

激光透射连接硅与玻璃熔池研究

王 霄 薛国春 李 品 蒋 涛 高阳阳 陈 浩 黄 创 严 长 刘会霞

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 使用 Nd:YAG 脉冲激光器对硅与玻璃进行激光透射连接实验,研究了工艺参数(功率、速度及离焦量)对熔池几何要素(熔深、熔宽及深宽比)的单因素及交互式影响,分析了激光能量密度对激光透射连接硅与玻璃熔池成形的影响,并量化了激光能量密度与熔池几何要素之间的关系。得到了深宽比与剪切强度的匹配曲线。结果表明,当激光能量密度大于 8 J/mm^2 时,深宽比趋于平稳,深宽比达到 0.25 时,其剪切强度达到最大值,激光能量密度对熔池成形及连接质量有着较为显著的作用。

关键词 激光技术; 激光透射连接; 硅; 玻璃; 熔池

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0603007

Investigation on Melt Pool in Transmission Laser Bonding of Silicon and Glass

Wang Xiao Xue Guochun Li Pin Jiang Tao Gao Yangyang Chen Hao
Huang Chuang Yan Zhang Liu Huixia

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract A study on transmission laser bonding of silicon and glass by Nd:YAG pulse laser is conducted. Independent and interactive effects of process parameters (power, speed and stand-off distance) on geometric elements of melt pool (melt pool depth, width, and depth/width ratio) are discussed. Based on this, effects of laser energy density on melt pool shaping for transmission laser bonding of silicon and glass are analyzed. And the relationships between energy density and geometric elements of melt pool are quantified. The matching curve of the melt pool depth/width ratio and lap-shear strength is obtained. The results indicate that the melt pool depth/width ratio stays steady when the laser energy density is more than 8 J/mm^2 , and lap-shear strength achieves the maximum value when the melt pool depth/width ratio is 0.25. Effects of laser energy density on melt pool shaping and bonding quality are significant.

Key words lasers; transmission laser bonding; silicon; glass; melt pool

OCIS codes 140.3538; 160.2750; 160.6000; 350.3390

1 引 言

硅与玻璃是微机电系统(MEMS)技术中应用最广泛的组合材料,二者间的局部连接和封装在 MEMS 制造过程中占据十分重要的地位^[1]。硅与玻璃连接的传统方法主要包括阳极键合、热键合与共溶键合。这些连接方法存在诸多缺陷:阳极键合需要强电场(400~1500 V)和较高的温度(200 °C~500 °C)^[2],此外,在接合过程中,玻璃中碱性离子的

移动会损坏内部电路,既影响元件的性能,又导致装置尺寸与复杂性的增加;热键合过程需要在高温(800 °C~1100 °C)下操作较长时间(5~24 h)^[3~5],电路易损伤;采用共溶键合时,由于接合过程中有较高的能量输入,粘结剂易变形,难以保证封装的精确性。为了克服这些缺点,学者们研发了低温接合硅与玻璃的新技术——激光透射连接技术^[6],该技术也应用于聚合物与聚合物以及聚合物与金属之间的

收稿日期: 2013-01-08; **收到修改稿日期**: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51275219)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201105)和江苏高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 王 霄(1964—),男,教授,主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。E-mail: wx@ujs.edu.cn

连接^[7,8]。与传统连接方法相比,该技术对工作环境要求低,在连接过程中使用无碱玻璃,不使用粘结剂,能够进行局部连接与整体封装,具有很高的加工柔性。此外,利用激光透射连接硅与玻璃接头宽度小,能够满足 MEMS 系统小型化的需求。目前有关激光透射连接硅与玻璃的研究主要集中在以下几个方面:使用不同种类激光器、不同中间层材料进行硅与玻璃连接的可行性研究^[9~12];分析连接特性,探讨连接作用机理^[13~15];建立连接过程热效应的数学模型^[16],以及运用建立的有限元模型对连接温度场进行数值模拟^[17]等。研究表明,熔池成形对连接质量有着较大的影响,不同的熔池几何要素(熔深、熔宽及深宽比)下的连接件的剪切强度差别很大。目前尚无激光透射连接硅与玻璃熔池成形方面的系统研究,为了获得较好的连接质量,迫切需要对熔池成形进行研究。

