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial I}{\partial x}, \quad (1)$$

其中, T 是温度, k 为热传导系数, I 为激光光强, $H = \int_{T_0}^T \rho C dT + [T > T_m] \rho L_m$ 为焓, C 为比热容, ρ 为材料密度, L_m 为融化潜热, 符号 $[T > T_m]$ 表示当 T 大于材料的熔融温度时, 其值为 1, 反之则为 0。

考虑到激光束具有一定的发散角, 且传播过程中存在一定的损失, 因而激光束的强度会随着传播距离而改变, 即

$$\frac{\partial I}{\partial x} = \alpha I_{z=0}, \quad (2)$$

其中 α 是硅材料对激光的吸收系数。在材料表面可得到

$$I_{z=0} = (1-R)I_0(t),$$

其中, R 是材料对激光的反射率, $I_0(t) = I_0 g(t)$ 是照射硅材料的激光强度, $g(t)$ 为激光脉冲的时间分布

$$g(t) = \begin{cases} 1 & t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases}, \quad (3)$$

其中, t_0 为作用激光脉冲宽度, 为了方便计算, 近似认为激光的作用时间与脉冲宽度相等。

由于材料表面产生气化将损失部分能量, 边界条件可以写为^[6]:

$$-k_1 \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = -L_{ev} \rho_1 v_z. \quad (4)$$

2.3 气化速度

一般而言, 材料表面熔融后才会发生气化现

象^[4]。当材料表面气化后, 气化粒子逃离靶材表面并逃逸到空气中, 材料表面开始退化。对于任意脉宽的激光, 均可以产生气化现象, 材料表面由于气化产生的退化速度由 Hertz-Knudsen 方程控制^[3]

$$v_z = \frac{\partial z}{\partial t} \Big|_{z=0} = \frac{1}{\rho} \beta \cdot p_0(T_s) \cdot \left(\frac{M}{2\pi k_B T_s} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

其中, T_s 为硅材料表面温度, $\beta = 0.82$ 为气化系数, $M = 4.666 \times 10^{-23}$ g/molecule 为硅的分子质量, $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K 为波尔兹曼常数, $p_0(T_s)$ 为在温度 T_s 时的平衡蒸汽压强, 可表示为:

$$p_0(T_s) = p_\infty \exp \left[\frac{L_{ev} M}{k_B T_s} \left(\frac{T_s}{T_b} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

其中, L_{ev} 为气化潜热, T_b 为沸点温度 $p_\infty = 1.01325 \times 10^5$ Pa 为温度 T_b 时的平衡蒸汽压强。可见, 材料表面的气化速度是温度的函数。

2.4 激光在原子蒸汽中传播产生的光学自聚焦现象

激光在原子蒸汽中传输时, 会产生光学自聚焦等自作用现象。三阶非线性磁化系数可以表示为^[8]:

$$\chi^{(3)} = \frac{2}{3} \frac{N \mu^4}{\hbar^3 \Delta^3}, \quad (7)$$

其中 N 是原子数密度, μ 是电偶极跃迁力矩, $\Delta = \omega - \omega_0$ 是在光场中原子共振频率 ω_0 的失调率。

在各向同性的电介质中, 非线性系数 n_2 在 cm^2/W 单位制与 $\chi^{(3)}$ 在高斯单位制之间的关系 ($n=1$ 时)

$$n_2 = 0.04 \chi^{(3)}, \quad (8)$$

光学自聚焦的临界功率为

$$P_{\text{crit}} = \frac{\lambda^2}{8n_2}. \quad (9)$$

2.5 材料参数

计算模型见图 1, 取 $L = 3$ mm; 作用激光波长为 1.064 μm , 脉冲宽度 $t_0 = 1$ ms。硅材料与波长 1.064 μm 的激光相互作用的吸收率^[11]、反射率^[6]以及基体硅材料的热物理参数^[10]表 1 中给出。

