

文章编号 1004-924X(2011)02-0414-07

# 单晶硅片在脉冲激光作用下的断裂行为

刘 剑, 陆 建, 倪晓武, 戴 罡, 张 梁

(南京理工大学理学院 应用物理系, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 基于脆性材料在激光辐照下的断裂行为, 将可控断裂激光切割技术应用于脆性材料的加工。为了分析脉冲激光辐照脆性材料过程及脉冲激光扫描过程中产生的断裂行为机理, 采用数值计算方法建立了含有裂纹的三维有限元热弹计算模型。分析了脉冲激光辐照单晶硅片过程中温度场和热应力场的变化情况, 并模拟计算了硅片边缘含有裂纹时裂纹尖端应力强度因子的变化。计算结果表明, 在激光加热区域前后位置存在两个拉应力区, 且激光加热区域靠近硅片边缘位置时, 硅片边缘会产生较大拉应力; 脉冲激光扫描硅片过程中, 裂纹尖端的应力集中现象诱发材料持续开裂并引导裂纹沿激光扫描方向扩展。得到的结果与文献报道的裂纹扩展过程相符。

**关键词:** 单晶硅片; 断裂; 脉冲激光; 热应力; 应力强度因子

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0414

## Fracture behavior during pulsed laser irradiating silicon wafer

LIU Jian, LU Jian, NI Xiao-wu, DAI Gang, ZHANG Liang

(*Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China*)

**Abstract:** Based on the fracture behavior during laser irradiating brittle materials, a controlling fracture technique was used for cutting brittle materials. In order to investigate the mechanism of fracture behavior during pulsed laser irradiating single silicon, a three-dimensional finite element thermoelastic calculational model which contains a pre-existing crack was established based on the heat transfer theory. The development of the temperature field and thermal stress field were investigated during the pulse duration and the changes of stress intensity factor around a crack tip were analyzed. The simulation results show that there are two tensile stress zones induced by the laser heating zone. When the laser spot is near the edge of the silicon wafer, the larger tensile stress is induced at the edge of the silicon wafer, and when the pulsed laser scans the silicon wafer, the pre-existing crack can induce the fracture to propagate along the moving direction of the laser beam. Obtained results are well coincident with the crack expanding process reported by the literature.

**Key words:** silicon wafer; fracture; pulsed laser; thermal stress; stress intensity factor

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

硅、陶瓷、玻璃等材料存在脆性大、抗热震性差等弱点,利用传统机械方法分离脆性材料易产生残余应力、微裂纹与边部碎屑等缺陷,难以达到对加工精度与清洁度的要求。近年来,基于脆性材料在激光辐照下容易发生断裂这一特点,利用激光在脆性材料表面扫描使材料沿预定路径完成断裂分离的技术已被应用于脆性材料的加工领域<sup>[1-4]</sup>。

可控断裂激光切割技术指在激光扫描脆性材料的过程当中,材料内部产生的热应力可以促使材料在加工处形成裂纹并扩展以完成切割过程,但并不熔融或气化工件,完全依靠应力使材料断裂实现切割。这种切割方法中所需的激光能量比激光烧蚀、激光划片等过程都小,且切割边缘整洁,切割速度快,在加工脆性材料方面具有广阔的应用前景。Lumley<sup>[5]</sup>等人提出了可控断裂激光切割脆性材料的思想,并在实验中成功地对陶瓷等脆性材料沿激光扫描路径进行了分离。Chwan-Huei Tsai<sup>[6]</sup>等人应用可控断裂激光切割技术对厚度达 10 mm 陶瓷基片进行了切割,并对切割质量的优化进行了研究。Junke Jiao<sup>[7]</sup>等人提出了双光束激光切割玻璃的方法,用一束离焦的 CO<sub>2</sub> 激光先对玻璃板进行预热以降低温度梯度防止微裂纹的产生,另一束聚焦的 CO<sub>2</sub> 激光用来完成玻璃板的分离。Kondra Ten Ko V S 等人<sup>[8]</sup>在切割过程中使用水冷系统加快脆性材料的冷却,不仅可以降低激光功率,还可以减小热损伤区及提高分离速度。I. Black 和 K. L. Chua<sup>[9]</sup>的实验研究结果表明,用脉宽为毫秒量级的脉冲激光进行陶瓷加工比使用连续激光可获得更好的切割质量。Salman Nisar<sup>[10]</sup>通过对激光切割过程的应力场进行分析,对切割过程中断裂最初位置的切割偏移问题进行了研究。

