

## 激光烧蚀硅基表面抗反射微结构的声信号监测

黄维鹏<sup>1</sup>, 周锐<sup>1,2\*</sup>, 陈哲堃<sup>1</sup>, 袁公发<sup>1</sup>, 廖启乐<sup>1</sup><sup>1</sup>厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院, 福建 厦门 361005;<sup>2</sup>中国福建能源材料科学与技术创新实验室, 福建 厦门 361005

**摘要** 为了提高抗反射硅表面制备的加工质量、缩短研制周期,提出了一种基于时频域处理的面向激光加工过程的声波信号在线监测及分析方法。利用声信号的时频谱图分析了 0~30 kHz 内的声信号与激光烧蚀形成的表面微结构特征尺寸之间的相关性,具体分析了激光功率及加工次数对微结构深度及声信号各频率幅值变化的影响。以声信号作为输入,基于神经网络对加工质量进行预测。实验结果表明:通过监测激光加工时产生的声信号能够明确反映被烧蚀硅表面是否形成周期性微结构,且微结构宽度不同,其对应的声信号频率组成也不同。在微结构宽度固定的情况下,归一化后的声信号特征参数随微结构深度线性变化,且受到激光功率变化的影响忽略不计。以硅基表面 5% 的反射率作为加工质量分界线,采用神经网络对加工质量的预测结果与实际测量结果的准确率可以超过 90%。结果表明:声波在线监测可以有效应用于评估表面加工质量,为抗反射硅表面制备过程的实时监测提供了理论依据。

**关键词** 表面光学; 激光烧蚀; 抗反射硅基表面; 声发射信号; 实时监测; 神经网络

中图分类号 O484.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221915

## 1 引言

硅作为一种半导体广泛应用于太阳能电池<sup>[1-2]</sup>、光电探测器<sup>[3-4]</sup>、表面拉曼增强<sup>[5-6]</sup>等领域。在太阳能电池领域,未经处理的硅表面具有较高的反射率,这会导致太阳能电池的吸收效率较低。因此,通常需要在硅表面制备一层微纳结构,微纳结构可以大大改善光捕获效果,增强光学吸收,从而降低表面反射<sup>[2]</sup>。传统的微纳结构制备方法包括金属辅助化学刻蚀法(MACE)<sup>[7]</sup>、反应离子刻蚀法(RIE)<sup>[8]</sup>、湿法刻蚀<sup>[9]</sup>、纳米压印技术<sup>[10]</sup>及脉冲激光烧蚀法<sup>[2,11]</sup>。激光烧蚀法相比其他制备方法加工流程更为简洁、可控性更强。其中,硅对 320~1100 nm 波长的光具有较好的吸收,因此可以选用波长为 1064 nm 的红外激光器作为光源<sup>[2]</sup>。在激光制备抗反射硅片的过程中,通常使用离线检测的方法来评估加工质量,如使用光谱仪测量材料的反射率或超景深显微镜测量结构的深宽比。但这些监测方法的效率低下,需要在制备结束后转移样品进行观测,无法及时根据加工结果优化加工过程,实现原位动态表征。同时,短脉冲激光烧蚀过程产生的热影响可能会对微结构造成一定的不稳定性 and 随机性,例如激光烧蚀过程中深宽比较大的结构可能在激光的作用下发生崩塌,导致表面反射率的升高,严重影响抗

反射硅表面的陷光性能。为提高脉冲激光烧蚀制备抗反射硅片的质量,实现对样品质量的实时评估,有必要对脉冲激光烧蚀过程的实时监测进行深入探究。

纳秒激光烧蚀过程常常伴随着大量声、光、电、热、力信号的释放,依托于多种传感器可以实现对加工过程的实时监测。目前,激光焊接、熔覆、表面冲击强化等领域已建立相对完善的实时监测方法,根据监测到的实时信号可以有效地判断加工质量<sup>[12-19]</sup>。例如, Kong 等<sup>[15]</sup>应用光谱仪采集激光与金属作用时产生的等离子体羽的形貌和发射光谱,可以实时发现焊接过程中产生的缺陷。Grasso 等<sup>[18]</sup>应用高温计采集激光熔覆过程中熔池和基体材料的实时温度,建立了熔池温度和送粉速率之间的关联,从而实现了对熔覆进程的在线监测。这些方法可以实现在不同激光加工领域的实时监测,但它们的分辨率均相对较低,不适用于监测激光烧蚀形成的表面微结构。而激光烧蚀产生的声信号对激光功率和焦点位置变化敏感,可用于有效判断烧蚀速率,并且每一脉冲的激光烧蚀都会产生一一对应的声波信号,从另一角度实现了较高的空间分辨率。

在激光烧蚀过程中,结构的形成主要是因为被加工的材料吸收激光的能量,材料升温,发生熔化、蒸发、汽化等现象,导致材料被去除<sup>[20]</sup>。与此同时,固体中的

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2022-11-20; 录用日期: 2022-12-05; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 福建省科技计划(2020H0006)、国家自然科学基金(62175203)

通信作者: \*rzhou2@xmu.edu.cn

原子和分子吸收激光后形成由自由电子、电离原子等,进而组成等离子体羽流。等离子体羽流在空气中高速膨胀,形成等离子体冲击波,冲击波在空气中传播,并衰减成声波<sup>[21]</sup>。因此,声波信号与激光参数及加工过程息息相关,这使得声波监测广泛应用于各种激光加工方法的质量评估中,如在激光焊接领域判断焊缝类型<sup>[22-23]</sup>、在激光清洗领域判断清除效果<sup>[16, 24]</sup>、在激光切割领域评估划线质量<sup>[12]</sup>、在激光冲击强化领域估算表面残余应力<sup>[25]</sup>、在添加剂制造领域对激光粉末床熔化(L-PBF)制造的零件质量进行分类<sup>[26]</sup>等。声波信号的特征分析与提取主要有时域分析和频域分析两种方法<sup>[12, 26]</sup>。时域分析通常提取第一峰峰值、均方根值(RMS)或能量计数(MARSE)等特征参数,可以直观地观察出信号随时间的变化过程。而当声波信号由不同频率、幅值的信号组成时,仅通过时域分析不能很好地揭示信号特征,此时使用快速傅里叶变换(FFT)或小波函数可以将时域信号转换为频域信号,分析声波信号的频率组成,如根据不同焊接状态时的声波信号频率组成不同来判断焊接质量<sup>[22-23]</sup>。但频域分析只能得到整段信号的分析结果,无法得到声波信号的频率组成随时间的变化过程,这时就需要时域和频域同步分析的短时傅里叶变换(STFT)和连续小波变换(CWT)<sup>[27]</sup>。目前,机器学习发展迅速,人工神经网络(ANN)<sup>[22, 26, 28-29]</sup>、模式识别<sup>[30]</sup>等分类算法也广泛应用于声波监测中,为脉冲激光烧蚀过程的智能监测提供理论基础。但目前基于声信号的实时监测多聚焦于对激光参数或加工质量的监测,针对微纳结构成型过程的研究还不多,因此需要开发相关技术。

本文应用短时傅里叶变换比较了纳秒激光在硅片表面烧蚀制备不同尺寸微结构时声信号的时频域特征,通过快速傅里叶变换进行声信号的频域分析,建立表面微结构特征尺寸与声信号特征参数之间的联系,最后将该特征参数作为人工神经网络的输入实现对抗反射硅片表面加工质量的预测。本文提出的实时监测系统可以根据加工过程产生的声信号实时判断表面周期性微结构的平均深度及加工质量,并且不受激光功率变化的影响。通过这种对激光加工过程信号的分析可以实时地对样品加工质量进行预判,避免了繁琐的离线检测,有效提高了加工水平。

