非晶硅太阳能电池高速激光划线实验研究

吴超唐霞辉秦应雄王炜王振

华中科技大学光学与电子信息学院,武汉 430074

摘要 用波长为 532 nm 的调 Q 倍频激光器作为光源,对非晶硅太阳能电池板进行高速激光划线实验。通过原子力显微镜对不同激光扫描速度下划线蚀刻深度、热影响区尺寸、切口倾角以及线能量密度等进行测量,分析了划线效果对电池效率的影响。结果表明,当扫描速度为 0.3 m/s 时,划线效果较理想。
关键词 激光技术;激光划线;非晶硅太阳能电池;划线表面微观形貌;开路电压;填充因子
中图分类号 TN249 文献标识码 A
doi: 10.3788/AOS201636.0914002

Research on High-Speed Laser Scribing of Amorphous Silicon Solar Cell

Wu Chao Tang Xiahui Qin Yingxiong Wang Wei Wang Zhen

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract With *Q*-switched frequency-doubled laser at the wavelength of 532 nm as light source, the experiment of high speed laser scribing on amorphous silicon solar cell panels is conducted. By atomic force microscope, the scribing kerf depth, heat-affected zone dimension, kerf angle, and line energy density are measured, and the influence of scribing result on the solar cell efficiency is analyzed. The results show that the scribing result is ideal at the scribing speed of 0.3 m/s.

Key words laser technique; laser scribing; amorphous silicon solar cell; scribing surface morphology; open-circuit voltage; filling factor

OCIS codes 140.3390; 140.7090; 140.6810; 160.6000

1引言

近年来,随着全球光伏产业的持续升温,硅系太阳能电池迎来了前所未有的发展。非晶硅(a-Si)太阳能 电池具有低污染、能量返还周期短等优点,成为未来太阳能电池发展的重要方向之一。

为了增加光谱吸收宽度,目前非晶硅太阳能电池普遍采用多叠层结构。该工艺通过使用直流磁控溅射、 射频等离子体化学气相沉积、直流脉冲溅射等技术,在基底材料上分别形成背电极层、氧化锌铝(AZO)接触 层、吸收层(非晶硅层)、氧化铟锡层(ITO)等多层结构。在这个过程中,需要用合适波长的激光^[1]对各层结 构进行划线分割,形成独立的内部电池单元,将这些独立的电池单元彼此串联、并联形成太阳能电池内联电 路结构。激光划线的质量直接影响电池的性能。

随着纳秒、皮秒、飞秒激光器在精细材料、高速加工领域应用的不断发展^[2-5],太阳能电池薄膜激光划线 技术成为研究的热点之一^[7-12]。García-Ballesteros 等^[13]研究了激光划线对 a-Si:H 层电气性能的影响。 Wang 等^[14]分析了多路纳秒激光划线对电池性能的改进。王继民等^[15]对层件激光划线的工艺进行了分析。

非晶硅太阳能电池的非晶硅层主要材质为非晶硅、微晶硅(µc-Si),其烧蚀阈值较低,在高速激光划线过

作者简介:吴 超(1984—),男,博士研究生,主要从事激光传输与数值算法方面的研究。

收稿日期: 2016-04-06; 收到修改稿日期: 2016-05-09

基金项目:高等学校博士学科点专项科研研究基金(20110142110046)

E-mail: wind0101880@126.com

导师简介:唐霞辉(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光器和激光加工方面的研究。 E-mail: txh1116@mail.hust.edu.cn(通讯联系人)

程中容易出现烧蚀、划线不均匀等现象,从而导致太阳能电池效率较低。针对这一问题,本文采用 532 nm 的调 Q 倍频激光器作为光源,对非晶硅太阳能电池板进行高速激光划线实验。采用原子力显微镜(AFM) 对划线结果的热影响区(HAZ)宽度、划线深度、划线切口倾角^[16]、线能量密度进行测量,给出了较全面的工 艺参数。结合划线的 AFM 测量结果,分析了不同划线结果对电池效率的影响。

2 实验方法

实验选择端面抽运的 532 nm 调 Q 激光器,激光器性能参数如表 1 所示。

表 1 532 nm 激光器的性能参数

Table 1 Performance parameters of 532 nm laser

Parameter	Content
Laser power /W	7/8/9
Maximum scanning speed /(mm/s)	2000
Laser pulse frequency /kHz	$10 \sim 200$
Pulse width at 50 kHz /ns	20
Pulse-pulse instability / %	<2
Divergence angle /µrad	< 10
Quality factor	<1.2
Spot diameter /mm	30~60
Spatial mode	$\mathrm{TEM}_{\scriptscriptstyle 00}$