表 1 计算时采用的 Si 热物理参数

Tab. 1 Thermal physical parameters of silicon

parameter	Physical	K	C		α	ρ
	state	J/cm ³ ·s·K	J/g·K		cm ⁻¹	g/cm ³
	Solid	$1\,521.0T^{-1.226}$ $T \leq 1\,200$ K $8.98T^{-0.502}$ $1\,200 < T < T_m$	$0.694\exp(2.375 \times 10^{-4} T)$		50	2.32
	Liquid	$0.5 + 2.9 \times 10^{-4}(T - T_m)$	1.05		8.6	2.52
parameter	Physical	R	L _m /	L _{ev} /	T _m /	T _b /
	state		J·g ⁻¹	J·g ⁻¹	K	K
	Solid	$0.3 + 5 \times 10^{-5}(T - 300)$	1 797.0	13 722.0	1 683	3 514
	Liquid	0.79				

3 计算结果和讨论

通过计算得到气化速度随温度变化的曲线如图 2 所示。由该图可见,气化速度随温度增加呈非线性增加。在材料表面温度为 3 000 K 时,气化速度仅为 1.454×10^{-3} m/s;当材料表面温度为 4 000 K 时,气化速度大约为 3 000 K 时的 41.38 倍;当材料表面温度为 5 000 K 时,气化速度大约为 4 000 K 时的 9.10 倍;当材料表面温度继续升高到 6 000 K 时,气化速度大约为 5 000 K 时的 4.29 倍。根据式(5),材料表面的气化速度主要由气化气压和材料表面温度控制;而气化气压的升高由 Clapeyron-Clausius 方程决定,气化气压随着材料表面温度的增加而非线性增加,其关系如式(6)给出的规律相同。因此,气化速度随着材料表面温度非线性增加。

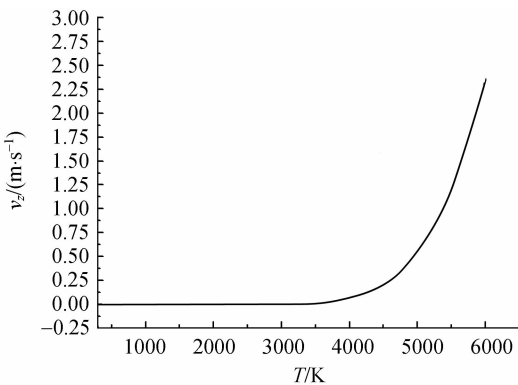


图 2 气化速度随温度变化曲线

Fig. 2 Curve of vaporization velocity with temperature

图 3 为功率密度为 5×10^6 W/cm²,不同脉冲宽度激光作用后,硅材料温度随激光入射方向变化的曲线。根据式(5),材料表面被气化后,随着温度的逐渐升高,物质蒸气的压强不断地增加。当气体压强高于外界大气压强(100 kPa)时,有一部分气化原子飞溅到材料外部,造成部分能量损失,导致材料表面温度降低;另外,硅材料熔融后,吸收系数减小,使得材料透光性能增加,增加了硅材料的吸收深度。在上述两方面以及热传导因素的共同影响下,材料中“吸收激光能量与损失能量之差”的最大值处,对应了材料温度的最大值处,所以材料的温度随激光入射方向变化的曲线中出现极大值点。从图 3 还可以看出,入射的激光脉宽越长,相同位置材料的温度就越高,材料最高温度处距离激光入射处越远,材料的熔融深度就越深。在距离激光入射点 2 mm 以外的区域,材料的温度基本没有变化。

图 4 为功率密度为 5×10^6 W/cm²,不同脉冲宽度激光作用后,材料表面随时间变化的曲线。由于材料功率密度一定,材料表面温度随时间变化曲线完全重合。可以看到在 $t = 56 \mu\text{s}$ 时,材料表面开始熔融,并看到短暂的熔融平台期。与此同时,气化现象也发生在材料表面。尽管材料表面的温度在升高,材料表面温度的增加率($\partial T/\partial t$)却在减小。这是因为随着材料表面温度的升高,气化速度 v_z 逐渐增加,导致气化损失的能量也逐渐增加,而此时持续照射材料表面的激光功率密度并没有改变,因而材料表面温度不断升高的同时,其增加的速率却在降低。