## 2 实验与材料

### 2.1 实验装置

本文采用的实验装置如图 1 所示,由激光烧蚀系统和声波检测系统组成。激光烧蚀系统使用主振荡功率放大(MOPA)光纤激光器(JPT 30-LP1+-L1),其具体参数见表 1。声波检测系统由内置前置放大器的麦克风、示波器和计算机组成。麦克风使用的是预极化电容麦克风(MicW M215),由 48 V 幻象电源为其供电,麦克风的频率响应范围为 20 Hz~31.5 kHz,灵敏度为 40 mV/Pa,麦克风位于距离样品约 10 cm 的位置。来自麦克风的声波信号由便携式 USB 8 位示波器(LOTO OSC482)以 240 kHz 的采样频率采集。将采集到的数据导入到 Matlab 软件中进行快速傅里叶变换(FFT)和短时傅里叶变换(STFT),以得到对应数据的频谱及时频谱。

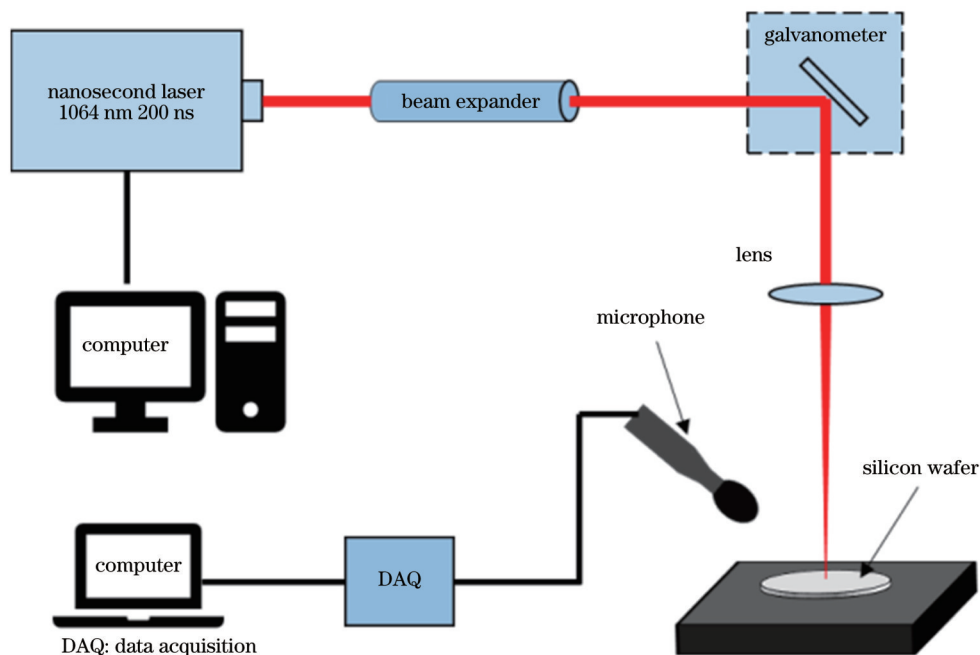


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

表 1 光纤激光器参数  
Table 1 Parameters of fiber laser

Fiber laser parameter	Specification
Wavelength /nm	1064
Pulse width /ns	200
Average output power /W	>30
Pulse frequency /kHz	1-400
Spot diameter /mm	0.03
Spot quality factor $M^2$	<1.5
Beam mode	Gaussian beam

## 2.2 实验样品及制备

本文使用 4 inch (1 inch=2.54 cm) 的单面抛光单晶硅片作为样品,其具体参数见表 2。在进行激光烧蚀之前,先将样品放置于乙醇和去离子水的混合溶液中进行 5 min 超声振荡清洗。随后将样品放置于加工平台上保持不动,由振镜来控制激光加工轨迹。实验中波长为 1064 nm 的红外激光器的脉冲重复频率为 25 kHz,扫描速度为 200 mm/s,以不同扫描间距和扫描次数对清洗后的硅片进行 2 mm×2 mm 方形区域的交叉扫描加工。该光纤激光器在脉冲重复频率为 25 kHz 时的激光单脉冲能量最大,而在脉冲重复频率不变的情况下扫描速度主要影响光斑的重叠面积,对形成的表面微结构宽度影响不大,因此这两种参数在后续实验中保持不变。烧蚀结束后再次对样品进行 5 min 超声振荡清洗。使用超景深显微镜 (KEYENCE VK-X1000) 观察激光烧蚀后硅片的表面形貌,使用紫外-可见近红外分光光度计 (PerkinElmer LAMBDA 1050+) 测量烧蚀后硅片的反射率。

表 2 样品参数规格  
Table 2 Sample parameter specifications

Sample parameter	Specification
Material	Single crystal silicon
Crystal orientation	111
Diameter /mm	100
Thickness / $\mu\text{m}$	525±25
Resistivity /( $\Omega\cdot\text{cm}^{-1}$ )	<0.02
Conduction	P
Doping	Boron
Brand	Siwfer

## 3 结果与讨论

### 3.1 加工过程的微结构宽度动态变化及其声波信号特征

通过扫描路径间距和扫描次数的双因素混合实验探究硅片表面微结构与加工过程中产生的声波信号之间的关系,通过短时傅里叶变换 (STFT) 得到对应信号的时频谱,综合分析激光烧蚀过程产生的声波信号

的时频谱特性。在通过 STFT 得到的图像中,横轴和纵轴分别代表时域和频域,颜色的亮度代表信号的强度。本实验首先选择扫描路径间距研究范围为 20、50、80  $\mu\text{m}$ ,扫描次数为 5、10、15,激光功率为 15 W。

使用超景深显微镜观察激光烧蚀后的硅片表面形貌,如图 2 所示。可以看出,当扫描路径间距 (20  $\mu\text{m}$ ) 小于光斑直径时,整个加工区域均被烧蚀,硅片表面未产生明显的微结构。随着加工次数的增加,被加工区域整体烧蚀深度逐渐增加。如图 3 所示,第 5 次扫描加工对应的时频谱图中仅存在与脉冲重复频率相同的频率为 25 kHz 的声波信号,且随加工次数的增加,其幅值基本不变。

当扫描路径间距 (50  $\mu\text{m}$ ) 稍大于光斑直径时,仅有较少部分区域未被烧蚀,未烧蚀到的区域几乎未发生变化,而烧蚀区由于高斯光束的能量分布而形成 V 型槽道,因此硅片表面在扫描 5 次时就会形成近似于圆锥状的微结构。然而,由于形成的微结构较细,且受到激光烧蚀时产生的热效应、冲击波等多重影响,当锥状微结构的深度达到一定值时,结构崩塌开始出现。根据崩塌后的形貌观测,结构崩塌通常是在微结构的底端发生,崩塌后的位置较为平整。随着激光烧蚀继续进行,微结构四周材料继续被烧蚀,原位置上形成新的锥状微结构。如图 3 所示,当硅片表面经加工形成微结构时,通过时频谱可以看到第 10 次扫描加工时的声信号频率不仅包含 25 kHz,还存在 4.2 kHz 和 20.8 kHz 的频率。

当扫描路径间距 (80  $\mu\text{m}$ ) 远大于光斑直径时,硅片表面大部分区域未被烧蚀,形成近似于方柱状的微结构,微结构深度随加工次数的增加而增加。如图 3 所示,第 15 次扫描加工时的时频谱图中所包含的频率增多,最小频率降低至 2.7 kHz。

当红外纳秒激光进行交叉扫描时的扫描路径间距小于光斑直径时,由于被加工表面均被烧蚀,样品表面几乎没有高度差,得到加工过程的声信号如图 4(a) 所示,每一激光脉冲产生的声信号幅值几乎一致。