以上关于可控断裂激光切割技术的相关研究,使用连续激光的相对较多,关于脉冲激光对脆性材料进行断裂切割的研究相对较少,特别是利用脉冲激光对硅材料进行加工的分析鲜见报道。本文运用有限元方法,对波长 1 064 nm 脉冲激光辐照单晶硅片的过程进行了数值模拟,得到了过程中温升和应力的分布和随时间的变化情况,并

对分析了含预裂纹单晶硅片在脉冲激光辐照扫描期间裂纹尖端区域的应力强度因子的变化情况,进而对断裂机理进行了分析。

## 2 数学模型的建立

建立了如图 1 所示的单晶硅片模型,其尺寸为 11.5 mm×6 mm×0.5 mm,脉冲激光以恒定速率沿  $x$  方向对含裂纹单晶硅片进行扫描,激光加热区域间隔式前进。

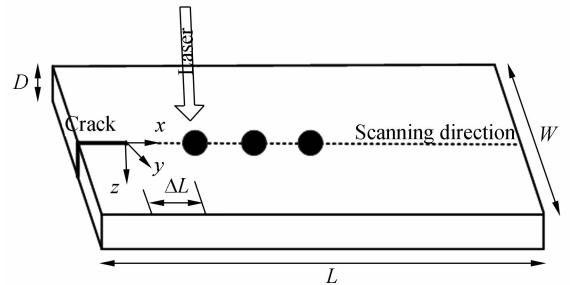


图 1 激光切割硅片模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser cleaving process

计算过程中的温度低于硅材料的塑性转变温度,采用热弹模型对辐照过程进行模拟,且激光作用时间为毫秒量级,为简化计算,忽略对流及热辐射作用在边界上造成的热损失。考虑到激光扫描过程中首先是温度场发生变化,进而引发热应力的过程,因而首先研究温度场,然后对热应力场进行分析。

### 2.1 瞬态热传导基本方程

与上述切割过程对应的瞬态热传导方程<sup>[11]</sup>为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$T(t) = T_0, \quad t = 0,$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} + h(T_s - T_0) = \epsilon I(x, y, z, t), \quad (2)$$

$$z = 0,$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_n - T_0), \quad (3)$$

$$z = -D, \quad x = 0, L, y = \pm \frac{W}{2},$$

式中, $\rho$ 为材料密度, $c$ 为材料比热容, $T$ 为温度, $T_0$ 为计算时的初始温度, $t$ 为时间变量, $\kappa$ 为热导

率,  $\epsilon$  为材料对激光的吸收率,  $T_s$  为加热区域的温度,  $T_n$  为不受激光加热区域的温度,  $I$  为作用于硅片表面激光的功率密度. 模式为  $TEM_{00}$  的脉冲激光辐照材料表面时, 激光功率密度可表示为<sup>[12]</sup>:

$$I(x, y, t) = \frac{P\alpha}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right) \exp(-\alpha z) g(t)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $\alpha$  是样品的体吸收系数,  $P$  是激光峰值功率,  $r$  为激光光斑半径,  $\tau$  为激光脉冲宽度.