本文采用 Nd:YAG 脉冲激光器对硅与玻璃进行了激光透射连接,建立了能量密度与熔深、熔宽及深宽比之间的关系曲线以及深宽比与剪切强度的匹配曲线,研究了能量密度对熔池成形的影响以及熔池成形对连接质量的影响。

2 激光透射连接硅与玻璃实验

2.1 实验装置

实验使用 Nd:YAG 脉冲激光器(波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$),图 1 为实验装置示意图,该激光透射连接专用夹具的夹紧力通过两侧螺母施加力来实现,4 根竖直的导向柱使得夹紧力较为均匀,夹紧力通过压力传感器测量并通过显示器读出。在一定范围内,激光透射连接硅与玻璃的连接质量随着夹紧力的增加而增加,当达到一定值时,连接质量趋于平稳^[3]。

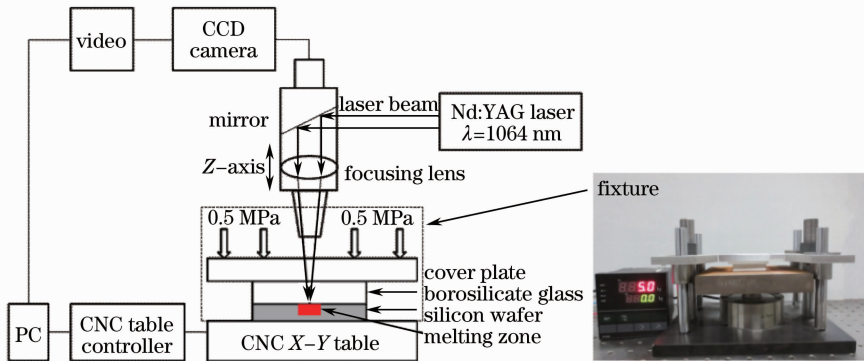


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

2.2 材 料

实验材料为 $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 硅与高硼硅玻璃。硅的厚度为 $525 \pm 10 \mu\text{m}$,高硼硅玻璃的厚度为 $1000 \pm 20 \mu\text{m}$ 。激光透射连接与阳极氧化技术类似,对零件表面质量要求较高^[1]。其中,硅片选用半

导体清洗剂(RCA 溶液)进行清洗,依次使用 RCA1 溶液和去离子水对玻璃进行清洗^[18]。

2.3 连接过程

实验研究工艺参数(功率、速度及离焦量)对熔池成形的影响,表 1 为工艺参数的取值范围。

表 1 实验参数范围

Table 1 Process control parameters

Parameter	Level				
	1	2	3	4	5
Power /W	10	12.5	15	17.5	20
Speed /(mm/min)	100	150	200	250	300
Stand-off distance /mm	0	1	2	3	4

3 结果与讨论

3.1 熔池成形与微观形貌

由于硅片与玻璃易碎,难夹持,因此利用镶嵌机

将试样镶嵌,再切割镶嵌好的试样,使用基恩士电子显微镜观察熔池断面,如图 2 所示,从熔池断面图中可以看出熔池几何要素:熔深与熔宽。

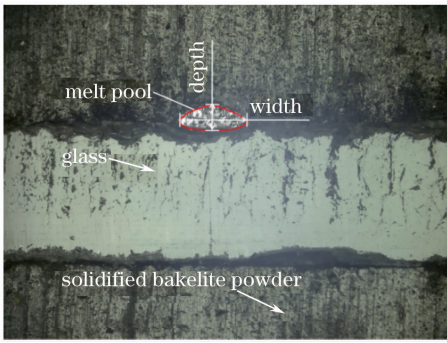


图 2 熔池断面图

Fig. 2 Cross-section view of the melt pool

使用基恩士电子显微镜观察连接之后的熔池微观形貌,图3(a)~(h)为不同工艺参数下所形成的

典型熔池微观形貌图,图 3 显示出不同工艺参数对熔池成形以及微观形貌有着较大的影响,从图 3(a)、(b)及(d)可以看出功率越大,所形成的脉冲点越不明显,即熔融的材料越多,图 3(c)、(d)及(h)显示速度越小熔融的材料越多,图 3(e)与(g)显示功率越大,形成的微观形貌越致密,图 3(d)与(f)相比较,离焦量对微观形貌的影响较大。

