文章编号:1002-2082(2011)05-1016-06

一个非晶硅薄膜太阳能电池制备用激光刻线系统

肖光辉[1]，覃　海[1]，蓝　劾[1]，叶　健[1]，杨明生[1]，潘龙法[2]

(1. 东莞宏威数码机械有限公司 研发中心，广东 东莞 523018；
2. 清华大学 机械工程学院精密仪器与机械学系 光盘国家工程研究中心，北京 100084)

摘　要:非晶硅薄膜太阳能电池制备过程中的激光刻线工艺要求刻线宽度在 30 μm～50 μm 之间,死区范围小于 300 μm,刻线深度符合工艺要求。这不仅要求激光器具有较高的光束质量,而且要求光学系统具有较高的成像质量和较宽的焦深。设计了单激光器四分光路的激光刻线系统。采用设计的激光刻线装置,在 1 400 mm×1 100 mm×3.2 mm 玻璃基板上进行刻线试验,分别得到刻线 P1,P2,P3 的线宽为 35 μm,50 μm 和 45 μm,死区范围(P1 至 P3 的距离)为 287 μm,最终深度分别为 0.98 μm,0.24 μm 和 0.58 μm,刻线宽度和深度均符合薄膜太阳能电池制备工艺要求。

关键词:激光刻线系统;非晶硅薄膜太阳能电池;刻线

中图分类号: TN249; TM914.4　　**文献标志码**: A

Laser scribing system for a-Si thin film solar cell preparation

XIAO Guang-hui[1], QIN Hai[1], LAN He[1], YE Jian[1], YANG Ming-sheng[1], PAN Long-fa[2]

(1. R&D Center, Dongguan Anwell Digital Machinery, Co., Ltd., Dongguan 523018, China;
2. Optical Memory National Engineering Research Center, Department of Precision Instruments and Mechanology, School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The laser scribing process for a-Si (amorphous silicon) thin film solar cell preparation requires the line width of 30 μm～50 μm, the dead zone of less than 300 μm in size, and the compliance of line depth with the process requirements. Thus, the high beam quality of the laser is required, as well as the high imaging quality and wide focal depth of the optical system. A laser scribing system with a single laser and four-way light splitters was designed. With the designed laser scriber, a laser scribing test was done on a 1 400 mm×1 100 mm×3.2 mm glass substrate. The widths of the scribing lines P1, P2 and P3 were 35 μm, 50 μm and 45 μm, respectively, the dead zone (distance between P1 and P3) was 287 μm, and their final depths were 0.98 μm, 0.24 μm and 0.58 μm respectively. The results show that the widths and depths of the scribing lines meet the requirements of thin film solar cell preparation process.

Key words: laser scribing system; a-Si thin film solar cell; scribing line

引言

薄膜太阳能电池因制作工艺简单、生产成本低、光电转换效率较高、可连续自动化批量生产等优点受到业界青睐[1-2]。非晶硅薄膜太阳能电池制备过程中需要将膜层分割成独立的窄条,每个窄条对应一个独立的电池单元,然后将各电池单元串联成一个太阳能电池组件。具体的膜层分割方式有激光刻线、机械刻划和化学腐蚀等方式,激光刻线方式因其具有非接触式加工(不会对材料造成机械挤压或机械应力)、高效率、高精度、可精确

收稿日期:2011-01-17;　**修回日期**:2011-03-28
基金项目:广东省重点产业技术创新共建项目(200872206)
作者简介:肖光辉(1973－),男,湖南城步人,博士,主要从事光学系统设计、加工、检测与装调研究工作。
E-mail: ghxiao_freelance@163.com

