

文章编号 1004-924X(2011)03-0628-07

# 薄膜与小组件太阳能电池特性参数测试系统的研制

王志明, 龚振邦, 魏光普

(上海大学 机械电子工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 为了快速、精确地测量薄膜与小组件太阳能电池的光电特性参数, 建立了太阳能电池测试系统, 研究了测试系统的控制模式与测试精度。选取 DSP 芯片 TMS320LF2407 为主控芯片, 采用模块化与总线结构的设计思路, 使系统具有较快的响应性与扩展性。运用高精度运算放大器电子元件, 研制了程控电子负载, 可精确测量太阳能电池的短路电流与开路电压。采用多路电子开关、多路继电器与精密电阻组合设计, 实现了太阳能电池光电参数的分档测试, 使系统可适用于多规格、多品种薄膜与小组件太阳能电池的特性参数测量。实验结果表明: 系统能在短路电流 3 mA~5.6 A, 开路电压 0.5~20 V 内实现自动分档测试, 开路电压的最大相对误差  $< 0.4\%$ , 短路电流的最大相对误差  $< 0.8\%$ , 很好地满足了薄膜与小组件太阳能电池精确测量的需要。

**关键词:** 薄膜太阳能电池; 小组件太阳能电池; 开路电压; 短路电流

中图分类号: TM914.42 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111903.0628

## Test system for photoelectric characteristic parameters of thin film and module solar cells

WANG Zhi-ming, GONG Zhen-bang, WEI Guang-pu

(School of Mechatronics and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A test system was established to test the photoelectric characteristic parameters of thin film and module solar cells rapidly and accurately, and the control mode and test accuracy of the test system were studied. By taking the DSP chip TMS320LF2407 as the main chip, the modular and bus structures as the design idea, the obtained system show a faster response and a good scalability. With the applications of high precision operational amplifiers and other electronic components, a program-controlled electronic load was developed, so that the short-circuit currents and open-circuit voltages of the solar cells can be measured accurately. Furthermore, the multi-channel electronic switches, relays and precision resistors were combined to realize an adaptive test, and the photoelectric characteristic parameters of different thin film and module solar cells were measured accurately. The experiment results show that the test system can complete the adaptive test while the short-circuit current is in the range of 3 mA to 5.6 A and the open-circuit voltage is from 0 V to 50 V. The relative error is less than 0.6% for the measurement of open-circuit voltage and 0.8% for the measurement of short-circuit

收稿日期: 2010-07-19; 修订日期: 2010-11-06.

基金项目: 上海市重大科技攻关资助项目 (No. 03DZ12033)

current, respectively. This result satisfies the demands of solar cell test.

**Key words:** thin film solar cell; small module solar cell; open-circuit voltage; short-circuit current

## 1 引言

太阳能电池是将阳光直接转化为电能的半导体器件,太阳能电池组件是将单体太阳能电池组合起来,将光能转化为电能供日常生活使用的器件,市场前景十分广阔。薄膜太阳能电池是指半导体层只有几微米至十几微米的太阳能电池,由于半导体层薄,所以需要玻璃或高分子薄膜等作为基板,其制造成本低,性价比优良,薄膜太阳能电池已经成功地运用到各个领域,是未来太阳能电池的发展方向。与一般太阳能电池相比,薄膜太阳能电池的开路电压比较大,并且两个电极通常都在背面,现役的单体太阳能电池测试仪都不适用,因此,研发新型的薄膜太阳能电池测试仪很有必要。由于小组件太阳能电池与薄膜太阳能电池的结构相似,其测试电极亦均在背面,所以在设计测试电路时考虑了将薄膜太阳能电池的测试范围延伸到小组件太阳能电池。

在对薄膜太阳能电池与小组件太阳能电池质量控制的过程中,必须检测太阳能电池的短路电流、最佳工作点电压、最佳工作点电流、最佳工作点功率、填充因子、转换效率、开路电压等参数,并要绘制  $I-V$  特性曲线,进而检定太阳能电池的性能,而且不同规格的太阳能电池其特性参数也不同<sup>[1]</sup>。在这些参数中,能够直接进行测量的只有太阳能电池两端的电压与回路中的电流,即太阳能电池的伏安特性。通常,太阳能电池的伏安特性测量采用四线制方式进行,其两端的两线用来测量太阳能电池的电压,另外两线与可变电阻  $R$  串联成回路。改变可变电阻  $R$  的阻值,即可以改变太阳能电池两端的电压以及通过的电流。连续调节可变电阻的阻值,并对太阳能电池的电压、电流进行测量,即可绘出其伏安特性曲线<sup>[2]</sup>。