在研究熔池成形过程中发现在激光扫描路径方向上,熔池首尾宽度发生变化,末端的熔宽稍大于首端的熔宽,如图 4 所示,其原因是在激光透射连接过程中,硅所吸收的能量不断增多,硅片的温度不断升高,硅对激光的吸收率逐渐增加^[19],从而使得更多的材料参与熔池的形成。

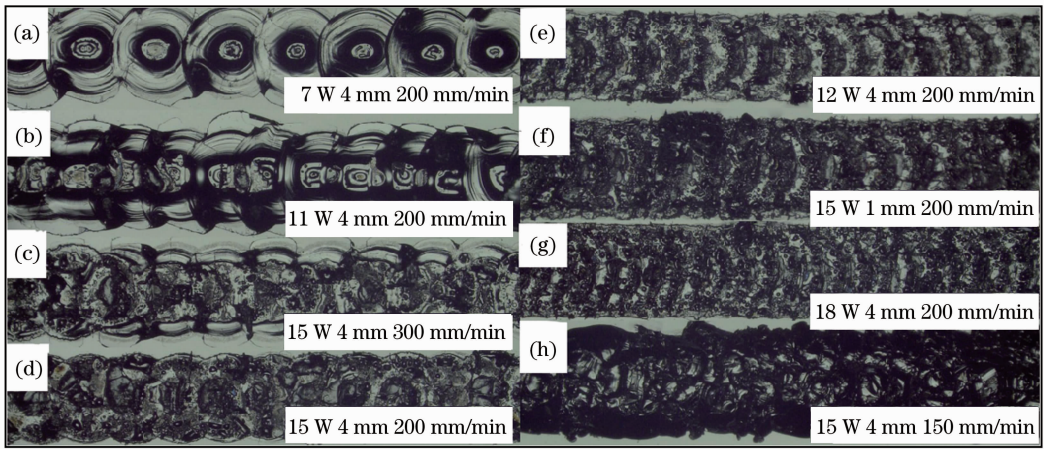


图 3 典型熔池微观形貌图

Fig. 3 Micrographs of typical melt pools

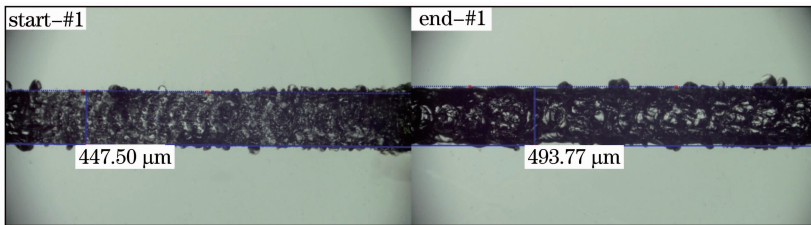


图 4 熔池首尾宽度变化图

Fig. 4 Variation of melt pool width

3.2 工艺参数对熔池成形的影响

图 5(a)、(b)、(c)分别为功率、速度及离焦量对熔深、熔宽及深宽比的单因素影响趋势。从图中可以看出,熔深、熔宽及深宽比都随着功率的增加而增加,随着速度的增加而降低,随着离焦量的增加而降低,3个影响图显示功率对熔深及深宽比的影响幅度要大于速度与离焦量,而离焦量对熔宽的影响幅度要大于功率与速度,在图 5(c)中,随着速度的增加,速度对深宽比的影响趋于平稳,而功率的影响幅度较大。