地刻划出微米级的凹槽(使得膜层面积损失率小,利用率高)、可精确控制加工能量、整齐分割待加工膜层、不损伤导电层、无需使用任何化学品等优点而被业界广泛采用[3]。激光刻线装置是薄膜太阳能电池制备工艺中的一个重要设备,其设计和性能的好坏直接影响到太阳能电池的质量和生产过程中的良品率。早期的工艺中采用单激光器单光路的光学系统进行加工,目前在工艺上通常采用单激光器多光路的光学系统进行刻线,但也有采用多激光器多光路的结构型式。常见的单激光器多光路结构型式有单激光器二分光路和单激光器四分光路。四分光路系统刻线效率高,在工程应用上具有更高的使用价值,大多数刻线系统都采用这种结构型式。本文设计了一个单激光器四分光路的激光刻线系统,并将该光学系统在自行研制的刻膜机上进行了实验验证。

1　非晶硅薄膜太阳能电池结构和制备工艺

非晶硅薄膜太阳能电池是以玻璃、不锈钢或特种塑料为基板,镀以非晶硅薄膜的太阳能电池,如图1所示,其结构主要包括前电极、a-Si膜和背电极[4]。光照射电池板后,电池的光生电荷集中在前电极和背电极,这两层的电阻会显著降低电池的填充因子,因此前电极一般采用导电性好和透光系数高的TCO(透明导电氧化物)膜,如氧化锡(SnO)或铟锡氧化物(ITO),从而降低TCO层电阻,提高太阳能电池的填充因子[5-6];而背电极通常选用具有高导电系数的Al/ZnO作为沉积材料;a-Si膜层通常采用PECVD法在TCO层上进行沉积生成。

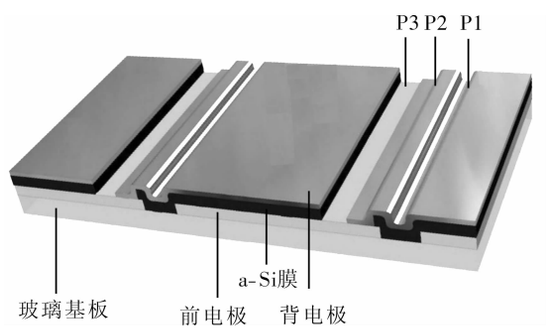


图1　非晶硅(a-Si)薄膜太阳能电池组件结构示意图

Fig. 1　Schematic structure of a-Si solar module

简单连续的镀膜虽然也能产生光生伏特作用,但面积较大的电池板如果不通过刻线分成若干个小单元,将会产生较大的电流,容易烧坏电池板或者加速电池板各膜层的老化,降低电池板的使用寿命。因此,每道镀膜工序完成后,必须对该膜层进行激光刻线。激光刻线通常使用激光器将膜层切割成宽约10 mm的独立窄条,再经后续镀膜实现层间互连,将各电池单元(又称子电池、电池片)串联起来。三道刻线工艺依次为激光刻线P1,P2和P3(图1)。整个制备工艺还需第四道激光刻线P4,用于清边和绝缘处理或整齐切割电池板外缘。太阳能电池组件上的所有电池单元用内部连接方式串联在一起,形成一个完整的太阳能电池,其输出电流为各电池单元的电流,输出电压为各电池单元的串联电压,从而降低了电池板的短路电流,增大了其开路电压。在实际应用中,可根据电流、电压的需要选择相应的结构型式和电池面积,制成实用的太阳能电池。

薄膜太阳能电池的制备工艺流程如图2所示。从图上可以看出,对于单结的薄膜太阳能电池,一般需镀3次膜,分别作为前电极、半导体和背电极。每次镀完膜之后都需要进行激光刻线,激光刻线工艺是根据激光诱导原理去除前道工序中已镀好的膜层,其目的是在激光作用下对材料进行去除加工,在膜层上切割出精细的沟槽,将膜层分割成独立的窄条,相应的膜层被分隔成独立的电气绝