测试系统在自动测量时要求系统能够自动调节负载电阻,由于滑线变阻器阻值的分辨力低,且阻值会因为接触不良或发热而变化,所以在测试系统中应用价值不高。美国科罗拉多州的太阳能研究所、国际 Renewable 能源实验室等均研制电子负载来代替滑线变阻器<sup>[3]</sup>,国内的上海交通大学,西安交通大学等也开发了嵌位式电子负载,取

得了较大的进展。

对于单体薄膜与小组件的太阳能电池来说,规格多、品种多,太阳能电池的开路电压与短路电流的变化范围较大,其开路电压为  $0\sim 50\text{ V}$ ,短路电流为  $0\sim 5.6\text{ A}$ ,这些因素使薄膜与小组件太阳能电池测试系统在测试精度的一致性方面很难保证。目前,国内外对薄膜与小组件的精确测量,特别是对薄膜太阳能电池的精确测量尚未见详细报道。

本文引入了一种基于 DSP 芯片 TMS320LF2407 的测试系统,采用模块化与总线结构的设计思路,使得系统具有灵敏的实时响应性与较好的扩展功能。通过完善的设计与高精度运算放大器等电子元件的应用,研制了性能优越的程控电子负载,实现了对短路电流与开路电压的精确测量,采用多路电子开关、多路继电器与精密电阻的有效结合,完成了太阳能电池特性参数的分档测试,使得多品种、多量程薄膜与小组件太阳能电池的精确测量成为可能。

## 2 测试系统的总体设计

分析测试系统的结构,将系统分成 7 个模块,分别是太阳光模拟器控制模块、温度测量模块、USB 接口模块、微机接口模块、光强测试模块、程控电子负载模块、DSP 最小系统。这 7 个模块通过总线进行连接。

在这些模块中,DSP 最小系统、太阳光模拟器控制模块与程控电子负载模块为关键模块。太阳光模拟器采用本课题组研发的 SU-II 双光反馈太阳光模拟器,不仅光强均匀且光源的利用率高,可实现实时闭环控制。通过对光强的实时测量,不断地控制放电电流与放电时间,进而获得稳定强度与均匀度的光源。DSP 系统在控制中充分起到实时性强、响应速度快的作用<sup>[4]</sup>。

### 2.1 DSP 最小系统

DSP 最小系统是系统的核心,系统中采用 TI 公司的 TMS320LF2407,组成框图如图 1 所示。TMS320LF2407 本身具有 A/D 模块,系统可直接调用 LF2407 的 A/D 模块。测试系统的太阳能电池模拟器的控制通过 LF2407 的 I/O 模块与 A/D