研究多因素对熔池成形的交互式影响对提高连

接质量具有重要的意义。图 6 表示参数对熔深的交互式影响趋势。图 6(a)中,在相同的功率下,速度越小获得的熔深越大,这是因为在单位时间内硅片所吸收的能量多导致更多的材料熔融,从宏观上看,形成了较大的熔深;在图 6(b)中,当功率相同时,熔深随着离焦量的增加而升高,随后降低,当离焦量为 2 mm 时,获得的熔深最大,这为增加熔深提供了很好的指导;由速度与离焦量对熔深的交互式影响图可以看出,在扫描速度较低时,熔深随着离焦量的增加而减少,而当扫描速度较大时(大于

185 mm/min), 适中的离焦量所获得的熔深较大。

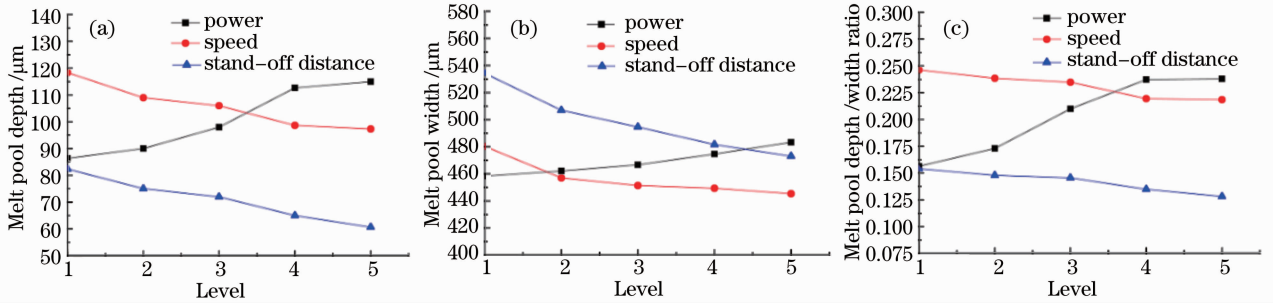


图 5 工艺参数对熔池几何要素的影响。(a)熔深;(b)熔宽;(c)深宽比

Fig. 5 Effects of parameters on melt pool's geometric elements. (a) Melt pool depth; (b) melt pool width; (c) melt pool depth/width ratio

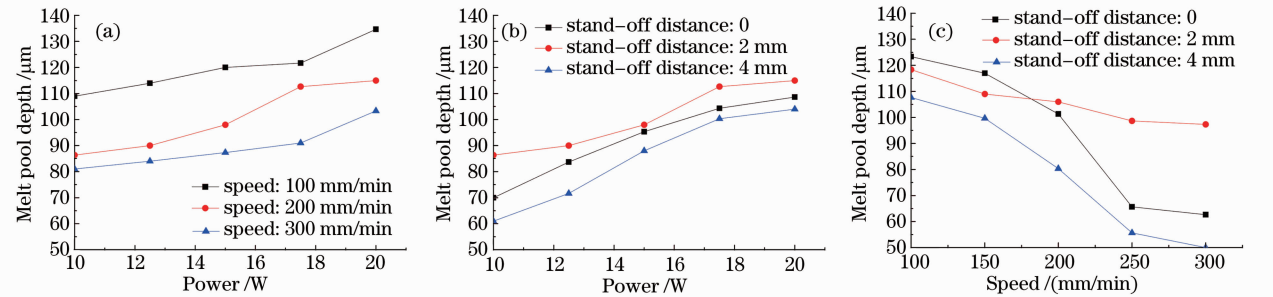


图 6 (a) 功率与速度、(b) 功率与离焦量及 (c) 速度与离焦量对熔深的交互式影响

Fig. 6 Interactive effects of (a) power/speed, (b) power/stand-off distance and (c) speed/stand-off distance on melt pool depth

图 7 为功率与速度、功率与离焦量及速度与离焦量对熔宽的交互式影响趋势图。在图 7(a)中,当功率相同时,熔宽随着速度的增加而减小;当速度相同时,熔宽随着功率的增加而增加,这都是由于连接件在单位面积上获得的能量减少和增加所导致的。从图 7(b)中可以看出,离焦量为 0 时(此时光斑直

径最小)与其他离焦量相比所形成的熔宽较大。结合功率与离焦量对熔深的交互式影响,可以得出,要得到较大的深宽比,离焦量不宜取 0。在图 7(c)中,相同的离焦量下,熔宽随着速度的增加而减小,速度相同时,离焦量为 2 mm 时所获得的熔宽最小,利于 MEMS 封装小型化。