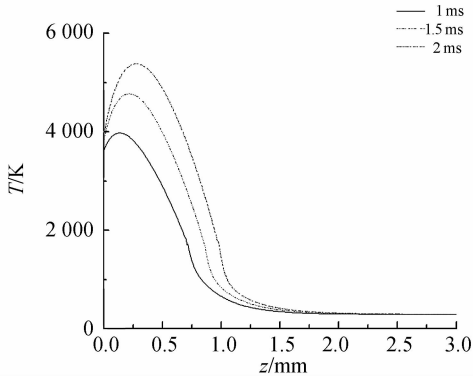


图 3 不同脉宽激光作用后,材料的温度场随激光入射方向的温度分布

Fig. 3 Temperature curve with laser incident direction after different laser pulse irradianations

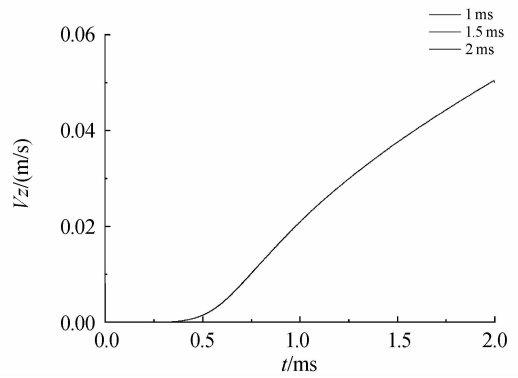


图 5 不同脉宽激光作用后,材料表面气化速度随时间变化的曲线

Fig. 5 Curve of vaporization velocity with time after different laser pulse irradianations

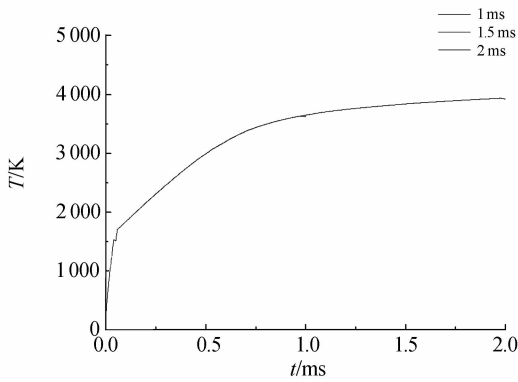


图 4 不同脉宽激光作用后,材料表面温度随时间变化的曲线

Fig. 4 Curve of surface temperature with time after different laser pulse irradianations

图 5 为不同脉宽激光作用材料后,材料表面气化速度随时间变化的曲线。根据图 4 所示材料表面温度变化,根据式(5)计算得出材料表面的气化速度。由于材料表面温度的变化重合,因此,根据材料表面温度计算出的气化速度也完全重合。

图 6 为不同脉宽激光作用材料后,气化深度随时间变化的曲线,根据 $D = \int_0^{t_0} v_z dt$ 计算得到气化深度 D 。由于材料表面的气化速度重合,因此气化深度随时间变化的曲线也是重合在一起的。结合图 3,以脉宽为 2 ms 的激光作用硅为例,从 $z = 0$ 到 $z = 0.74$ mm 之间硅的温度均高于其沸点 $T_b = 3\ 514$ K。然而发生液-气相变的深度只有 $42.24\ \mu\text{m}$,从 $z = 42.24\ \mu\text{m}$ 到 $z = 0.74$ mm 之间的材料仍然保持着液体状态,这样的液体温度超

过沸点但并没有发生相变,被称作过热液体。由于过热液体的存在,激光完全照射后的气化现象是不能被忽略的^[4]。另外,材料的最高温度在 $z = 0.275$ mm 处,此处并没有发生液-气相变,因此,材料的最高温度在气化层下的过热液体中。