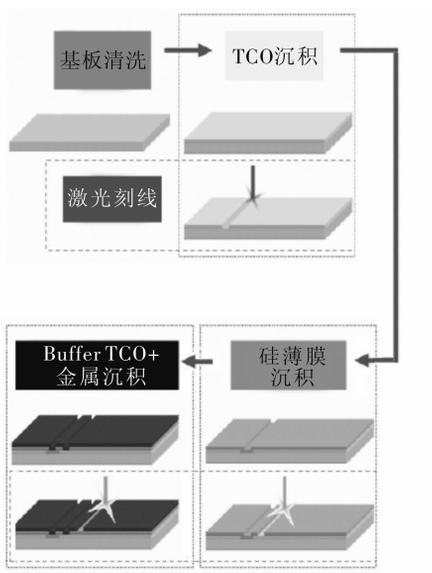


图2　薄膜太阳能电池制备工艺流程

Fig. 2　Processes of thin film solar cell preparation

缘区,从而激光束在这些电气绝缘区之间刻划出微米级精细的隔离通道(图3)。激光刻线过程中,选用特定波长的激光,选择性地刻蚀指定膜层,可以避免损伤其他膜层。最后一道激光刻线步骤

(P3)完成后,在一个电池单元的前电极与相邻电池单元的背电极之间将会形成一个电气导电连接(图 4)。在后面的工序中,刻划好的太阳能电池再经过清边、绝缘、退火、汇流、层压和测试,最后进行封装,完成太阳能电池组件的整个生产过程。

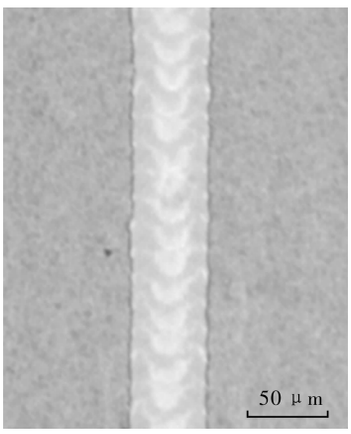


图 3　微米级精细的激光刻线

Fig. 3　Micron-size laser scribing line

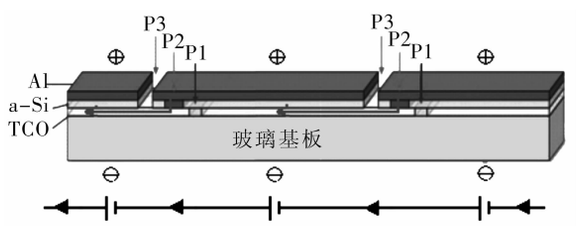


图 4　电气导电连接原理图

Fig. 4　Schematic of electric conductive connections

2　非晶硅薄膜太阳能电池激光刻线系统

根据非晶硅薄膜太阳能电池结构特征,要求激光刻线系统聚焦光斑直径小于 50 μm(对于圆光斑)或者边长小于 50 μm(对于方形光斑);由于玻璃厚度及所镀膜层厚度的不均匀性以及加工过程中基板或激光加工头的轻微振动将导致聚焦光斑相对于膜层发生径向漂移,因此要求光学系统具有一定的焦深,一般为 1 mm～2 mm;为了消除因激光器输出光束本身的特性而引起的聚焦光斑横向漂移,一般采用多块透镜组成的聚焦系统,而不采用单块透镜进行聚焦。

激光刻线系统由激光器、导光单元和聚焦单元组成,如图 5 所示。在图 5 中,导光单元由反射镜和分光镜组成,聚焦单元通常由凸透镜及其配件构成。为减少激光束的发散角以及扩展激光束的直径,通常在激光器和导光单元之间增设一个扩束镜,使扩束后的激光束平行性更好,经聚焦镜聚焦后的焦斑更小。要求刻线宽度约为 30 μm～50 μm,刻线平行度小于±10 μm,刻线边缘轮廓整齐划一,所以选用脉冲能量波动小的 TEM_{00} 模激光进行刻线。为保证在高重复频率下激光功率仍能高于材料的烧蚀阈值,对于 P1,激光工作脉宽应小于 50 ns,对于 P2 和 P3,工作脉宽应小于 30 ns。较高的光束质量和稳定的脉冲能量可以提高刻线质量,因此要求激光器的光束质量 $M^2<1.2$,脉冲不稳定性(RMS)小于 2%,光束发散角小于 1 mrad。为提高刻线效率,通常需要利用分光镜对激光器出射的激光光束进行分光,获得多路功率相等的激光光束,同时刻划多条刻线,一般均分为 2 路或 4 路功率相等的光束。