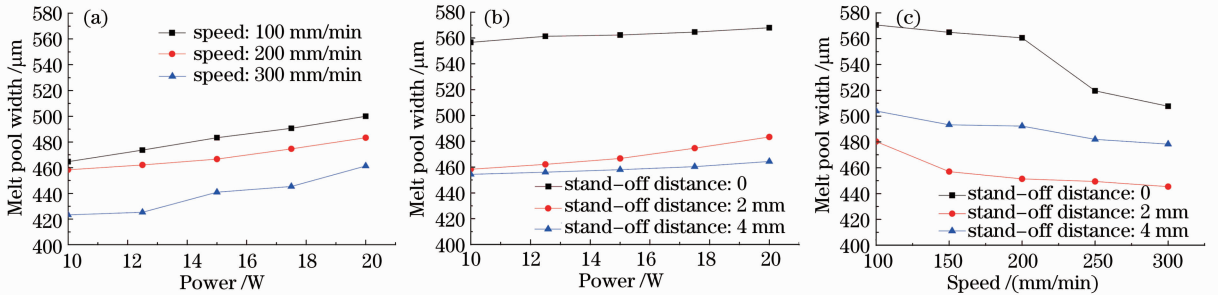


图 7 (a) 功率与速度、(b) 功率与离焦量及 (c) 速度与离焦量对熔宽的交互式影响

Fig. 7 (a) Interactive effects of power/speed, (b) power/stand-off distance and (c) speed/stand-off distance on melt pool width

图 8 为功率与速度、功率与离焦量及速度与离焦量对深宽比的交互式影响趋势图。在图 8(a)中,速度相同时,深宽比都随着功率的升高而增加,速度较低时,熔池的深宽比较高;由图 8(b)可看出,功率

相同时,深宽比在离焦量为 0 时较大;图 8(c)显示,在相同的离焦量下,深宽比随着速度的增加而减小,当离焦量为 2 mm 时,深宽比同样取得较大值,这对实际生产有较好的指导意义。

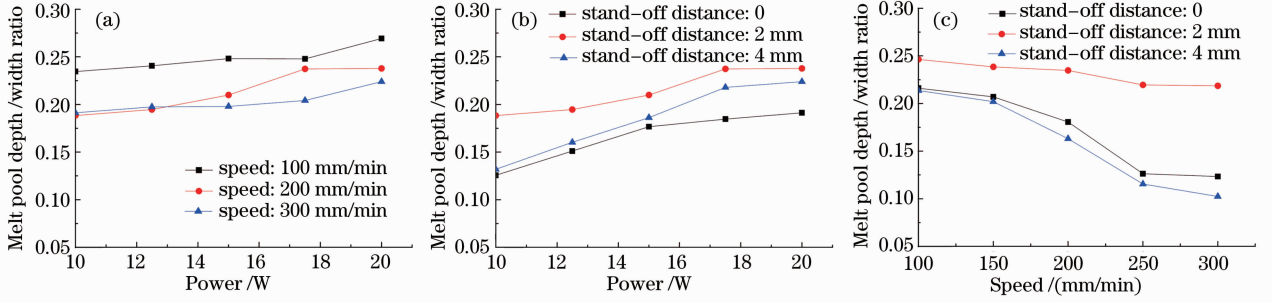


图 8 (a) 功率与速度、(b) 功率与离焦量及(c) 速度与离焦量对深宽比的交互影响
Fig. 8 Interactive effects of (a) power/speed, (b) power/stand-off distance and (c) speed/stand-off distance on the melt pool depth/width ratio