而红外纳秒激光进行交叉扫描时的扫描路径间距大于光斑直径时,横、竖线的交点被烧蚀两次,而其他位置仅被烧蚀一次,一次烧蚀与二次烧蚀处形成高度差。激光作用于交点位置时,二次烧蚀的烧蚀深度更深,使得激光光斑与样品表面存在一定的离焦,激光能量密度降低。如图 4(b)、(c) 所示,脉冲激光作用于二次烧蚀处时产生的声信号位于最小的峰值处,加工过程的声信号可以理解为在图 4(a) 的基础上叠加了一个周期为  $T$  的正弦函数,周期  $T$  与激光扫过两个二次烧蚀处所需的时间一致。因此该叠加的正弦函数的频率  $f$  可以表示为

$$f = 1/T = 1/(D/V) = V/D, \quad (1)$$

式中:  $D$  为微结构宽度;  $V$  为激光扫描速度。根据式

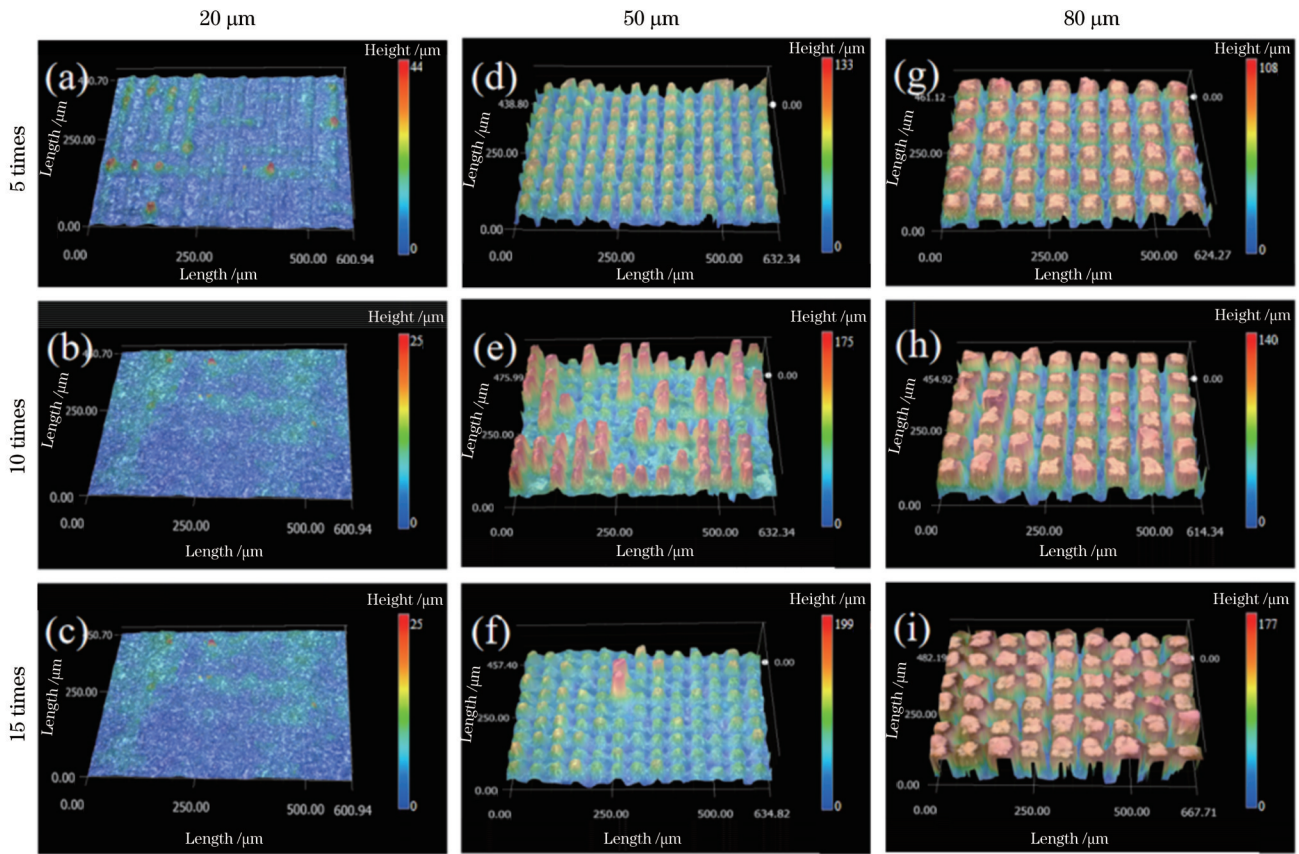


图 2 双因素实验的超景深显微镜图像。(a)(b)(c)无结构；(d)(e)(f)锥状；(g)(h)(i)方柱状

Fig. 2 Ultra-depth-of-field microscopy images of two-factor experiments. (a)(b)(c) No structure; (d)(e)(f) cone; (g)(h)(i) square column

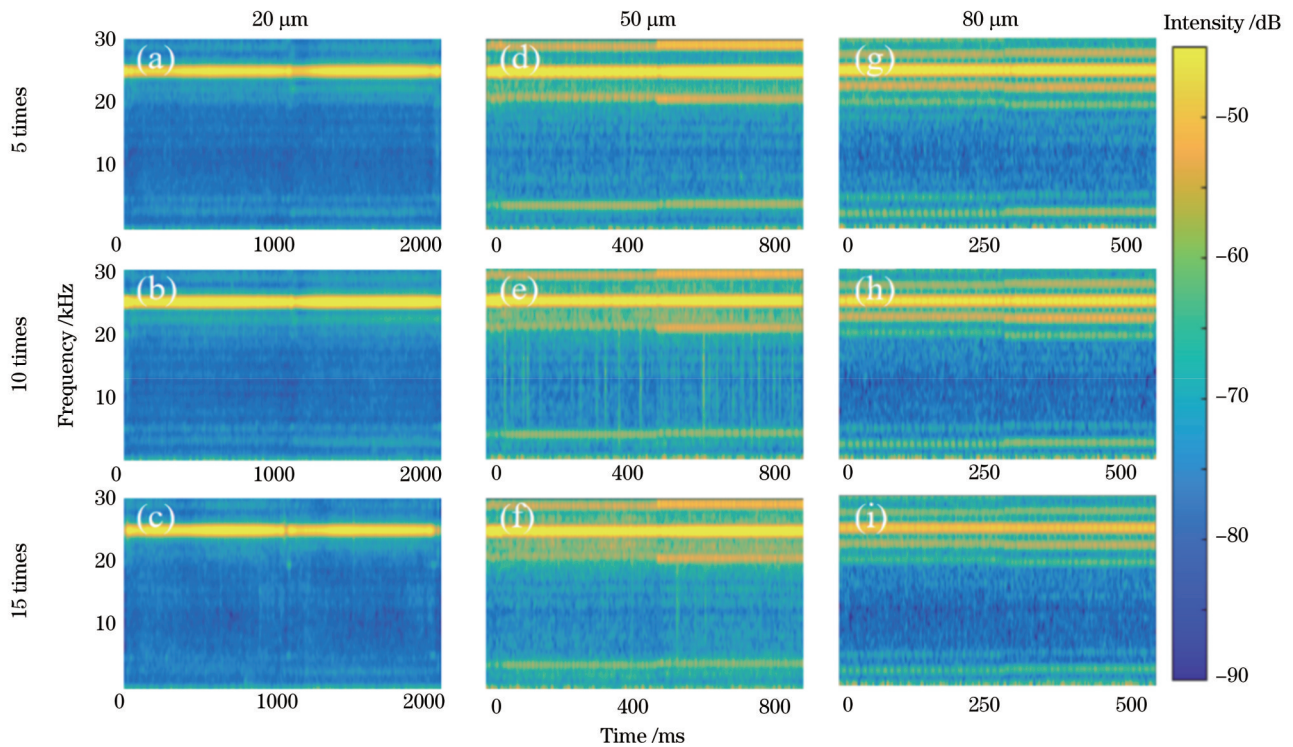


图 3 基于短时傅里叶变换的双因素实验得到的时频谱图。(a)(b)(c)无结构；(d)(e)(f)锥状；(g)(h)(i)方柱状

Fig. 3 Time-frequency spectra of two-factor experiments based on STFT . (a)(b)(c) No structure; (d)(e)(f) cone; (g)(h)(i) square column

(1), 当激光扫描速度固定不变时, 微结构宽度越宽, 对应声信号的频率就越小, 如: 当扫描路径间距分别为  $50\ \mu\text{m}$ 、 $80\ \mu\text{m}$ , 扫描速度为  $200\ \text{mm/s}$  时, 其叠加的正弦函数频率约为  $4\ \text{kHz}$  和  $2.5\ \text{kHz}$ , 而实际测量的过程

声信号除 25 kHz 外,新产生的频率为 4.2 kHz 和 2.7 kHz,理论值与实际测量值的偏差可能是由微结构的宽度略小于扫描路径间距导致的。此外,当没有微结构时,每一脉冲的声信号强度不发生变化,也就不产