划线实验采用 PIN 型非晶硅太阳能电池样板,尺寸为 100 mm×100 mm×1.8 mm。其结构原理及激 光划线工艺如图 1 所示,其中 ITO 层为导电减反层,P:µc-Si 层为 P 层微晶硅层,N:a-Si 层为 N 层非晶硅 层,I:a-SiGe 层为 I 层硅锗合金层,P:I:N (a-Si/µc-Si)为非晶硅层,AZO 为吸收层。



图 1 PIN 型非晶硅太阳能电池示意图。(a)电池层间结构;(b)激光划线工艺

Fig. 1 Schematic diagram of PIN amorphous silicon solar cell. (a) Cell interlayer structure; (b) laser scribing processing 图 2 所示为高速振镜聚焦系统,通过该系统对激光扫描速度进行控制。对实验样板进行高速划线实验,工作参数如表 2 所示。





化 做儿别找去擅工石箩奴	表 2	激光划线实验工艺参数	
--------------	-----	------------	--

Table 2 Processing parameters of laser scribing experiment

Parameter	Content
Wavelength /nm	532
Single-way laser power /W	0.75
Scanning speed /(m/s)	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,1
Laser pulse frequency /kHz	50

3 实验结果与分析

3.1 划线表面形貌

采用表 2 所示的参数进行激光划线实验,表 3 为 6 种扫描速度下的划线表面形貌。从表中可以看出,当 扫描速度为 0.1 m/s 时,划线连续,划线区边缘严重烧蚀,划线挂渣量较大,划线边界不明显;当扫描速度为 0.2 m/s时,划线连续性较好,划线的挂渣量明显减少,划线边缘较清晰;当扫描速度达到 0.3 m/s 时,划线的 烧蚀区域进一步减小,划线边缘更清晰;当扫描速度为 0.4 m/s 时,划线的边界依然明显,但划线出现不均匀 性;当扫描速度加快到 1 m/s 时,划线呈现单个点光斑的序列,划线出现明显断点。



图 3 不同扫描速度下的划线表面形貌。(a)0.1 m/s;(b)0.2 m/s;(c)0.3 m/s;(d)0.4 m/s;(e)0.5 m/s;(f)1 m/s Fig. 3 Surface morphology of scribed lines under different scanning speeds. (a) 0.1 m/s; (b) 0.2 m/s; (c) 0.3 m/s; (d) 0.4 m/s; (e) 0.5 m/s; (f) 1 m/s

3.2 划线 AFM 测量

由于非晶硅太阳能电池的层间采用内联式结构,为了分离独立电池单元,需要对非晶硅层划线。划线深 度需到达背电极层,使得背电极层与导电膜层形成导通,这样才能形成内部电池单元的串联结构。

利用 AFM 对划线结果进行观察测量的过程中,标尺的选择如图 4 所示,黄色标尺为选取的 AFM 测量 部分,选取范围为样品槽线的中心到槽线的边沿处。包含黄色标尺的蓝色标尺为实际 AFM 探针的扫描整 体区域。蓝色标尺右侧 1.932 µm 为扫描区域最小高度差,14.562 µm 为扫描区域的最大高度差。黄线标尺 部分的纵向高度差反映实际划线深度,其水平距离为热影响区宽度的一半,黄色标尺部分上下边界角度差反 映切口的倾角。

3.3 激光扫描速度对划线各工艺参数的影响

图 5 所示为不同扫描速度对划线质量参数的影响。激光划线的线能量密度 η_{line}可近似表示成

$$\eta_{\rm line} = \frac{E}{A} = \frac{P}{fvd},\tag{1}$$

式中E为单位脉冲能量,A为划线面积,P为脉冲平均功率,f为脉冲重复频率,v为激光扫描速度,d为光 斑直径。

当扫描速度为 0.1 m/s 时, 划线两侧边缘出现较为严重的烧蚀, 划线边界较为粗糙, 如图 4(a) 所示。此



图 4 不同扫描速度下的划线结果。(a)0.1 m/s;(b)0.2 m/s;(c)0.3 m/s;(d)0.4 m/s;(e)0.5 m/s;(f)1.0 m/s Fig. 4 Scribing results under different scanning speeds. (a) 0.1 m/s; (b) 0.2 m/s; (c) 0.3 m/s; (d) 0.4 m/s; (e) 0.5 m/s; (f) 1.0 m/s



图 5 各划线质量参数随扫描速度的变化。(a)划线深度;(b)划线热影响区宽度;(c)划线切口倾角;(d)线能量密度 Fig. 5 Variation of respective quality parameter of scribed lines with scanning speed. (a) Scribing depth; (b) HAZ width; (c) kerf angle; (d) line energy density