另外一方面,结合图 4,在激光作用材料 $56\ \mu\text{s}$ 时,材料表面出现气化,而激光的脉冲宽度在毫秒量级,后续激光将照射在物质蒸汽上。当激光作用材料 0.629 ms 时,材料表面气化深度为 $0.5\ \mu\text{m}$,气化的粒子数目为 $\frac{\rho_s \times D \times \Delta S}{M_{\text{mol}}} \times N_a$, M_{mol} 为硅材料的摩尔质量, N_a 为阿伏伽德罗常数, ρ_s 为固体硅的密度, $\Delta S = d^2$, $d = \left(\frac{1}{\frac{\rho}{M_{\text{mol}}} \times N_a \times 1}\right)^{\frac{1}{3}} = 5.8 \times 10^{-11}$ m 为估算的原子间距离(硅为原子晶体)。物质蒸汽进入空气中,会发生膨胀。结合式(7),(8),(9),可知,产生光学自聚焦的临界功率(P_{crit})与原子数密度(N)成反比。因此,物质蒸汽膨胀的体积越大,形成自聚焦所需要的功率就越大。结合图 5,此时的气化速度大约为 $0.005\ 12$ m/s,气化粒子最大的传播距离为 $L = V_z \times t_1 = 3\ \mu\text{m}$,其中 $t_1 = (0.629 - 0.056) = 0.573$ ms 为气化的持续时间,物质蒸汽膨胀的最大体积为 L^3 ,则原子密度数 $N = \frac{\rho \times D \times \Delta S}{M_{\text{mol}} \times L^3} \times N_a = 0.31 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ 。若根据典型的参数值 $\Delta = 3\pi \times 3$ GHz, $\mu = 5 \times 10^{-18}$ esu^[8],根据式(7),(8),(9)得 $\chi^{(3)} = 2.17 \times 10^{-7}$ esu, $n_2 = 8.7 \times 10^{-9}$ cm²/W, $P_{\text{crit}} = 0.2$ W。若激光的半径

为 $200\ \mu\text{m}$, 则长脉冲激光的功率为 $2\ 000\ \text{W}$, 长脉冲激光的功率远大于 $0.2\ \text{W}$, 因此, 长脉冲激光在通过物质蒸汽时, 会出现光学自聚焦的现象。

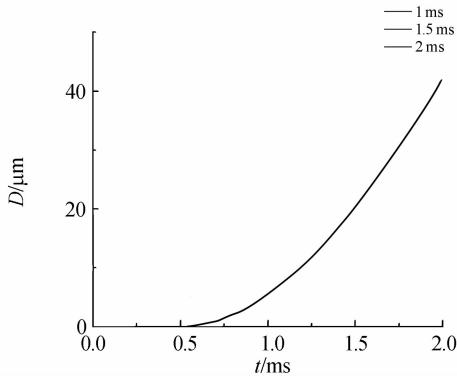


图 6 不同脉宽激光作用后, 气化深度随时间变化的曲线

Fig. 6 Curve of vaporization depth with time after different laser pulse irradiations

图 7 为经不同脉冲宽度 t_0 的激光照射后再经过 $(22 - t_0)\ \text{ms}$ 材料表面的温度变化过程。由于长脉冲激光停止照射后气化现象仍然存在, 并伴有热传导等现象, 材料表面的温度逐渐降低。

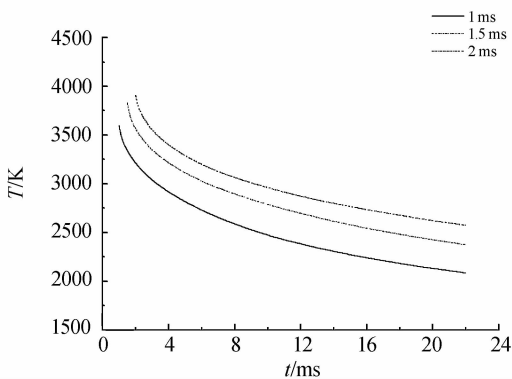


图 7 不同脉宽激光照射后再经过 $(22 - t_0)\ \text{ms}$ 材料表面的温度变化过程

Fig. 7 Change of surface temperature after different laser pulse irradiations and then in another $(22 - t_0)\ \text{ms}$

图 8 为不同脉冲宽度激光作用下, 气化速度随时间变化曲线。在激光脉冲作用期间, 材料表面气化速度逐渐增加; 在激光脉冲作用 $t_0\ \text{ms}$ 时, 材料表面的气化速度达到最大值, 在激光停止作用后, 材料表面的气化速度迅速降低。激光作用 $(22 - t_0)\ \text{ms}$ 以后, 气化速度接近零, 气化现象基本停止。