生与微结构相关的声信号,这与之前扫描路径间距为 20  $\mu\text{m}$  时的实验结果相符。通过上述实验可以从一定程度上证明通过对新增频率的声波信号进行分析可以得到与微结构宽度相关的信息。

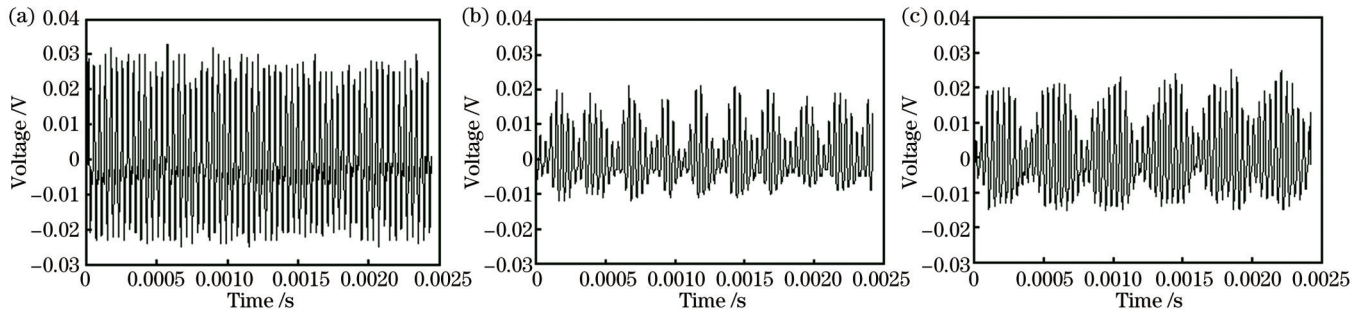


图 4 不同间距的声波信号时域波形。(a) 20  $\mu\text{m}$ ; (b) 50  $\mu\text{m}$ ; (c) 80  $\mu\text{m}$

Fig. 4 Time-domain waveforms of acoustic signal with different intervals. (a) 20  $\mu\text{m}$ ; (b) 50  $\mu\text{m}$ ; (c) 80  $\mu\text{m}$

通过观察激光烧蚀后硅片表面形貌和对应过程声波信号的时频谱,量化了扫描路径间距和加工次数对表面微结构及声波信号的影响。随着扫描路径间距的增加,硅片表面开始出周期性结构,时频谱中出现新的频率;随着加工次数的增加,结构深度发生变化,新出现的频率强度也随之变化。这说明了 0~30 kHz 范围内新产生的频率分布及强度与表面形成微结构的宽度及深度存在相关性。

### 3.2 激光加工参数对实时声信号的影响规律

前文的双因素实验揭示了激光烧蚀形成的表面微结构与时频谱中新出现的频带之间存在相关性,进一步研究烧蚀形成的微结构深度与声波信号特征区段之间的关系,对不同功率、加工次数下的激光烧蚀实验进行了研究。在本实验中,扫描路径间距选择 50  $\mu\text{m}$ ,加

工面积为 2 mm  $\times$  2 mm,激光功率为 12 W、15 W、18 W,逐渐增加加工次数直至最初烧蚀形成的结构完全崩塌,选择这些参数的目的是生成结构宽度较小而结构深度不同的样品。

#### 3.2.1 声波信号预处理

图 5 显示了 15 W 激光功率下激光烧蚀时麦克风监测到的原始声波数据,数据采集卡以 240 kHz 的采样频率采集了 2 s 内的声波数据。其中,激光烧蚀从 0.64 s 进行到 1.48 s,对这一段数据进行提取。3.1 节通过 STFT 得到了原始声波数据的不同频率强度随时间的变化规律,为进一步分析,对提取后的声波数据进行 FFT,提取与表面微结构相关的信号分量功率之和 (4.2 kHz 和 20.8 kHz),傅里叶变换后的频谱如图 5 所示。

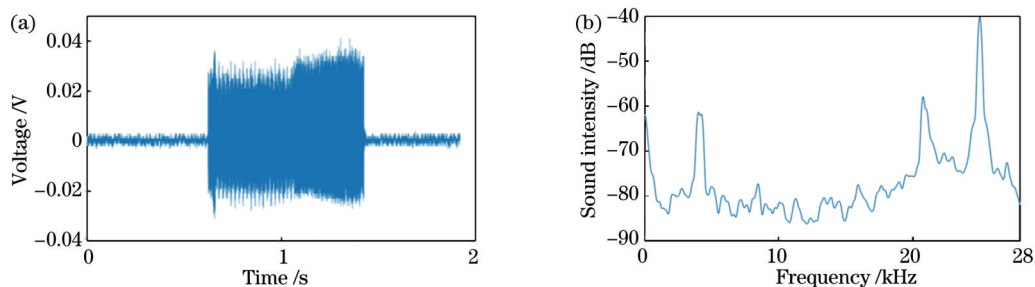


图 5 声波信号。(a) 时域波形; (b) 频谱

Fig. 5 Acoustic signals. (a) Time-domain waveform; (b) frequency spectrum

#### 3.2.2 加工过程的微结构深度动态变化及其声波信号特征

通常,微结构的平均深度计算方法是多次测量取平均值。但实际实验中,随着加工次数的增加,硅片表面的锥状微结构发生了崩塌。为计算发生崩塌后微结构的平均深度,分别测量未崩塌微结构和已崩塌微结构的深度,再统计各自的占比。激光烧蚀形成的微结构深度并不是完全一致的,存在 3~5  $\mu\text{m}$  的浮

动。为方便计算,结构深度的测量方式为 10 次采样取平均值后取整 5 或整 10。平均结构深度 (MSD) 可以表示为

$$D_{\text{MSD}} = H_u a + H_{c1} b + H_{c2} c, \quad (2)$$

式中:  $D_{\text{MSD}}$  为平均结构深度;  $H_u$ 、 $H_{c1}$ 、 $H_{c2}$  分别为未崩塌的结构深度、一次崩塌后的结构深度和二次崩塌后的结构深度;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为未崩塌结构、一次崩塌结构和二次崩塌结构数量占总数的比例。

这里仅给出激光功率为 15 W 且扫描次数为 5、6、16 时的硅片表面形貌, 分别代表未崩塌阶段、初次崩

塌阶段及二次崩塌阶段, 可以看出不同激光功率下不同阶段的硅片表面形貌基本一致。

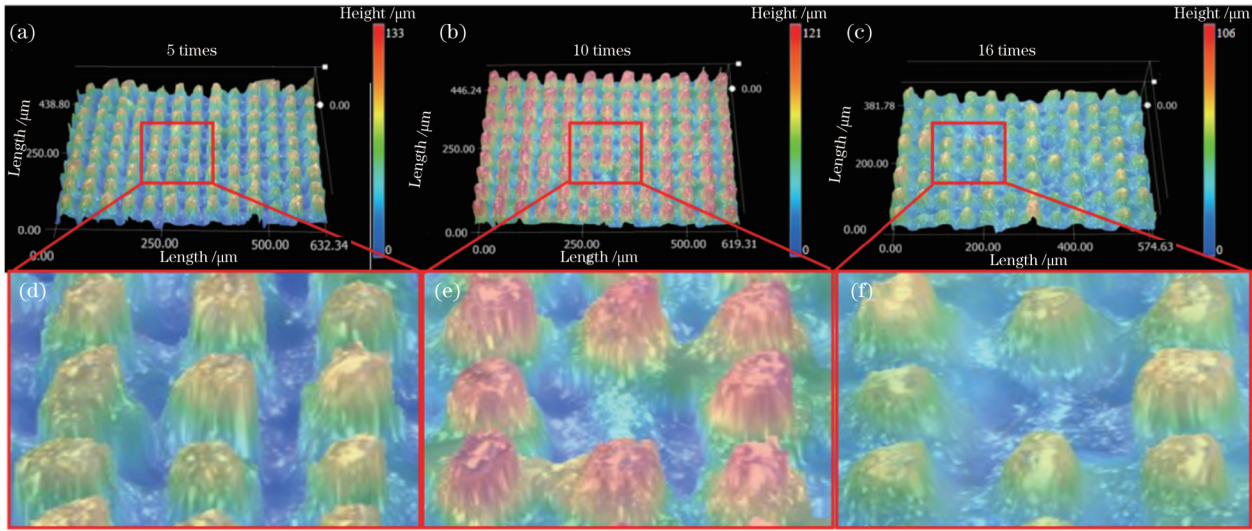


图 6 15 W 激光功率下硅片表面形貌(放大倍数为 500)。(a)烧蚀 5 次;(b)烧蚀 10 次;(c)烧蚀 16 次;(d)图 6(a)的局部放大图;(e)图 6(b)的局部放大图;(f)图 6(c)的局部放大图