## 2.2 热弹性平面应力问题基本方程

由于硅片的厚度远小于长度和宽度, 激光照射薄板时, 关于应力的分析可简化为热弹性平面应力问题, 其本构方程<sup>[13]</sup>为:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_x + \mu\epsilon_y) - \frac{E\beta\Delta T}{1-\mu} \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_y + \mu\epsilon_x) - \frac{E\beta\Delta T}{1-\mu} \\ \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)}\gamma_{xy} \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\epsilon_x, \epsilon_y$  分别为  $x, y$  方向上的正应变;  $\gamma_{xy}$  为剪应变;  $E$  为杨氏模量;  $\mu$  为泊松比;  $\beta$  为线性膨胀系数;  $\Delta T$  为温差.  $\sigma_x, \sigma_y$  表示  $x, y$  方向上的正应力;  $\tau_{xy}$  为剪应力.

## 2.3 有限元模型

应用有限元方法对脉冲激光扫描过程进行分析时, 激光沿着材料表面对称轴  $x$  方向进行扫描. 含裂纹有限元模型及网格划分如图 2 所示. 为提高计算精度, 对激光辐照区域和裂纹尖端区域的网格进行了细化处理.

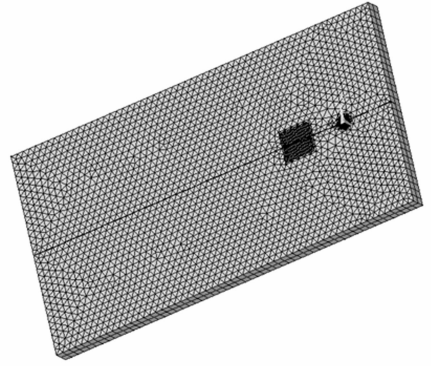


图 2 有限元网格划分图

Fig. 2 Finite element meshes of silicon wafer

## 2.4 激光参数和材料参数

数值计算时环境温度设为 300 K; 激光波长为 1 064 nm, 脉宽为 1 ms, 峰值功率为 100 W; 照射在材料上的激光光斑半径为 0.5 mm, 体吸收系数  $\alpha = 5\,000\text{ m}^{-1}$ . 计算所需的其它热、力学参数<sup>[14]</sup>在表 1 中给出.

表 1 单晶硅的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of silicon

Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Specific heat / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Thermal conductivity / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Thermal expansion coefficient / $\text{K}^{-1}$	Young's modulus / $\text{GPa}$	Poisson's ratio
2 340	761	156	$2.62 \times 10^{-6}$	117.4	0.262

## 3 计算结果分析和讨论

有限元模型中, 裂纹长度为 1.5 mm, 坐标原点位于缺口尖端位置. 激光扫描过程由  $t=0$  时刻从距离缺口尖端 1.5 mm 位置开始进行. 为分析边缘预裂纹对断裂过程的影响, 采用相同激光参数设置情况下, 对不含裂纹单晶硅片扫描过程进行了模拟, 进而对两种情况下的应力场进行了对比分析.

### 3.1 温度场的计算结果和分析

图 3 所示为激光辐照含裂纹硅片 1 ms 后的温度分布图, 受到激光加热, 光斑周围产生了温度梯度. 图 4 所示为光斑中心点的温度历史. 光斑中心的温度在激光辐照期间迅速升高, 1 ms 后达到最高 523 K, 随后激光停止辐照, 温度由于热传导的作用随时间降低, 相对与激光辐照期间的升温过程, 降温过程相对缓慢.