时划线能量密度最高为 231.81 μJ/cm²,划线深度最浅,其对应的热影响区宽度最宽,为 64.708 μm,如图 5(a)所示。这说明在低速加工条件下,光斑重叠导致单位面积内激光能量密度较大,划线附近材料熔化后形成熔渣,阻碍了激光热量向材料内的传导,热量在材料表面扩散,形成较宽的热影响区。

当扫描速度提高至 0.2 m/s 时,如图 5(b)所示,划线热影响区宽度明显变窄,而划线深度为所测结果中 最大值,为 13.766 μm。切口倾角也获得最大值[图 5(c)]。随着扫描速度的增加,在线能量密度并未明显降 低的条件下,由于热影响区减小,激光热量迅速传入材料内部,形成较深的划线。

当激光扫描速度达到 0.3 m/s 时,划线热影响区的宽度进一步减小,但划线深度明显变浅,如图 5(d)所示。随着扫描速度的增加,加工线能量密度明显降低,材料吸收的激光能量减少,划线切口斜角变小。

当扫描速度为 0.4 m/s 时,如图 5(d)所示,线能量密度出现明显的拐点。线能量密度与光斑大小成正 比,当线能量密度降低时,焦点的光斑直径减小,产生较窄的切缝;而光斑的直径大小与透镜的焦深成正比, 光斑越小,聚焦透镜的焦深越小。非晶硅层对 532 nm 激光波长较为敏感,在该区域线能量密度降低的情况 下,由于烧蚀现象的减弱,热量继续向划线内部传导。

当扫描速度增大到 0.5 m/s时,随着划线热影响区的减小,激光线能量密度有所提升。但光斑重叠部分

减少,导致热烧蚀效应减弱,划线深度变浅,切口倾角变小。当扫描速度提高到1m/s时,光斑不再重叠,激光划线开始出现不连续。

4 划线效果对电池质量的影响

非晶硅太阳能电池的转化效率 E_{ff}与其填充因子 F_F、开路电压 V_{oc}、短路电流 I_{sc}相关,可表示为

$$E_{\rm ff} = \frac{F_{\rm F} \cdot I_{\rm sc} \cdot V_{\rm oc}}{P_{\rm in}},\tag{2}$$

式中 P_{in}为太阳能电池正面光入射总辐射功率, F_F・V_{oc}・I_{sc}为太阳能电池的最大输出功率。 太阳能电池的开路电压一般描述为

$$V_{\rm oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{\rm L}}{I_{\rm o}} + 1 \right), \tag{3}$$

式中K为玻尔兹曼常数,T为温度,q为电荷量, I_{L} 为光电流, I_{o} 为暗电流(包括反向饱和电流 I_{r} 和薄膜层漏电流 I_{p})。在(3)式中,光电流 I_{L} 一般看作恒定值,则暗电流 I_{o} 越小,开路电压 V_{oc} 越大。

理想状态下电池的填充因子是关于开路电压 V。。的函数,根据经验公式可得

$$F_{\rm F} = \frac{V_{\rm oc} \cdot \ln(V_{\rm oc} + 0.72)}{V_{\rm oc} + 1},\tag{4}$$

开路电压越大,填充因子越接近理想值1。

电池的短路电流 I_{sc}与太阳能电池的串联电阻 R_s、并联电阻 R_{sh}有关:

$$I_{\rm sc} = I_{\rm L} / (1 + R_{\rm s} / R_{\rm sh}) \,. \tag{5}$$

由(2)~(5)式可知,串联电阻越小,并联电阻越大,暗电流越小,开路电压越大,太阳能电池的转化效率 就越大。



图 6 不同扫描速度下的三维划线形貌 AFM 图。(a)0.1 m/s;(b)0.2 m/s;(c)0.3 m/s;(d)0.4 m/s;(e)0.5 m/s;(f)1.0 m/s Fig. 6 AFM 3D images of scribed lines under different scanning speeds. (a) 0.1 m/s; (b) 0.2 m/s; (c) 0.3 m/s; (d) 0.4 m/s; (e) 0.5 m/s; (f) 1.0 m/s

图 6 所示为三维划线形貌 AFM 图。当激光扫描速度较低(0.1 m/s)时,划线表面的烧蚀现象较为严重,对非晶硅电池性能的影响主要表现在:划线表面被熔渣阻断,电池单元的窗口层无法形成独立的电极单元;非晶硅材料熔化再沉积过程中形成的杂质进入非晶硅层,改变了非晶硅层的 PN 结掺杂浓度,导致填充因子 F_F 和开路电压 V_{oc}的降低,进而降低了非晶硅层的转化效率。随着扫描速度的增加(0.2 m/s),热影响区宽度明显减小,激光热量传到材料内部,划线深度变深,当划线过深接触到玻璃层,电池单元短路,相当于减小了非晶硅层的有效导电面积,减少了串联电阻的数量,导致并联阻值 R_{sh}降低。当扫描速度继续增加(0.3 m/s)时,划线边缘处烧蚀效应减弱,划线深度抵达背金属层,此时划线效果最为理想。当扫描速度达到