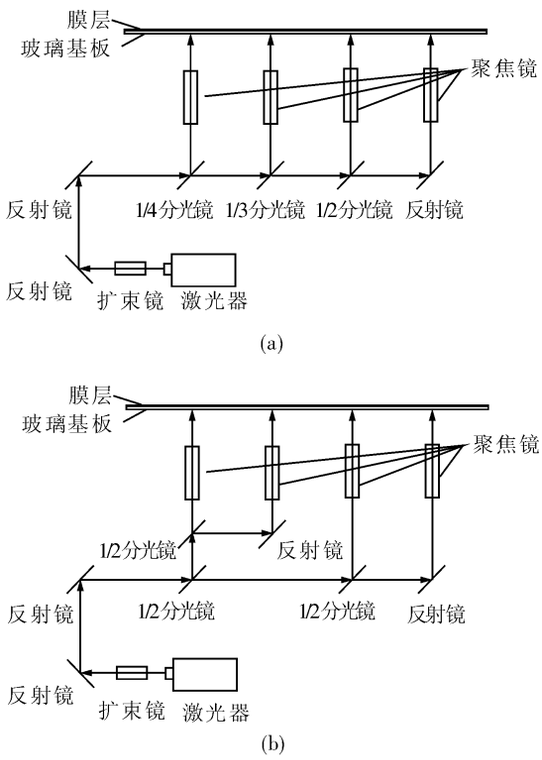


图 5　激光刻线系统示意图

Fig. 5　Schematic of laser scribing system

图 5 为将激光光束均分为 4 路光束的示意图,其中图 5(a)采用 1/4 分光镜、1/3 分光镜和1/2 分光镜进行分光,而图 5(b)中采用了 3 个 1/2 分光镜进行分光。如需进一步提高刻线效率,可采用 8 个聚焦单元或者 16 个聚焦单元同时进行刻线的光学系统,其光路结构将更加灵活,可有多种结构型式供客户选择。对于多路分光的结构型式,由于分光镜所镀的分光膜对入射激光光束的反射

率/透射率比值大致有±5%的偏差,所以经分光镜分光后的反射光束和透射光束的能量与设计时的理想状况存在一定差异,通常需要在光路中加入相应的光阑对光束进行限制,使各聚焦单元出射的激光光束能量相等。

3道激光刻线P1,P2和P3一般均采用高重复频率、高功率的调Q型激光二极管泵浦固体激光器(DPSS激光器)。P1工序通常采用输出波长为1 064 nm的Nd:YAG激光器,利用该波长激光的热效应刻划TCO膜层;P2和P3工序均采用输出波长为532 nm的Nd:YAG激光器,这是因为非晶硅对不同波长的光的吸收率不同,其吸收峰值约在500 nm左右,对波长为532 nm的绿激光有较高的吸收率。激光直接照射TCO膜层,将会产生显著的热影响,而且非晶硅膜层的烧蚀阈值比较低,激光直接照射膜层会引起非晶硅的熔化和再沉积,导致电池的填充因子和开路电压降低,因此激光都从玻璃一侧射入各膜层。以如图5所示的4路分光系统为例,对于P1,单路激光的平均功率为4 W～10 W;对于P2和P3,单路激光的功率约为0.5 W～1 W。刻划速度一般为1 m/s～2 m/s。为减少刻划光斑的重叠,进一步提高刻划速度,可以通过光束整形将激光光束整形为平顶光束,将圆形光斑整形为方形光斑。

选用可调的2X～10X扩束器,保证扩束器的入射光斑直径不小于3 mm。选用直径为25.4 mm的反射镜和分光镜。对于各分光路,保证进入聚焦单元的光束直径为8 mm;选用直径均为25.4 mm的透镜组成聚焦单元。聚焦单元所选透镜均为某光学公司的标准件,材质为BK7光学玻璃,其参数如表1所示。