图 5 所示为脉冲持续时间内材料表面温度沿激光扫描方向的分布情况. 激光加热区域各点温

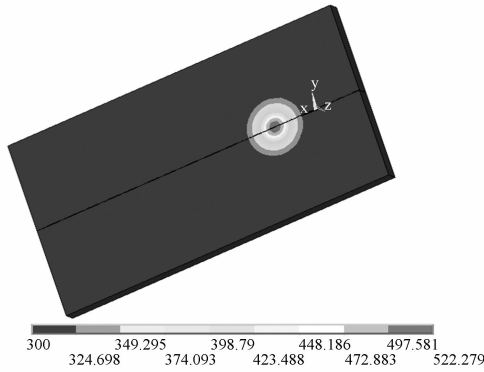


图 3 1 ms 时温度分布情况

Fig. 3 Distribution of temperature at 1 ms

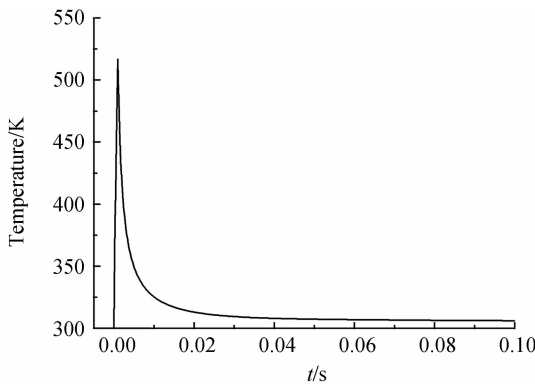


图 4 光斑中心点温度历史

Fig. 4 Temperature history of central point of laser spot

度随时间不断升高,至  $t=1\text{ ms}$  各点温度达到最高。不同时刻温度最高点都位于光斑中心位置,且激光加热区域的温度梯度随时间不断增大。

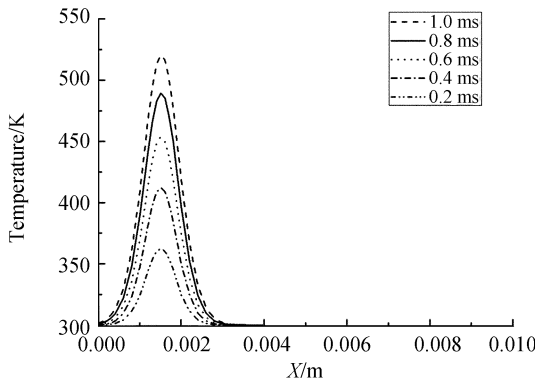


图 5 不同时刻材料表面温度沿扫描方向分布

Fig. 5 Temperature distribution on surface of silicon wafer along scanning direction at various time steps

### 3.2 应力场的模拟结果和分析

在扫描过程中,激光辐照区域的材料吸收激光能量,导致温度迅速升高,与周围常温区域产生温度梯度而引起热应力的产生。热应力沿扫描路径的分布情况对扫描过程中裂纹的扩展有直接的影响。图 6 所示为激光辐照 1 ms 时含预裂纹模型热应力  $\sigma_{yy}$  的分布情况。图 7 所示为激光辐照 1 ms 时无预裂纹模型热应力  $\sigma_{yy}$  的分布情况。受激光辐照的区域产生了一个压应力区,拉应力区域前后存在两个拉应力区域。裂纹尖端的拉应力值较大。图 8 所示为材料边缘存在裂纹和不存在裂纹两种情况下应力分布情况,当不存在裂纹,光斑中心距离材料边缘为 1.5 mm 时,材料边缘诱发的拉应力明显小于光斑中心距离裂纹尖端同样为 1.5 mm 情况下的拉应力。

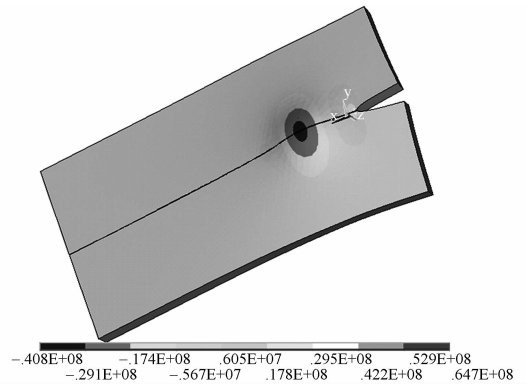


图 6 1 ms 时含预裂纹模型热应力  $\sigma_{yy}$  的分布情况  
Fig. 6 Distribution of thermal stress  $\sigma_{yy}$  at 1 ms in pre-crack model