Fig. 6 Surface morphologies of silicon wafer under 15 W laser power (magnification is 500). (a) 5 times ablation; (b) 10 times ablation; (c) 16 times ablation; (d) local zoom of Fig. 6(a); (e) local zoom of Fig. 6(b); (f) local zoom of Fig. 6(c)

如图 6 所示, 当激光扫描的次数较少时, 随着被加工部分的材料被烧蚀去除, 硅片表面形成深度逐渐增加的锥状微结构。随着周期性微结构的深度增大, 特征区段的声波信号 (4.2 kHz 和 20.8 kHz) 的幅值之和也随之增大, 如图 7(a)~(c) 中曲线前段所示。随着扫

描次数的继续增加, 微结构的深度也随之增加, 当微结构深度达到一定程度时, 可能开始产生如图 7 中部所示的结构崩塌。结构崩塌通常发生在结构的底部, 崩塌后的样品表面较为平整。结构的崩塌以及未崩塌结构深度的增加使得微结构的平均深度先缓慢增加后逐

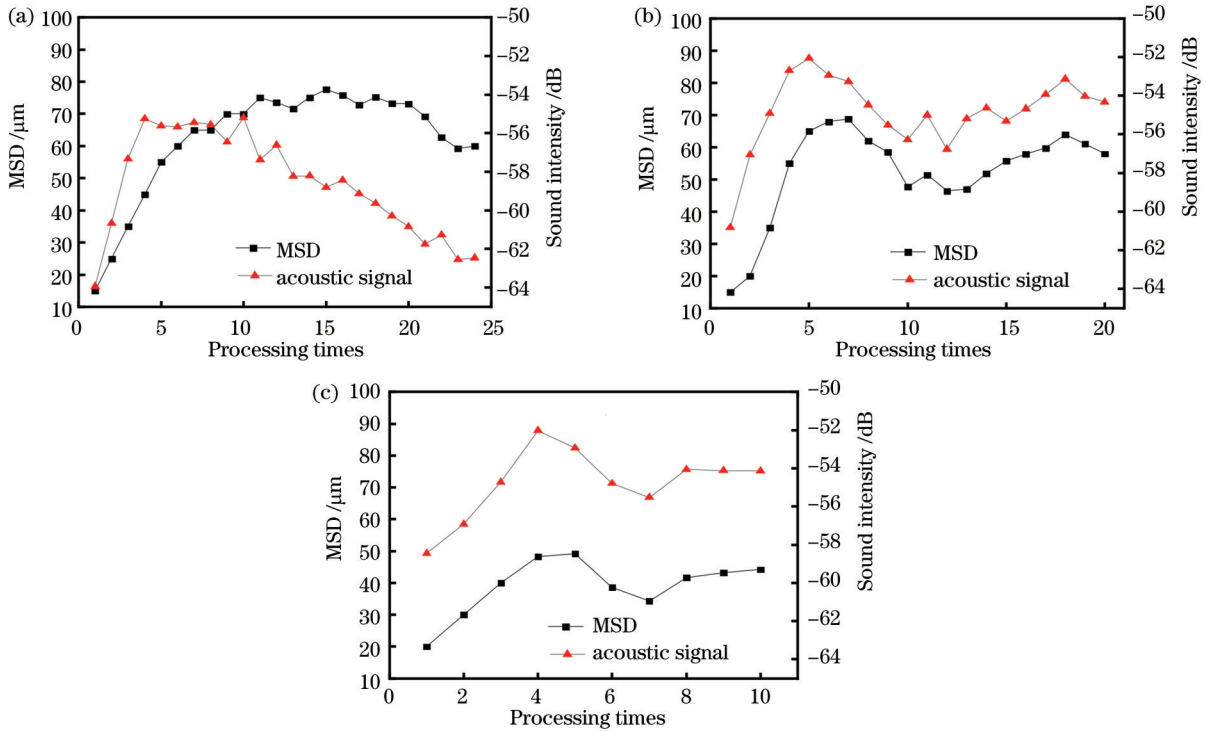


图 7 不同激光功率下 MSD 值与声信号幅值随扫描次数的变化曲线。(a) 12 W;(b) 15 W;(c) 18 W

Fig. 7 Variation curves of MSD value and sound intensity with processing times under different laser powers. (a) 12 W; (b) 15 W; (c) 18 W

渐减小,如图 7 所示。当激光功率固定时,产生的声波信号时域幅值主要受光斑离焦程度的影响。当加工到崩塌后较为平整的样品表面时,由于结构深度不存在周期性变化,声波信号的时域幅值也不存在周期性变化,这会导致加工该位置时的声信号不存在特征区段,进而使加工过程整体声信号特征区段的幅值减小。而未崩塌的微结构深度持续增加使得声波信号的频域幅值也持续增加。因此,此时特征区段的声波信号的频域幅值变化趋势与平均结构深度的变化趋势近似,也是先缓慢增加后逐渐减小。当扫描次数再次增加时,表面微结构的变化过程与发生第一次崩塌时近似,还未崩塌的微结构陆续崩塌,一次崩塌的位置随激光烧蚀的进行形成一定深度的微结构,当微结构达到一定深度时开始出现二次崩塌,平均结构深度再次先增大后减小。

如图 7(a)所示,当激光功率为 12 W 时,烧蚀深度增长较慢,结构完全崩塌所需的扫描次数为 24。当激光功率较小时,激光的热效应及产生的等离子体冲击波也较弱,这使得微结构深度达到 75  $\mu\text{m}$  时才开始发生崩塌,并且最初形成的微结构完全崩塌时并未产生二次崩塌的微结构。如图 7(b)所示,当激光功率为 15 W 时,较低功率时烧蚀深度的增长更快,产生崩塌时的结构深度也降低至 70  $\mu\text{m}$ 。扫描 20 次时最初形成的微结构完全崩塌,并且此时微结构开始产生二次崩塌。当激光功率继续增大至 18 W 时,如图 7(c)所示,微结构深度仅达到 50  $\mu\text{m}$  时就开始发生崩塌,且仅扫描 10 次微结构就已经完全崩塌。

将不同激光功率下的平均结构深度和声信号幅值按深度从小到大重新排序,如图 8 所示,可以看到不同激光功率下的声信号幅值与平均结构深度值并不是线性相关的。这是因为随着激光功率的增大,声波信号的整体强度也增大,这也影响了特征区段的声波信号频域幅值,使得频域幅值无法直接有效地反映结构深度变化。

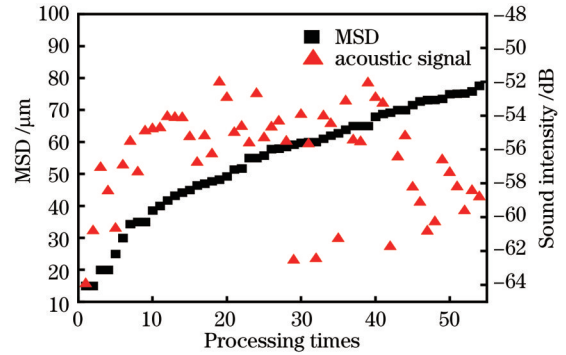


图 8 按深度重新排序的 MSD 值和声信号幅值  
Fig. 8 MSD values and sound intensity reordered by height