表1　聚焦单元各透镜参数

Table 1　Parameters of each lens of focusing unit

编号	名称	焦距/mm	后截距/mm	中心厚度/mm	边缘厚度/mm
1	平凹透镜	−50.8	−52.8	3	6.3
2	平凸透镜	75	71.7	5	2.9
3	平凸透镜	150	147.4	4	3

聚焦单元结构如图6所示。表2列出了各透镜之间的位置关系,从表中可以看出,聚焦单元的后截距为123.095 mm,在入射激光直径为8 mm时,可获得200 mm左右的后截距,符合工艺设计要求;根据焦深计算公式,可得到该聚焦单元的焦深为±1.87 mm。图7表示在该位置关系下的点列图。从图中可以看出,经该聚焦单元获得的聚焦光斑直径可小于30 μm。

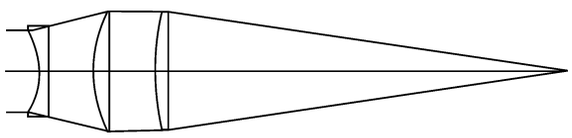


图6　聚焦单元结构示意图

Fig. 6　Schematic of focusing unit

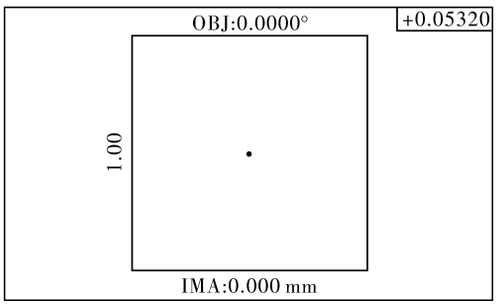


图7　点列图

Fig. 7　Spot diagram

表2　聚焦单元各透镜参数

Table 2　Parameters of each lens of focusing unit

面	形	半径/mm	厚度/mm	玻璃	半口径/mm	二次曲线
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000 000	0
STO	Standard	Infinity	10.00		12.700 000	0
2	Standard	−27.282 633	3.00	BK7	12.700 000	0
3 *	Standard	Infinity	13.90		13.771 235	0
4 *	Standard	41.180 617	5.00	BK7	18.757 960	0
5 *	Standard	Infinity	14.00		18.750 956	0
6 *	Standard	78.099 488	4.00	BK7	18.391 629	0
7 *	Standard	Infinity	123.095		18.217 045	0
IMA	Standard	Infinity			0.000 003	0

3　工艺验证

在自行研制的薄膜太阳能电池激光刻膜机上,利用上述激光刻线系统进行膜层刻划,对整个刻线系统进行工艺验证。要求:刻线宽度在 30 μm～50 μm 之间,死区范围小于 300 μm,刻线深度符合工艺要求,即 P1 刻穿前电极 TCO 膜层,P2 刻穿 a-Si 膜层但不伤及 TCO 膜层,P3 同时刻穿 a-Si 膜层和背电极 Al/ZnO 膜层但不伤及 TCO 膜层。

激光器选用两种不同波长和型号的激光器,其性能特性如表 3 所示。

表 3　激光器特性参数

Table 3　Characteristic parameters of diode-pumped TEM_{00} mode solid-state lasers

	激光器 1	激光器 2
波长/nm	1 064	532
平均功率/W	40	9
脉冲重复频率	单脉冲,300 kHz	单脉冲,300 kHz
M^2	<1.3	<1.2
脉宽/ns	<15 ns@20 K <40 ns@100 K	<10 ns@20 K <40 ns@100 K
脉冲能量/μJ@20 kHz	>1.2 mJ	>300 μJ
脉冲不稳定性 (RMS)	<2%	<2%
功率不稳定性	<3% (大于 12 h)	<3% (大于 12 h)
发散角/mrad	0.9	0.9
光斑直径/mm	1.8	1.8
偏振方向	水平	垂直
偏振度	>100:1	>100:1
冷却方式	水冷	空冷