3.3 能量密度对熔池成形的影响

激光连接线能量是激光能量有效利用率的一种标志^[20],激光连接线能量为

$$J = \frac{P}{v}, \quad (1)$$

式中 P 为激光功率, v 为扫描速度。但是其定义中并不包含光斑直径的作用,实际上,光斑直径对熔深及熔宽的影响很大,光斑直径较大或较小很难达到较理想的熔深,得到的连接质量较差,如玻璃中出现大量裂纹、硅片破裂、硅与玻璃未连接等,很有必要综合考虑光斑直径在激光透射连接硅与玻璃中的作用,因此,激光能量密度对熔池成形起决定性作用。能量密度的表达式为

$$w = \frac{P}{v \cdot d_{\text{spot}}}, \quad (2)$$

式中 d_{spot} 为光斑直径。图 9 为 Rofin Startweld 250 Nd:YAG 脉冲激光器的光斑直径与离焦量的拟合曲线图,光斑直径 d_{spot} 是关于离焦量 x 为自变量的二次多项式,即

$$d_{\text{spot}} = 16.59x^2 - 471.7x + 3969. \quad (3)$$

式中由于硅的厚度为 $525 \pm 10 \mu\text{m}$,属于薄壁材料,

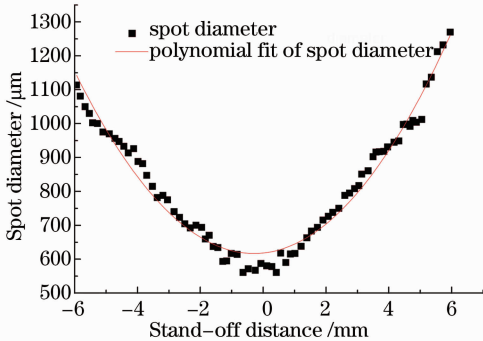


图 9 光斑直径与离焦量的拟合曲线图

Fig. 9 Fitting curve of spot diameter and stand-off distance

宜采用正离焦^[21],即取 $x \in [0, 4]$ 。

通过研究工艺参数对熔池成形的单因素、交互式影响以及激光能量密度,进一步量化了能量密度与熔池几何要素(熔深、熔宽以及深宽比)之间的关系,对图 10(a)、(b)的实验数据点进行了拟合,得到了能量密度 w 与熔深 h_p 及熔宽 w_p 的函数关系式为

$$\begin{cases} h_p = 0.06w^3 - 2.12w^2 + 25.73w + 9.33 \\ w_p = 0.03w^3 - 0.94w^2 + 12.41w + 413.56 \end{cases} \quad (4)$$

对能量密度与深宽比 ν 的数据进行拟合,得到了相应函数关系式为

$$\nu = 0.252 - \frac{1.44}{5.76 + w^2}, \quad (5)$$

(4)式中的三次多项式分别为激光透射连接硅与玻璃的最大熔深及熔宽与能量密度的关系,其物理意义为对某一厚度硅片与玻璃进行激光透射连接所需的最小能量密度。在激光透射连接硅与玻璃的过程中,希望采用最小的能量输入获得最大的熔深及深宽比,以提高连接效率,当熔池的深宽比达到最大值时所需要的连接能量密度称为有效能量密度,对于一定厚度的硅来说,达到特定深宽比所需的能量密度通常在一定范围内,在该范围内,使得熔池深宽比达到最大值时的最小能量密度称为最有效能量密度。从(5)式可以看出,当能量密度大于等于 8 J/mm^2 时,熔池的深宽比基本保持不变(即维持在 0.23 左右),且连接件的剪切强度可以符合要求^[9],因此, 8 J/mm^2 为激光透射连接厚为 $525 \pm 10 \mu\text{m}$ 的硅与厚为 $1000 \pm 20 \mu\text{m}$ 的高硼硅玻璃的最有效能量密度, $w \in [8, 18] (\text{J/mm}^2)$ 为其有效能量密度。