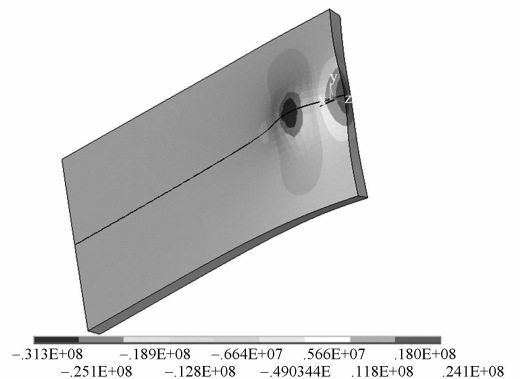


图 7 1 ms 时无预裂纹模型热应力  $\sigma_{yy}$  的分布情况  
Fig. 7 Distribution of thermal stress  $\sigma_{yy}$  at 1 ms in non-crack model

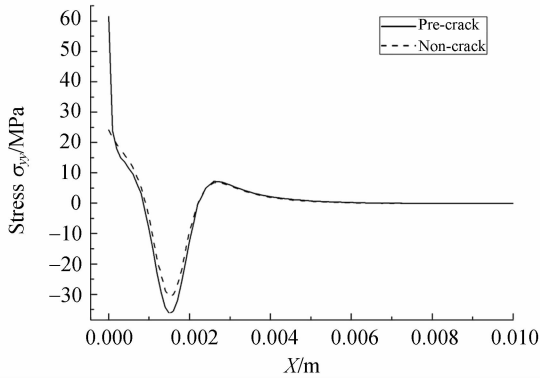


图 8 硅片边缘有裂纹和无裂纹两种情况下热应力  $\sigma_{yy}$  沿扫描方向分布

Fig. 8 Distribution of thermal stress  $\sigma_{yy}$  along scanning direction in pre-crack and non-crack models

图 9 给出了激光辐照期间材料表面扫描路径上各点热应力  $\sigma_{yy}$  的分布情况。激光作用期间,激光加热区域压应力随时间不断增大,直至 1 ms 时压应力达到最大。裂纹尖端区域出现应力集中现象,受到较大拉应力作用,且拉应力随时间不断增大,断裂从裂纹尖端开始。

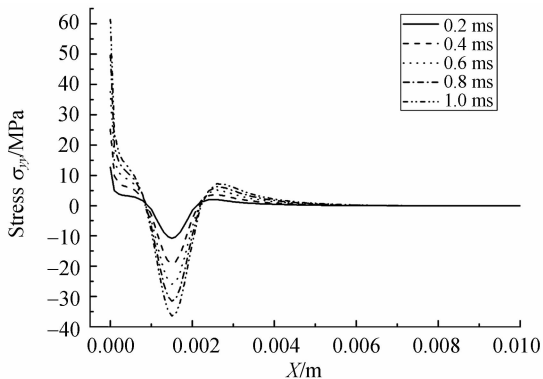


图 9 不同时刻热应力  $\sigma_{yy}$  沿扫描路径分布

Fig. 9 Distribution of thermal stress  $\delta_{yy}$  along scanning direction at various time steps

根据断裂力学理论,扫描过程中发生的断裂属于纯 I 型断裂。当断裂强度因子  $K_I$  达到材料的断裂韧性时,材料发生断裂。图 10 给出了激光作用期间裂纹尖端区域应力强度因子  $K_I$  随时间变化情况。激光辐照期间  $K_I$  随时间不断增大。在选择合适激光参数情况下,使  $K_I$  增大到硅材料的断裂韧性时,缺口尖端开始产生开裂,裂纹尖端位置前移。结合图 9 对缺口尖端区域应力所做分析,由于应力集中作用,下一脉冲期间,出现在