### 3.2.3 归一化声波信号频域幅值

为减小声信号整体强度对特征区段频域幅值的影响,使声信号特征区段在不同激光功率下均与平均结构深度有较高的一致性,选择对声波信号进行归一化处理,提取特征区段的声波信号频域幅值占总声波信号频域幅值的比例作为特征参数进行分析。图 9 为声

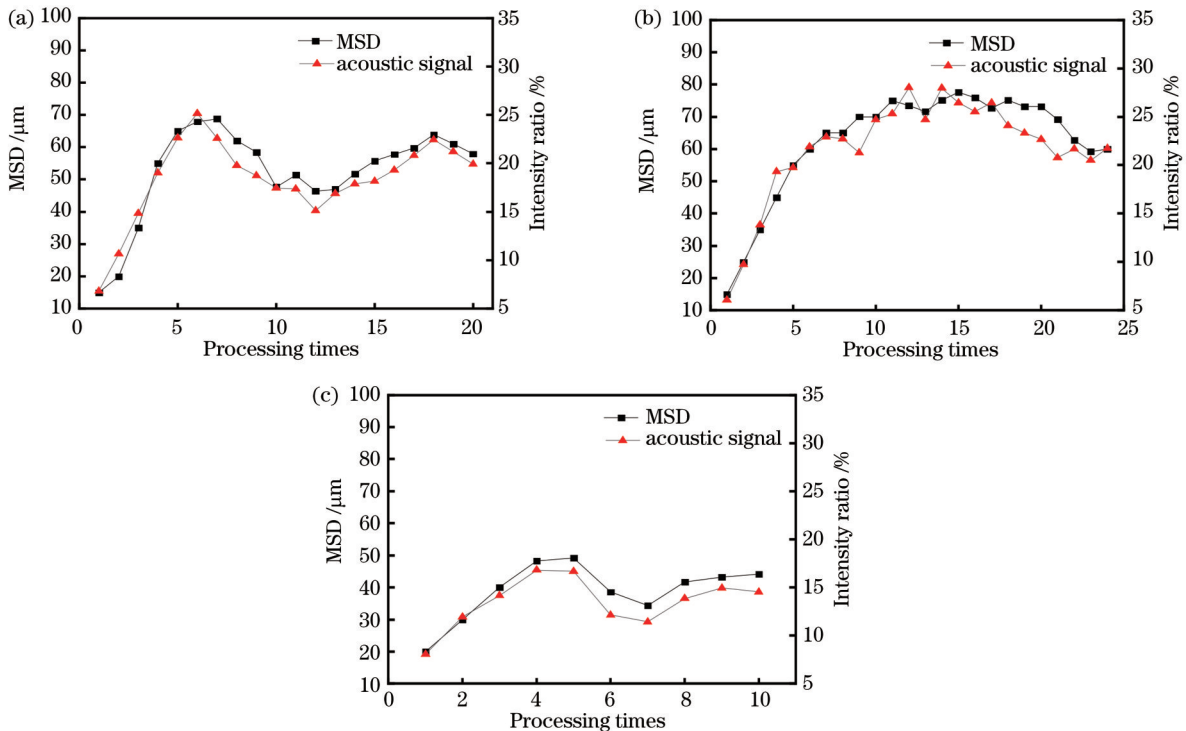


图 9 不同激光功率下 MSD 值与声信号强度占比随扫描次数的变化曲线。(a) 12 W; (b) 15 W; (c) 18 W  
Fig. 9 Variation curves of MSD value and intensity ratio with processing times under different laser powers. (a) 12 W; (b) 15 W; (c) 18 W

信号的强度占比作为特征参数随微结构深度变化的趋势,其不受激光功率的影响,在不同激光功率下均可以很好地反映声信号与表面形成的微结构平均深度的关系。

为更明显地体现以信号分量强度占比作为特征参数的优势,将不同激光功率下加工得到的数据按平均结构深度从小到大进行重新排序,得到如图 10 所示的平均结构深度与声信号特征参数的关系。可以看出:相比于信号分量的强度,强度占比可以更好地反映不同激光功率下声信号与微结构深度之间的关系,二者在一定程度上呈线性关系,线性度为 0.94。应用特征区段声波信号的频域幅值占比的特征参数分析方法虽然不一定是最有效的表面微结构实时监测方法,但可以在一定程度上通过声波信号实时反映加工质量。

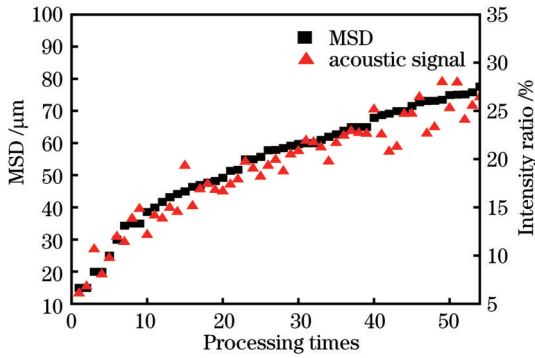


图 10 按深度重新排序的 MSD 值和声信号强度占比  
Fig. 10 MSD values and intensity ratio of acoustical signal reordered by depth

### 3.3 应用神经网络进行加工质量预测

为了将声波信号与预期样品质量联系起来,必须知道实际样件质量,通常选择使用反射率作为抗反射硅片的质量评估标准。使用紫外可见光红外分光光度计对 380~780 nm 的可见光波段进行反射率的测量。图 11 显示了反射率的测量结果,可见光波段内的反射率在 3%~10% 之间变化。根据 Su 等<sup>[31]</sup>和 Franta 等<sup>[32]</sup>

的实验结果,结合实验数据,将 5% 的反射率作为加工质量的分界,1 类的反射率低于 5%,2 类的反射率高于 5%。所有反射率硅片均采用与 3.2 节一致的激光参数进行制备。

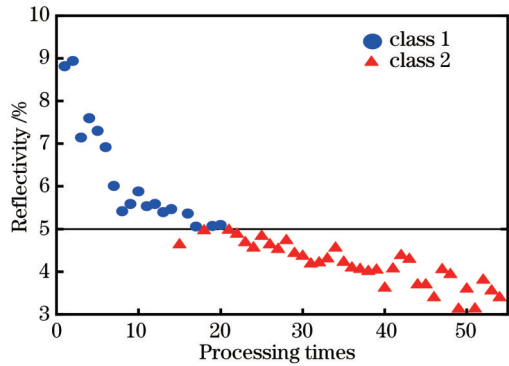


图 11 每个样本的反射率  
Fig. 11 Reflectivity for each sample

应用具有学习和分类能力的反向传播神经网络对加工质量进行预测和分类,如图 12 所示。在使用神经网络进行训练之前,首先需要确定训练和测试数据。将不同加工参数下采集到的声波信号的 4 个频谱峰值作为输入向量,根据样品反射率派生的两个类别作为目标值,每种加工参数下采集 10 组声波数据,共有 540 组数据可用于神经网络的训练。将所有数据的 70% 用于训练,15% 用于验证,15% 用于测试。在为神经网络准备好训练和测试数据后,下一步是为神经网络选择合适的结构并分配不同的参数。BP 神经网络的输入层由 4 个输入神经元组成,能够将 4 个频谱峰值作为输入。由于前文的实验初步证明了声波信号的参数与代表加工质量的反射率存在一定的线性关系,因此输入层后面的隐藏层仅由单层的 10 个神经元组成,以减少计算成本并避免过度训练。输出层由一个神经元组成,不同层之间使用 Sigmoid 函数作为传递函数,该函数可以将无限的输入映射到 [0:1]