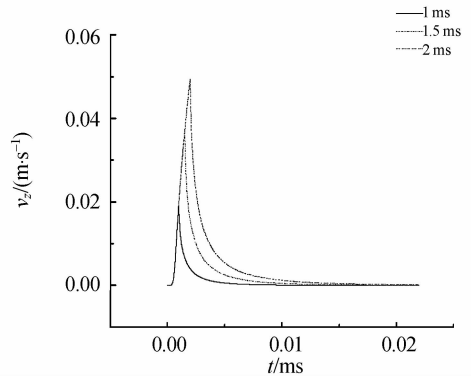


图 8 不同脉冲宽度激光作用下, 气化速度随时间变化的曲线

Fig. 8 Whole curve of vaporization velocity with time after different laser pulse irradiations

图 9 为不同脉宽激光作用下, 气化深度随时间变化的曲线。可见, 气化深度随时间的增加而增加, 最后趋于稳定。在入射激光功率密度一定时, 入射激光脉宽越长, 气化深度就越深; 且不同脉宽的激光作用得到的气化深度为激光刚刚停止照射时气化深度的 $2.41 \sim 3.43$ 倍。可见, 在激光照射停止后, 气化现象仍然很明显。另外, 脉宽较长的激光引起的气化深度较深, 并且气化深度随激光功率密度增加非线性增加, 这是由于随着激光脉宽的增加, 材料表面的温度升高, 气化速度也随之增加。利用相同波长的激光与硅相互作用, 激光的脉宽为 $200\ \text{ns}$, 能量密度为 $100\ \text{J}/\text{cm}^2$ 产生的气化深度不足 $5\ \mu\text{m}$ ^[6], 而能量密度更大, 功率密度更低的长脉冲激光, 其气化深度大于短脉冲激光的气化深度。

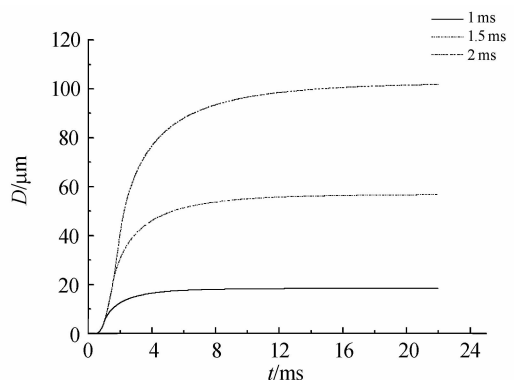


图 9 不同脉冲激光作用下, 气化深度随时间变化的曲线

Fig. 9 Whole curve of vaporization depth with time after different laser pulse irradiations

4 结 论

本文对长脉冲激光与硅材料相互作用过程中材料的温度分布、气化深度、气化速度进行了数值模拟,结果显示:在激光照射后,材料的温度沿着激光照射方向存在温度最大值;在激光照射过程中,材料表面的温度随时间的变化率($\partial T/\partial t$)逐渐减小;激光功率密度相同时,激光脉宽越长,材料表面的温度越高,气化速度越大,气化深度也越深;由于气化能量的损失,材料最高温度并不在气-液交界面处,而是在气-液交界面下的液体中;气

化深度随着激光入射功率密度的非线性而增加;与相同波长的短脉冲相比,能量密度大,功率密度更低,脉冲时间更长的长脉冲激光,其气化深度远大于短脉冲激光的气化深度;激光在通过物质蒸汽时,会产生光学自聚焦现象,当气化深度为 0.5 μm 时,产生自聚焦现象所需要的激光功率大约为 0.2 W,此阈值远小于长脉冲激光的功率,因此,在长脉冲激光与硅材料相互作用过程,气化的物质蒸汽会使后续激光产生光学自聚焦现象。

本文的研究结果可以为长脉冲激光与材料相互作用过程中的气化现象提供评估手段和理论依据。

参考文献:

- [1] 倪晓武,沈中华,陆建. 强激光对光电器件及半导体材料的破坏研究 [J]. 光电子·激光,1997,8(6):487-492.
NI X W, SHEN Z H, LU J. Study of laser destruction for optoelectronic device and semiconductor material[J]. *Journal of Optoelectronic · Laser*, 1997, 8(6):487-492. (in Chinese)
- [2] 丁玮环. 长脉冲高能激光与半导体材料的热作用分析 [J]. 红外与激光工程,2007,36(S1):332-335.
DDING W H. Analyse on the thermal interaction of the long pulse high power laser and semiconductor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1):332-335. (in Chinese)
- [3] MIOTELLO A, KELLY R. Critical assessment of thermal models for laser sputtering at high fluences [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(24):3335-3337.
- [4] TAN X Y, ZHANG D M. Vaporization effect studying on high-power nanosecond pulsed [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2005, 358(1-4):86-92.
- [5] LIU D, ZHANG D M. Vaporization and plasma shielding during high power nanosecond laser ablation of silicon and nickel [J]. *Chinese Physics Let-*
ter, 2008, 25(4):1368-1371.
- [6] SHA T, WU B X. Thermal modeling and experimental study of infrared nanosecond laser ablation of silicon [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106:123507.
- [7] CHEN Y. Analysis of thermal stress damage in single-crystal silicon induced by 1064 nm long-pulse laser[J]. *SPIE*, 2007, 6835:68351X.
- [8] ASCHERON C E. *Self-focusing: Past and Present*[M]. Springer New York, 2009.
- [9] SCHNEIDER M. New experimental approach to study laser matter interaction during drilling in percussion regime[J]. *Journal of Laser Micro/Nano-engineering*, 2007, 2(2):117-122.
- [10] YOO J H, JEONG S H. Explosive change in crater properties during high power nanosecond laser ablation of silicon [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(3):1638-1649.
- [11] 沈中华,倪晓武. 激光对半导体材料热作用理论计算[J]. 光电子·激光,1998,9(4):344-346.
SHEN Z H, NI X W. Theoretical calculation for thermal effect of the semiconductors induced by the Laser Pulse [J]. *Journal of Optoelectronic · laser* 2000, 88(3):1638-1649.

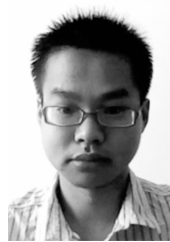
作者简介:

张 梁(1980—),男,吉林长春人,博士研究生,2007年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: abcd3614@yahoo.com.cn

倪晓武(1955—),男,江苏人,教授,博士生导师,1988年于华东工学院应用物理系获博士学位,长期从事激光武器毁伤机理、激光与物质相互作用机理、光子生物医学及其作用机理和测试方法等领域的教学和科研工作。E-mail: jsnjnxw@gmail.com

陆 建(1965—),男,江苏南通人,博士,教授,博士生导师,主要从事高功率激光材料相互作用机理、激光与生物组织相互作用、强场物理等方面的研究。E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

刘 剑(1983—),男,山东邹城人,博士研究生,2004年于曲阜师范大学获得学士学位,2008年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事长脉冲激光与脆性材料相互作用和激光加工方面的研究。E-mail: liujiannjlg@yahoo.com.cn



戴 罡(1984—),男,江苏镇江人,博士研究生,2005年于南京理工大学获得理学学士学位,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: huma_1@163.com

●下期预告

薄膜与小组件太阳能电池特性参数测试系统的研制

王志明, 龚振邦, 魏光普

(上海大学 机械电子工程与自动化学院, 上海 200072)

为了对薄膜与小组件太阳能电池进行快速、精确的测量,建立了薄膜与小组件太阳能电池测试系统,对测试系统的控制模式与测试精度进行研究。选取 DSP 芯片 TMS320LF2407 为主控芯片,采用模块化与总线结构的设计思路,使系统具有较快的响应性与扩展性。通过完善的设计和高精度运算放大器等电子元件的应用,研制成优良性能的程控电子负载,精确测量太阳能电池的短路电流与开路电压。采用多路电子开关、多路继电器与精密电阻的组合设计,实现了太阳能电池光电参数的分档测试,使系统可适用于多规格、多品种薄膜与小组件太阳能电池的特性参数的测量。实验结果表明:系统能在短路电流 3 mA-5.6 A,开路电压 0.5 V-20 V 的范围内实现自动分档测试,开路电压的最大相对误差 $<0.4\%$,短路电流的最大相对误差 $<0.8\%$ 。很好地满足了薄膜与小组件太阳能电池精确测量的需要。