裂纹尖端区域的拉应力会使裂纹沿着激光扫描方向不断扩展,直至切割完成。

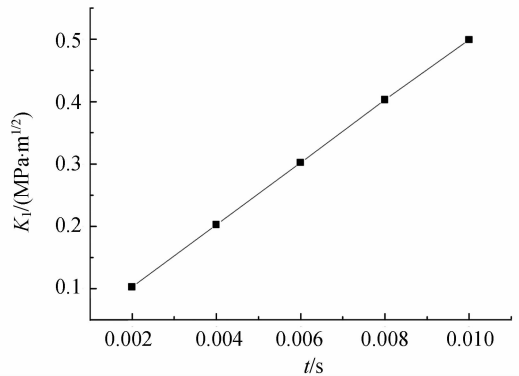


图 10 缺口尖端应力强度因子随时间的变化  
Fig. 10 Time history of stress intensity factor

由以上对激光作用期间缺口尖端区域的应力场和应力强度因子的分析可知:激光扫描单晶硅片期间,由于应力集中导致裂纹尖端区域存在极大拉应力,尖端区域成为扫描路径上最易开裂的位置。对材料进行裂纹或缺口处理能够使材料更容易开裂,从而提高切割成功率。

## 4 结 论

建立了含有裂纹的三维有限元模型,并对模型中的裂纹尖端和激光加热区域进行了细化处理,对脉宽为 1 ms,功率为 100 W 的脉冲激光辐照扫描单晶硅片的过程进行了数值模拟。在激光与材料相互作用期间,激光作用区内温度迅速升高,与周围区域形成较大温度梯度。随后受热传导等因素的影响,温度下降,但相对于温升阶段,降温比较缓慢。激光作用区与周围常温区产生的温度梯度导致了热应力的产生。由于应力集中,在裂纹尖端区域出现极大拉应力,尖端区域的应力强度因子在激光作用期间不断增大。当激光功率密度足够大时,缺口尖端的应力强度因子可大于材料的断裂韧性,裂纹尖端产生开裂。下一脉冲期间,由于应力集中,最大拉应力总是出现在裂纹尖端位置,该拉应力引导裂纹沿扫描方向扩展直至切割完成。

本文关于脉冲激光切割脆性硅片过程的数值模拟得到的结论与文献[15]中关于硅等脆性材料的脉冲激光断裂实验过程相吻合。实际过程中如

何优化激光参数,扫描速度和重复频率之间的关

系,使切割质量进一步提高等问题尚待研究。

### 参考文献:

- [1] 崔建丰,赵晶,樊仲维,等.厚硅片的高速激光切片研究[J].光学精密工程,2006,14(5):829-834.  
CUI J F,ZHAO J,FAN ZH W, *et al.*. Study on LD-pumped Nd:YAG laser cutter for silicon wafer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 829-834. (in Chinese)
- [2] 吴东江,张强,郭东明. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷薄片 CO<sub>2</sub> 连续激光弯曲试验 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2437-2476.  
WU D J,ZHAN G Q, GUO D M. Experiment on bending of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic slice with CO<sub>2</sub> CW-laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2437-2476. (in Chinese)
- [3] 王续跃,许卫星,徐文骥,等.硅片激光弯曲成形的数值模拟与实验 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 606-610.  
WANG X Y, XU W X, XU W J, *et al.*. Simulation and experiment of laser bending of silicon sheet [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 606-610. (in Chinese)
- [4] TRIANTAFYLIDIS D. Dual laser beam modification of high alumina ceramics [J]. *Journal of Laser Application*, 2003, 15(1): 49-54.
- [5] LUMLEY R M. Controlled separation of brittle materials using a laser [J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1969, 48: 850-854.
- [6] TSAI CH H, CHEN H W. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique [J]. *Journal of Materials Technology*, 2003, 136: 166-173.
- [7] JUNKE J, WANG X B. A simulation of machining