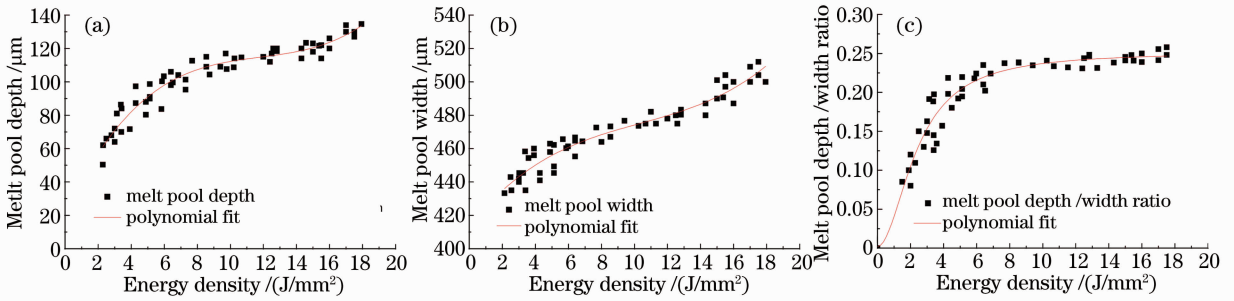


图 10 能量密度与熔池几何要素拟合曲线图。(a)能量密度与熔深;(b)能量密度与熔宽;(c)能量密度与深宽比
 Fig. 10 Fitting curves of energy density and melt pool's geometric elements. (a) Energy density and melt pool depth;
 (b) energy density and melt pool width; (c) energy density and the melt pool depth/width ratio

3.4 深宽比对剪切强度的影响

研究发现,熔池的深宽比在很大程度上影响连接质量,熔池的深宽比与连接件的剪切强度有一定的关系。图 11 为熔池深宽比与剪切强度的匹配曲线。当深宽比达到 0.25 时,剪切强度达到最大值(约为 6 MPa),当深宽比为 0~0.25 时,剪切强度逐渐增加,正如上文所述,在该范围内深宽比所对应的能量密度不断上升;当深宽比大于 0.25 时,剪切强度减小且变化较快,此时主要由于硅片材料的厚度较薄,较大深宽比的熔池会使得熔池附近的硅片本体变得较为脆弱,当深宽比大于等于 0.30 时,硅片在连接时发生破裂。

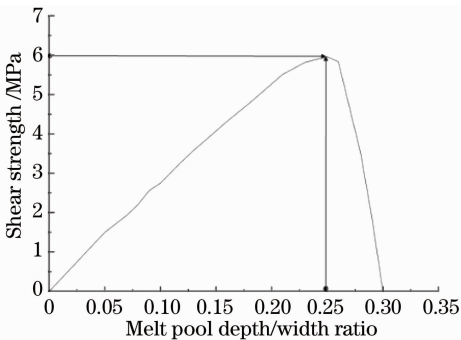


图 11 熔池深宽比与剪切强度匹配曲线
 Fig. 11 Matching curve of the melt pool depth/width ratio and lap-shear strength

4 结 论

实验研究了能量密度对熔池成形的影响,量化了能量密度与熔深、熔宽及深宽比的关系,获得了激光透射连接硅与玻璃的最有效能量密度(8 J/mm^2)以及有效能量密度范围(8~18 J/mm^2),揭示了熔池深宽比与剪切强度的匹配曲线。研究表明:硅与玻璃激光透射连接的连接质量(剪切强度)与深宽比有着较大的关系。当深宽比为 0~0.25 时,剪切强度逐渐增加;当深宽比大于 0.25 时,剪切强度减小