各激光器的工作参数如表 4 所示,表中激光器 1 用于 P1,激光器 2 和 3 用于 P2 和 P3。

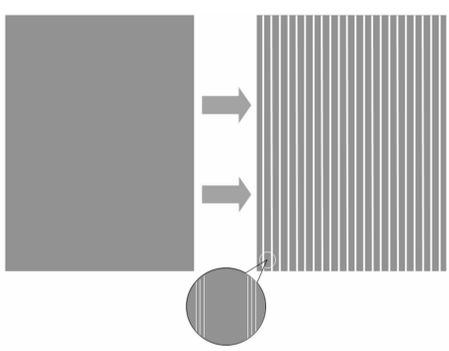
表 4　1 064 nm/532 nm DPSS 激光器工作参数

Table 4　Working parameters of 1 064 nm/532 nm DPSS lasers

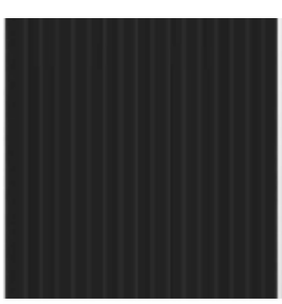
激光器	波长/nm	单路激光功率/W	脉冲重复频率/kHz	刻线速度/$m \cdot s^{-1}$	刻线加速度/$m \cdot s^{-2}$
激光器 1	1 064	8	70	1.2	13
激光器 2 (3)	532	0.5	30	1.5	13

玻璃基板尺寸为 1 400 mm×1 100 mm,厚约 3.2 mm。先在玻璃基板上镀上 TCO 膜,这道工序一般由玻璃基板生产厂商完成。在生产线上,只需清洁基板即可直接进行第一道激光刻线 P1。P1 刻线完成后,进入 PECVD 工序,在 TCO 膜上镀上非晶硅膜层(a-Si),然后进行第二道激光刻线 P2。非晶硅膜层的均匀性对 P2 刻线质量有显著影响,可以通过提高膜层均匀性来克服该影响,也可以通过在光路中增设一套自动调焦装置,来减少膜层均匀性及玻璃基板微小颤动对刻线质量的影响,以保证 P2 刻线工序中能刻穿非晶硅膜层但不伤及到 TCO 膜层。P2 刻线完成之后,再在 a-Si 膜层上镀上背电极膜层(通常为 Al 膜),然后进行第三道刻线 P3,采用与 P2 大致相同的工艺参数,将非晶硅膜层和 Al 膜层同时刻穿且不伤及到 TCO 膜。P1,P2,P3 分别在 3 台刻膜机上进行,刻线过程中,玻璃基板在 X 轴方向往复运动,激光刻线装置则在 Y 轴方向根据工艺参数要求微动,各聚焦单元每刻划完一道刻线后,激光刻线装置微动一定距离。

自行研制的刻膜机刻线质量高、结构紧凑、占地面积小、工作稳定可靠、效率高,刻划一块 1 400 mm×1 100 mm 的电池板仅需 60 s 左右。基板经过上述工艺后,完成非晶硅薄膜太阳能电池的 3 道激光刻线,得到如图 8 所示的太阳能电池板,其中图 8(a)为激光刻线原理图,图 8(b)为激光刻线后的太阳能电池板实物图。



(a)



(b)

图 8　激光刻线后的非晶硅薄膜太阳能电池

Fig. 8　A-Si thin film solar cell after scribing

在显微镜下观察电池板上的刻线(如图 9),测量得到 P1 刻线宽度为 35 μm,P2 刻线宽度为 50 μm,P3 刻线宽度为 45 μm。然后用台阶仪测量各刻线的深度,得到如图 10 所示的测量结果,从图上可清晰看出激光刻线工艺完成之后 3 道刻线的相对深度,其中 P1 刻线的最终深度最大,约为 0.98 μm,P2 刻线的深度最小,约为 0.24 μm,而 P3 刻线的最终深度约为 0.58 μm。图 10 中的 P1 刻线宽度仅为 35 μm,然后再经过非晶硅和铝 2 次镀膜,所以刻痕看起来特别陡峭。