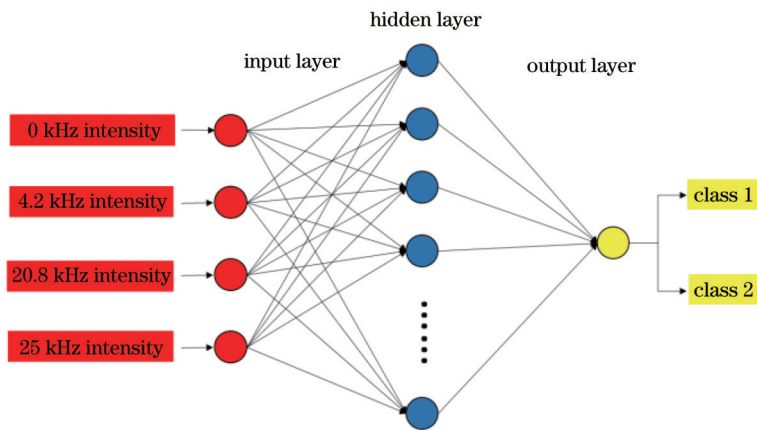


图 12 BP 神经网络的架构  
Fig. 12 Architecture of BP neural network



范围内的输出。将加工质量为 1 类的输出定义为 0, 2 类的输出定义为 1。每次训练设置为 100 个 epoch, 并根据每个 epoch 后的验证损失提前停止以避免过度拟合。整个训练是在 Matlab 上使用 Deep Learning Toolbox 完成的。

图 13 分别显示了用于训练、验证、测试数据分类

的混淆矩阵, 将预测结果与实验数据进行了比较。可以看出, 训练、验证和测试集的分类结果准确率均超过 90%。总而言之, 数据结果证明在机器学习的帮助下, 可以证明反射率与声波信号之间存在联系, 通过监测加工过程中产生的声波信号可以在一定程度上预测加工的质量。

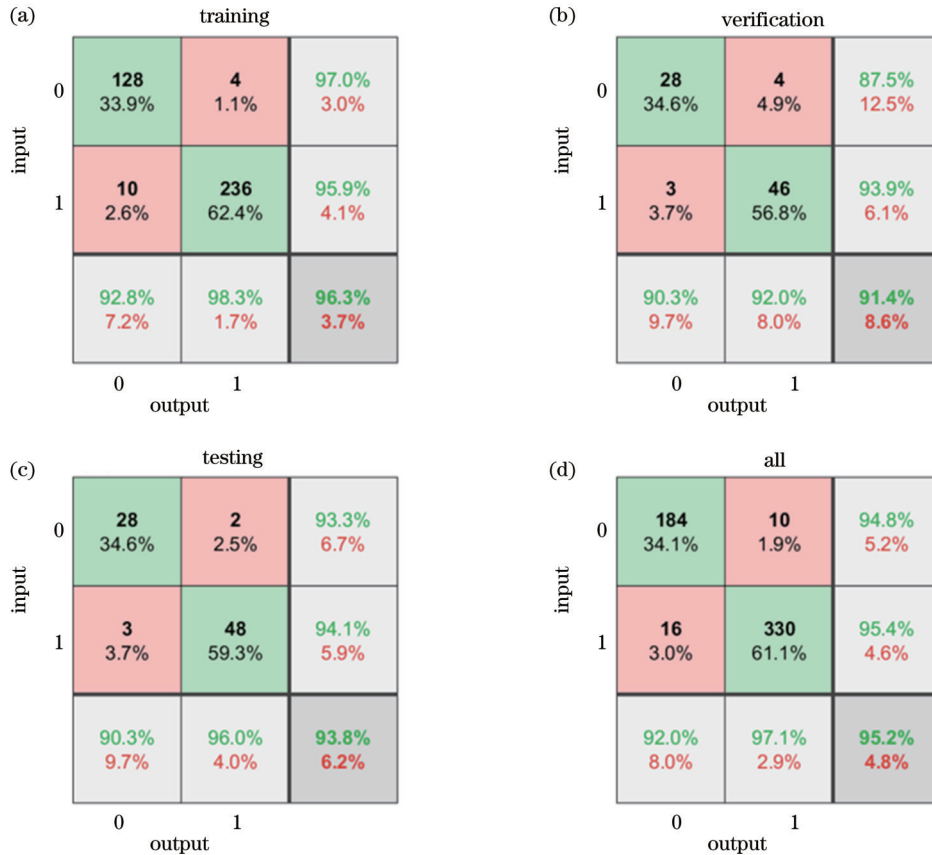


图 13 反射率分类的混淆矩阵。(a)训练集; (b)验证集; (c)测试集; (d)全部

Fig. 13 Confusion matrix for classification of reflectivity classification. (a) Training set; (b) verification set; (c) testing set; (d) all

## 4 结 论

将声波监测技术应用于纳秒激光烧蚀制备抗反射硅片过程, 对激光烧蚀过程产生的声波信号进行采样和分析。主要结论如下。

1) 根据激光烧蚀过程监测到的声波信号的频谱分析表明: 当激光烧蚀后的表面无明显微结构时, 0~30 kHz 频域范围内声波信号仅由 25 kHz 的主频成分组成; 而当烧蚀后的表面形成微结构时, 其对应的声波信号由多个频率组成。新出现的频率分量与表面微结构的宽度有关。

2) 当结构的宽度保持不变 (50  $\mu\text{m}$ ) 时, 与微结构相关的频率分量 (4.2 kHz、20.8 kHz) 也保持不变, 且此频率分量强度占总信号强度的比例与微结构的平均结构深度呈线性相关。

3) 选择将各频率分量的强度作为人工神经网络的输入, 根据样品的反射率对加工质量进行分类和预测,

分类结果的准确率均高于 90%, 证明了声波信号和加工质量间存在一定的相关性, 这为激光烧蚀制备抗反射硅片的实时质量监测提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Y P, Lai T, Li H L, et al. Nanostructure formation and passivation of large-area black silicon for solar cell applications [J]. *Small*, 2012, 8(9): 1392-1397.
- [2] Yang J, Luo F F, Kao T S, et al. Design and fabrication of broadband ultralow reflectivity black Si surfaces by laser micro/nanoprocessing [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(7): e185.
- [3] Said A J, Recht D, Sullivan J T, et al. Extended infrared photoresponse and gain in chalcogen-supersaturated silicon photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(7): 073503.
- [4] Meng W L, Zhong H, Hou W, et al. Comparison of different etching methods on the morphology and semiconductor characters of black silicon [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 250: 012015.
- [5] Deng Y L, Juang Y J. Black silicon SERS substrate: effect of surface morphology on SERS detection and application of single algal cell analysis [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2014, 53:

- 37-42.
- [6] Parmar V, Kanaujia P K, Bommali R K, et al. Efficient surface enhanced Raman scattering substrates from femtosecond laser based fabrication[J]. *Optical Materials*, 2017, 72: 86-90.
- [7] Phan T L, Yu W J. CVD-grown carbon nanotube branches on black silicon stems for ultrahigh absorbance in wide wavelength range[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 3441.
- [8] Steglich M, Kaesebier T, Schrepel F, et al. Self-organized, effective medium black silicon for infrared antireflection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 69: 218-221.
- [9] Zeng Y, Fan X, Chen J, et al. Preparation of composite micro/nano structure on the silicon surface by reactive ion etching: enhanced anti-reflective and hydrophobic properties[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2018, 117: 144-154.
- [10] Bottein T, Wood T, David T, et al. "black" titania coatings composed of sol-gel imprinted Mie resonators arrays[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(2): 1604924.
- [11] Zhang L X, Wei Q, Huang H H, et al. Formation and evolution of black silicon microcolumns with array distribution after IR nanosecond-pulsed laser ablation[J]. *Ferroelectrics*, 2018, 528(1): 51-57.
- [12] Liu W N, Zhang G J, Huang Y, et al. A novel monitoring method of nanosecond laser scribing float glass with acoustic emission[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022: 1-9.
- [13] Kacaras A, Bachle M, Schwabe M, et al. Acoustic emission-based characterization of focal position during ultra-short pulse laser ablation[J]. *Procedia CIRP*, 2019, 81: 270-275.
- [14] Verhoff B, Harilal S S, Freeman J R, et al. Dynamics of femto- and nanosecond laser ablation plumes investigated using optical emission spectroscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(9): 093303.
- [15] Kong F R, Ma J, Carlson B, et al. Real-time monitoring of laser welding of galvanized high strength steel in lap joint configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2186-2196.
- [16] Papanikolaou A, Tserevelakis G J, Melessanaki K, et al. Development of a hybrid photoacoustic and optical monitoring system for the study of laser ablation processes upon the removal of encrustation from stonework[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(2): 5-15.
- [17] De Keuster J, Duflou J R, Kruth J P. Monitoring of high-power CO<sub>2</sub> laser cutting by means of an acoustic microphone and photodiodes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 35(1): 115-126.
- [18] Grasso M, Demir A G, Previtali B, et al. *In situ* monitoring of selective laser melting of zinc powder via infrared imaging of the process plume[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 49: 229-239.
- [19] 尹国路, 徐州, 朱涛. 光纤形状传感器封装过程中残余应力的分布式实时监测[J]. *光学学报*, 2022, 42(16): 1606002.
- Yin G L, Xu Z, Zhu T. Distributed real-time monitoring of residual stress during packaging process of optical fiber shape sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(16): 1606002.
- [20] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. *Applied Physics A*, 1996, 63(2): 109-115.
- [21] Hoffmann A, Arnold W. Calculation and measurement of the ultrasonic signals generated by ablating material with a Q-switched pulse laser[J]. *Applied Surface Science*, 1996, 96/97/98: 71-75.
- [22] Lee S, Ahn S, Park C. Analysis of acoustic emission signals during laser spot welding of SS304 stainless steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(3): 700-707.
- [23] Stavridis J, Papacharalampopoulos A, Stavropoulos P. Quality assessment in laser welding: a critical review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5): 1825-1847.
- [24] Tserevelakis G J, Pozo-Antonio J S, Siozos P, et al. On-line photoacoustic monitoring of laser cleaning on stone: evaluation of cleaning effectiveness and detection of potential damage to the substrate[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2019, 35: 108-115.
- [25] Wu J J, Zhao J B, Qiao H C, et al. Acoustic wave detection of laser shock peening[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(9): 180016.
- [26] Eschner N, Weiser L, Häfner B, et al. Classification of specimen density in Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) using in-process structure-borne acoustic process emissions[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101324.
- [27] Xie X Z, Zhang Y, Huang Q, et al. Monitoring method for femtosecond laser modification of silicon carbide via acoustic emission techniques[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 290: 116990.
- [28] Huang W, Kovacevic R. A neural network and multiple regression method for the characterization of the depth of weld penetration in laser welding based on acoustic signatures[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011, 22(2): 131-143.
- [29] So S, Yang Y, Lee T, et al. On-demand design of spectrally sensitive multiband absorbers using an artificial neural network [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 153-158.
- [30] Bordatchev E V, Nikumb S K. Effect of focus position on informational properties of acoustic emission generated by laser-material interactions[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(3): 1122-1129.
- [31] Su Y, Zhan X P, Zang H W, et al. Direct and stand-off fabrication of black silicon with enhanced absorbance in the short-wavelength infrared region using femtosecond laser filament[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(11): 223.
- [32] Franta B, Pastor D, Gandhi H H, et al. Simultaneous high crystallinity and sub-bandgap optical absorptance in hyperdoped black silicon using nanosecond laser annealing[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(22): 225303.

# Acoustic Signal Monitoring in Laser Ablation of Anti-Reflective Microstructured Silicon Surface

Huang Weipeng<sup>1</sup>, Zhou Rui<sup>1,2\*</sup>, Chen Zhekun<sup>1</sup>, Yuan Gongfa<sup>1</sup>, Liao Qile<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Peng-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;*

<sup>2</sup>*Innovational Laboratory for Sciences and Technologies of Energy Materials of Fujian Province, Xiamen 361005, Fujian, China*

## Abstract

**Objective** Anti-reflective microstructured silicon surface could greatly improve the light trapping performance for silicon-based energy harvesting devices, thereby increasing the optical absorption efficiency and reducing the surface reflection. In the manufacturing of anti-reflective silicon surfaces, the thermal effect produced by laser ablation may lead to the collapse of microstructures with high aspect ratios, thus resulting in the rapid increase of reflectivity by seriously affecting the light trapping effect on microstructured silicon surfaces. Therefore, the microstructure characterization on silicon surfaces is of great significance for product quality and loss assessment of parts. Currently, offline methods including spectrometer or scanning electron microscopy (SEM) are widely employed. It needs to transfer the samples for observation after the preparation, and the fabricating process could not be optimized in time referring to processing results. To improve the quality of laser processing on anti-reflective silicon surfaces and shorten the optimization periods, researchers have proposed corresponding solutions via real-time monitoring. Laser ablation is often accompanied by the generation of acoustic, optical, electrical and thermal signals, and can be monitored based on a variety of sensors in real-time. Compared with other signals, acoustic signals exhibit excellent spatial resolution. At present, real-time monitoring technology based on acoustic signals is mostly adopted to monitor the changes in laser parameters or processing quality, while few studies focus on the forming of surface microstructures. Therefore, a real-time acoustic signal monitoring and processing method is put forward based on time-frequency domain processing to analyze the forming process of surface microstructures.

**Methods** In this paper, real-time monitoring of acoustic signals includes two steps of sampling and feature extraction. The acoustic signal is converted into electrical signal through a pre-polarized capacitive microphone with a frequency response range from 20 Hz to 31.5 kHz. Then, the electrical signal is collected by an oscilloscope at a sampling frequency of 240 kHz. The frequency composition of real-time signal and its intensity change with time could be obtained by MATLAB software for short-time Fourier transform and fast Fourier transform. The acoustic signal is normalized in the characteristic section, and the proportion of the amplitude in the frequency domain of the acoustic signal could be extracted as the characteristic parameter for analysis to improve the linearity between the characteristic parameters of the acoustic signal and the average depth of surface microstructures. Based on the sound source generation mechanism, the surface morphology of the silicon surface during laser ablation could be monitored by the time-frequency spectrum of the corresponding acoustic signal. An acoustic measurement method based on the fast Fourier transform is proposed to obtain the height and width of microstructures. The reflectivity of the sample is considered the evaluation standard of the sample processing quality, and the amplitude of each acoustic signal frequency is taken as the input. The artificial neural network is applied to predict the processing quality of the anti-reflective silicon surface.

**Results and Discussions** Firstly, the correlation between the acoustic signals in 0–30 kHz and characteristic sizes of the surface microstructure fabricated by laser ablation could be analyzed by the time-frequency spectrum of the acoustic signal. The acoustic signal generated during laser processing can reflect whether the ablated silicon surface forms periodic microstructure (Fig. 3), and the frequency composition of the acoustic signal could be tuned by microstructured width (Fig. 4). Then the effects of laser power and processing times on the microstructure depth are analyzed in detail, corresponding to the amplitude changes of each acoustic signal frequency. In the case of a fixed microstructure width, the normalized acoustic signal characteristic parameters change linearly with the microstructured depth, and the influence of laser power changes could be ignored (Fig. 10). Additionally, an artificial neural network is applied to forecast the processing quality by utilizing the acoustic signal as the input. The reflectivity of 5% on the silicon surface is defined as the processing quality boundary, and the actual measurement accuracy of processing quality prediction could exceed 90% via the artificial neural network. This indicates that the acoustic online monitoring can be employed to evaluate the surface processing quality of anti-reflective silicon surface in real-time (Fig. 13).

**Conclusions** The real-time acoustic signal analysis in this paper can effectively monitor the surface microstructure morphology and predict the machining quality. Results show that the acoustic signal with the same frequency could be always captured during laser processing, regardless of whether the microstructured surface exists or not. The acoustic signal frequency related to the microstructure could be influenced by the microstructure depth and laser scanning speed. The ratio of the frequency component intensity to the total signal intensity is linearly correlated to the average structural depth on microstructured silicon surfaces. The proposed method can effectively work even after partial structured collapse. The artificial neural network is adopted to verify the correlation between the acoustic signal and the machining quality. The accuracy of the classification prediction is higher than 90%. This study provides a theoretical basis for the real-time quality monitoring of anti-reflective silicon surfaces fabricated by laser ablation. In the future, more attention could be paid to the underlying mechanism and monitoring method of acoustic signal generation at the moment of microstructured collapse, which could be combined with other existing signal processing methods to yield better processing quality.

**Key words** surface optics; laser ablation; anti-reflective silicon surface; acoustic emission signal; real-time monitoring; artificial neural network