且变化较快;当能量密度处于有效能量密度范围内时,熔池深宽比基本保持不变(0.23 左右)。结合深宽比与能量密度的拟合曲线图以及深宽比与剪切强度的匹配曲线图可以推断出,能量密度与剪切强度有着相应的作用关系,即当能量密度为 0~18 J/mm^2 时,剪切强度随着能量密度的增加而增加,当能量密度大于 18 J/mm^2 时,剪切强度随着能量密度的增加而减小,且变化较快,因此,能量密度对研究熔池成形及连接质量研究具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 A. Gilner, M. Wild, R. Poprawe. Laser bonding of micro optical components[C]. *SPIE*, 2003, **4941**: 112~120
- 2 M. Madou. Fundamentals of Micro Fabrication: the Science of Miniaturization[M]. Boca Raton: CRC Press, 2002
- 3 Ampere A. Tseng, Jong-Seung Park. Mechanical strength and interface characteristics of transmission laser bonding[J]. *IEEE Transactions Electronics Packaging Manufacturing*, 2006, **29**(3): 191~201
- 4 Qinyi Tong, Giho Cha, Roman Gafiteanu. Low temperature wafer direct bonding[J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 1994, **3**(1): 29~35
- 5 Zhi-Xiong Xiao, Guo-Ying Wu, Zhi-Hong Li. Silicon glass wafer bonding with silicon hydrophilic fusion bonding technology[J]. *Sensors and Actuators A*, 1999, **72**(1): 46~48
- 6 Michael J. Wild, A. Gillner, R. Poprawe. Advances in silicon to glass bonding with laser[C]. *SPIE*, 2001, **4407**: 135~141
- 7 Wang Xiao, Zhang Cheng, Wang Kai *et al.*. Multi-objective optimization of laser transmission welding of polycarbonate process based on genetic algorithm-response surface methodology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0603003
 王 霄, 张 成, 王 凯 等. 基于遗传算法-响应曲面方法的激光透射焊接聚碳酸酯工艺的多目标优化[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0603003
- 8 Liu Huixia, Wang Kai, Li Pin *et al.*. Transmission laser bonding characteristics of Ti coated glass and PET[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0902008
 刘会霞, 王 凯, 李 品 等. 镀钛玻璃与 PET 之间的激光透射连接及其性能[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0902008
- 9 Takayuki Tamaki, Wataru Watanabe, Kazuyoshi Itoh. Laser micro-welding of silicon and borosilicate glass using nonlinear absorption effect induced by 1558 nm femtosecond fiber laser pulses[C]. *SPIE*, 2007, **6460**: 646018
- 10 Cheng Luo, Li Weilin. The application of nanosecond-pulsed

- laser welding technology in MEMS packaging with a shadow mask [J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, **97-98**: 398~404
- 11 U. M. Mescheder, M. Alavi, K. Hiltmann *et al.*. Local laser bonding for low temperature budget[J]. *Sensors and Actuators*, 2002, **97-98**: 422~427
- 12 N. Lorenz, M. D. Smith, D. P. Hand. Wafer-level packaging of silicon to glass with a BCB intermediate layer using localised laser heating [J]. *Microelectron. & Reliab.*, 2011, **51** (12): 2257~2262
- 13 Alexander Horn, Ilja Mingaev, Alexander Werth *et al.*. Joining of thin glass with semiconductors by ultra-fast high-repetition laser welding[C]. *SPIE*, 2008, **6880**: 68800A
- 14 M. J. Wild, A. Gillner, R. Poprawe. Locally selective bonding of silicon and glass with laser[J]. *Sensors and Actuators*, 2001, **93**(1): 63~69
- 15 E. Haberstroh, W. M. Hoffmann, R. Poprawe. Laser transmission joining in microtechnology [J]. *Microsystem Technology*, 2006, **12**(7): 632~639
- 16 S. Theppakuttai, D. B. Shao, S. C. Chen. Localized laser transmission bonding for microsystem fabrication and packaging [J]. *J. Manufacturing Processes*, 2004, **6**(1): 24~31
- 17 Ankitkumar Dhorajiya. Mechanical and Heat Transfer Finite Element Modeling of Transmission Laser Micro Joining [D]. Michigan: Wayne State University, 2008. 25~34
- 18 Reiner Witte, Hans Herfurth, Stefan Heinemann. Laser joining of glass with silicon[C]. *SPIE*, 2002, **4637**: 487~495
- 19 M. R. T. Siregar, M. von Ailmen, W. Luthy. Temperature dependence of optical absorption at $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ in amorphous and crystalline silicon[J]. *Helv. Phys. Acta*, 1979, **52**: 45~48
- 20 E. Dumord, J. M. Jouvard, D. Grevey. Modeling of high power CW Nd:YAG laser welding[C]. *SPIE*, 1996, **2889**: 26~33
- 21 Wang Jiachun, Wang Xizhe, Hui Songxiao. Research of linear heat input and laser focus position for laser welding HE130 titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 179~184
王家淳, 王希哲, 惠松骁. HE130 合金激光焊接线能量与焦点位置研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 179~184

栏目编辑: 宋梅梅