0.4 m/s时,线能量密度出现明显的拐点,对划线参数的影响表现为热影响区宽度增加,划线深度不均匀,这 在图 6(c)、(d)的对比中可明显看出。划线深度的不均匀会增大薄膜层漏电流 *I*_p,从而导致开路电压 *V*_{oc}下降,填充因子 *F*_F浓度减少。当扫描速度进一步加大至 0.5 m/s 以上时,脉冲光斑分离,划线出现不连续性, 无法达到加工目的。由此可得出结论,当划线速度为 0.3 m/s 时,热影响区宽度和划线深度都较为均匀,划 线效果较好。

5 结 论

对非晶硅薄膜太阳能电池实验板进行不同线速度下的划线实验,观察了划线表面形貌在不同线速度下的变化情况。通过 AFM 对不同激光扫描速度下各划线结果的参量进行微观测量,结合非晶硅太阳能电池的机理,分析了不同激光扫描速度下的划线效果对非晶硅电池质量的影响。结果表明,当扫描速度为0.3 m/s时,划线效果较理想。

基于以上结论,后续将测量封装后非晶硅太阳能电池的工作参数,进一步研究不同激光扫描速度下划线 质量对电池性能的影响。

参考文献

- 1 Račiukaitis G, Grubinskas S, Gečys P, *et al*. Selectiveness of laser processing due to energy coupling localization: Case of thin film solar cell scribing[J]. Applied Physics A, 2013, 112(1): 93-98.
- 2 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1653-1659.

钟敏霖,刘文今.国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J].中国激光,2008,35(11):1653-1659.

- 3 Ji Lingfei, Ling Chen, Li Qiurui, et al. Research progress and development of industrial application of picosecond laser processing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 115-126.
- 季凌飞,凌 晨,李秋瑞,等.皮秒激光工程应用研究现状与发展分析[J].机械工程学报,2014,50(5):115-126.
- 4 Yang Huan, Huang Shan, Duan Jun, *et al*. Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103003.

杨 焕,黄 珊,段 军,等.飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究[J].中国激光,2013,40(1):0103003.

- 5 Yu X, Ma J, Lei S. Femtosecond laser scribing of Mo thin film on flexible substrate using axicon focused beam [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20: 349-355.
- 6 Compaan A D, Matulionis I, Nakade S. Laser scribing of polycrystalline thin films[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(1): 15-45.
- 7 Moon S J, Yum J H, Lofgren L, et al. Laser-scribing patterning for the production of organometallic halide perovskite solar modules[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2015, 5(4): 1087-1092.
- 8 Ruthe D, Zimmer K, Höche T. Etching of CuInSe₂ thin films-comparison of femtosecond and picosecond laser ablation [J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1): 447-452.
- 9 Gecys P, Raciukaitis G, Miltenis E, et al. Scribing of thin-film solar cells with picosecond laser pulses [J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 141-148.
- 10 Burn A, Muralt M, Pilz S, *et al*. All fiber laser scribing of Cu (In, Ga) Se₂ thin-film solar modules [J]. Physics Procedia, 2013, 41(1): 713-722.
- 11 Wang X, Ehrhardt M, Lorenz P, et al. The influence of the laser parameter on the electrical shunt resistance of scribed Cu (InGa) Se₂ solar cells by nested circular laser scribing technique [J]. Applied Surface Science, 2014, 302(13): 194-197.
- 12 Jiménez-Olarte D, Vigil-Galán O, de la Rosa J, *et al*. Laser scribing of fluorine doped tin oxide for serial interconnection of CdS/CdTe solar cells[J]. Revista Mexicana de Física, 2015, 61(3): 160-165.
- 13 García-Ballesteros J J, Torres I, Lauzurica S, *et al*. Influence of laser scribing in the electrical properties of a-Si: H thin film photovoltaic modules[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(3): 986-991.
- 14 Wang J, Wang H, Du J, *et al*. Performance improvement of amorphous silicon see-through solar modules with high transparency by the multi-line ns-laser scribing technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(11): 1206-1212.
- 15 Wang H L, Hsu S T, Tan H D, et al. Predictive modeling for glass-side laser scribing of thin film photovoltaic cells[J].

Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135(5): 919-933.

16 Chen Jimin, Zuo Tiechuan. Effect of laser beam incident angle on laser cutting quality[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(11): 1037-1040.

陈继民, 左铁钏. 激光切割中入射角对切割质量的影响[J]. 中国激光, 2001, 28(11): 1037-1040.