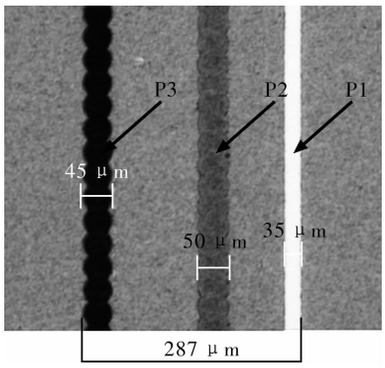


图 9　刻线宽度

Fig. 9　Widths of scribing lines

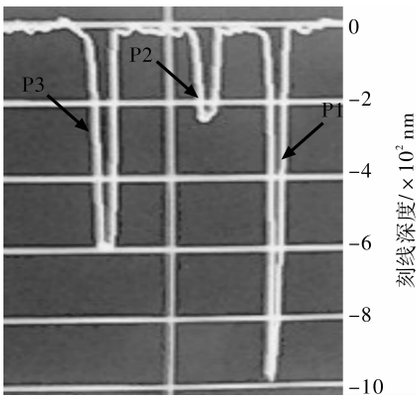


图 10　刻线深度

Fig. 10　Depths of scribing lines

分别采用图 5(a)和图 5(b)所示的 2 个光学系统进行刻线,得到了大致相同的刻线质量。

4　结论

刻线质量是影响非晶硅薄膜太阳能电池性能的一个重要因素。采用本文设计的单激光器四分光路的激光刻线系统,在 1 400 mm×1 100 mm×3.2 mm玻璃基板上进行刻线试验,分别得到刻线 P1,P2,P3 的线宽为 35 μm,50 μm,45 μm,死区范围(P1 至 P3 的距离)为 287 μm。用台阶仪测量刻线的深度,得到刻线 P1,P2,P3 的最终深度分别约为 0.98 μm,0.24 μm 和 0.58 μm。刻线宽度和深度以及死区范围均符合工艺要求。采用该激光刻线装置可获得高质量的刻线,该光学系统完全能满足非晶硅薄膜太阳能电池制备的激光刻线要求。

致谢:在激光刻线系统的验证试验过程中,得到了河南新能光伏有限公司和东莞彩显有机发光科技有限公司相关技术人员的大力支持,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 薛俊明,麦耀华,赵颖,等. 薄膜非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的研究[J]. 太阳能学报,2005,26(2):166-169.
XUE Jun-ming, MAI Yao-hua, ZHAO Ying, et al. Investigation on a-Si/uc-Si tandem solar cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2005, 26(2): 166-169. (in Chinese with an English abstract)

[2] 钟迪生. 硅薄膜太阳能电池研究的进展[J]. 应用光学,2001,22(3):34-40.
ZHONG Di-sheng. Research progress in solar Si thin films[J]. Journal of Applied Optics, 2001, 22(3): 34-40. (in Chinese with an English abstract)

[3] SHAH A V, SCHADE H, VANECEK M, et al. Thin-film silicon solar cell technology[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2004, 12(2/3): 113-142.

[4] 章诗,王小平,王丽军,等. 薄膜太阳能电池的研究进展[J]. 材料导报,2010,24(5):126-131.
ZHANG Shi, WANG Xiao-ping, WANG Li-jun, et al. Research progress in thin film solar cells[J]. Materials Review, 2010, 24(5): 126-131. (in Chinese with an English abstract)

[5] PERNET P, GOETZ M, NIQUILL X, et al. Front contact and series connection problems of a-Si:H solar cells on polymer film substrates[C]. Switzerland: Proceedings of the 2nd World Conference Photovoltaic Energy Conversion, 1998: 976-979.

[6] 王颂锋,殷志刚. 非晶硅太阳能电池效率衰减机制的分析[J]. 新能源,1997,19(5):35-37.
WANG Song-feng, YIN Zhi-gang. Analysis on the mechanism of efficiency degradation of amorphous silicon solar cell array[J]. New Energy, 1997, 19(5): 35-37. (in Chinese with an English abstract)