- glass by dual CO<sub>2</sub>-laser beams [J]. *Optics&Laser Technology*, 2008, 40: 297-301.
- [8] KONDRA T. Method of splitting non-metallic materials: U S, 5609284 [P]. 1997.
- [9] BLACK I, CHUA K L. Laser cutting of thick ceramic tile [J]. *Optics&Laser Technology*, 1997, 29: 193-205.
- [10] SALMAN N, SHEIKH M A, LI L, *et al.*. Effect of thermal stress on chip-free diode laser cutting of glass [J]. *Optics&Laser Technology*, 2009, 41: 318-327.
- [11] SHEN ZH, ZHANG SY, LU J, *et al.*. Mathematical modeling of laser induced heating and melting in solid [J]. *Optics&Laser Technology*, 2001, 33: 533-537.
- [12] CHEN Y B, LU J, NI X W. Analysis of thermal stress damage in single-crystal silicon induced by 1 064 nm long-pulse laser [J]. *SPIE*, 2007, 6835: 68351x.
- [13] ZHU X K, CHAO Y J. Numerical simulation of transient temperature and residual stress in friction stir welding of 304L stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 146: 263-272.
- [14] YAMADA K, UEDA T, HOSOKAWA A, *et al.*. Thermal damage of silicon wafer in thermal cleaving process with pulsed laser and CW laser [J]. *SPIE*, 2006, 6107: 61070H.
- [15] UEDA T, YAMADA K, OISO K, *et al.*. Thermal stress cleaving of brittle material by laser beam [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51(1): 149-152.

### 作者简介:

刘 剑 (1983—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 2008 年于南京理工大学获得硕士学位, 主要从长脉冲激光与脆性材料相互作用的研究。E-mail: liujian-njlg@yahoo.com.cn

陆 建 (1965—), 男, 江苏扬州人, 教授, 1995 年于南京师范大学应用物理系获博士学位, 现任南京理工大学理学院副院长, 目前主要研究方向是激光与物质相互作用机理和测试方法的理论与实验研究。E-mail: lujian@mail.njstu.edu.cn

倪晓武 (1955—), 男, 江苏镇江人, 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, 主要研究方向为高功率激光与材料相互作用机理、激光与生物组织相互作用、强场物理等。  
E-mail: jsnjnxw@gmail.com

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, 主要从激光与半导体相互作用的研究。E-mail: abcd3614@yahoo.com.cn

戴 罡 (1984—), 男, 江苏扬中人, 博士研究生, 2005 年于南京理工大学获理学学士学位, 主要从事激光与光学薄膜相互作用的研究。Email: huma\_1@163.com



## ● 下期预告

# 用于低 $g_n$ 值微惯性开关的低刚度平面微弹簧设计与制作

王 超, 陈光焱, 吴嘉丽

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

针对低  $g_n$  值微惯性开关对微弹簧的系统刚度达到  $(0.1 \sim 1) \text{N/m}$  数量级的要求, 设计了一种基于平面矩形螺旋梁结构的平面微弹簧。基于均匀、连续且各向同性材料的假设, 根据材料力学中的卡氏定理和线弹性理论, 推导得到了微弹簧的弹性系数计算公式, 并根据 ANSYS 有限元仿真分析结果对其进行了修正。基于多层高深宽比硅台阶刻蚀方法, 采用 MEMS 体硅加工工艺, 最终完成了微弹簧的制备。分析结果表明, 完善后的弹性系数计算公式与 ANSYS 仿真结果更为接近, 可直接应用于微弹簧的结构优化设计以简化设计过程。划片后微弹簧芯片尺寸为  $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 。纳米压痕法的测试结果表明, 微弹簧样品的弹性系数约为  $0.554 \text{ N/m}$ , 满足设计要求。该微弹簧具有体积小, 结构简单, 加工容易实现等特点, 它的成功研制为实现低  $g_n$  值微惯性开关的工程实用化奠定了基础。