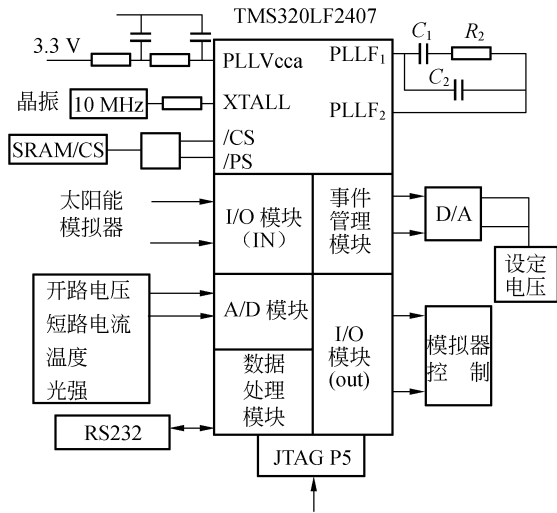


图 1 DSP 最小系统组成图

Fig. 1 Structure of DSP least system

模块来实现。温度、开路电压、短路电流、光强等参数通过 LF2407 的 A/D 模块来采集。图中, SRAM 为片外存储器, CS 为片选, TMS320LF2407 上的 DS 与 PS 与其相连, 即 SRAM 为 DSP 芯片的外接存储器。JTAG 为开发口, 开发时, 运行程序通过 JTAG 口下载 SRAM 中, 将芯片上的 MP/MC 与 ACC 相连, 系统就会执行开发程序。开发完成后, 程序通过 JTAG 下载到片内的 FLASH 中, MP/MC 跳线到 GND, 系统开始运行程序。LF2407 内嵌 CAN 总线, 将 LF2407 的 CAN 模块的引脚 CANRX (接收信息) 与 CANTX (发送信息) 通过光耦器件 6N139 连接到发射器 82C250, 而收发器 82C250 再通过两个引脚 CANH 和 CANL 与 CAN 总线相连, 实现 LF2407 与 CAN 之间的通信。系统总线的接口实现模拟量与数字量的双向传递。模拟量的连接主要将 DSP 的 A/D 模块通过缓冲器连接到总线的模拟信号上, 数字部分把 DSP 的数据总线、控制总线与部分的 GPIO (输入输出引脚) 通过双向电平转换芯片 SN7LVCVC4245 与系统总线进行连接, 实现总线上的 5 V 电平与 DSP 最小系统的 3.3 V 电平的转换<sup>[5-6]</sup>。

## 2.2 程控电子负载

程控电子负载模块也是测试系统的关键, 程控电子负载由补偿电源、被测太阳电池、VMOS 管、采样电阻、电压跟随电路、电压采样电路等组成, 其控制原理如图 2 所示。

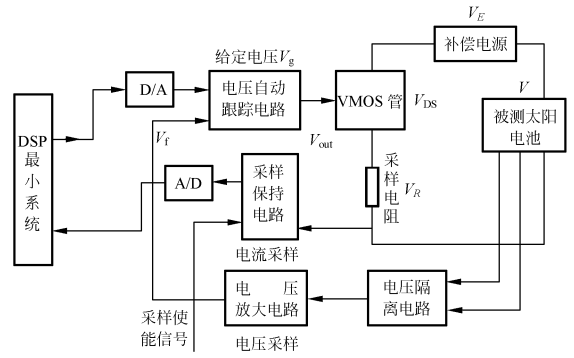


图 2 程控电子负载原理图

Fig. 2 Test system of program-control electronic load

被测太阳电池两端的电压为  $V = V_{DS} + V_R - V_E$ , 调节 VMOS 管基极电压, 改变  $V_{DS}$  大小, 使  $V = V_{DS} + V_R - V_E = 0$ , 这时流过采样电阻的电流为真实的短路电流<sup>[7]</sup>。

程控原理: 该电路为电压自动跟踪电路, 其主要部分是时间常数较小的自动调节器。如果要测量伏安特性曲线上电压为  $V_P$  时对应的电流  $I_P$ , 首先根据  $V_P$  的大小通过 D/A 转换器送出和  $V_P$  值大小成比例为  $K$  的模拟量至电压自动跟踪电路, 即电压给定输入端  $V_g = V_P$ 。被测太阳电池两端电压经过隔离放大  $K$  倍后反馈至电压自动跟踪电路另一端  $V_i$ , 电压自动跟踪电路根据自动调节原理自动调节输出电压  $V_{out}$  的大小,  $V_{out}$  的大小正比于  $(V_g - V_i)t = (KV_P - KV)Vt$ , 其中  $t$  为调节时间。  $V_{out}$  直接加到 VMOS 管的基极, 控制流过 VMOS 管的电流, 同时也改变  $V_{DS}$  与  $V$ , 当  $V = V_P$  时, 自动调节过程结束, 取得的流过取样电阻的电流值为  $I_P$ 。

## 3 薄膜与小组件太阳电池测试系统关键电路的设计

### 3.1 程控电子负载的电路设计

研制的太阳电池测试系统可以自动完成太阳电池伏安特性的测试, 从而计算出其余的光电参数, 能自动适应多规格、多品种薄膜与小组件太阳电池的测试。图 3 是测试系统的原理框图。其中, 程控电子负载是其中的关键, 其主要任务是不断改变加载在 VMOS 管基极上的电压, 进而进行

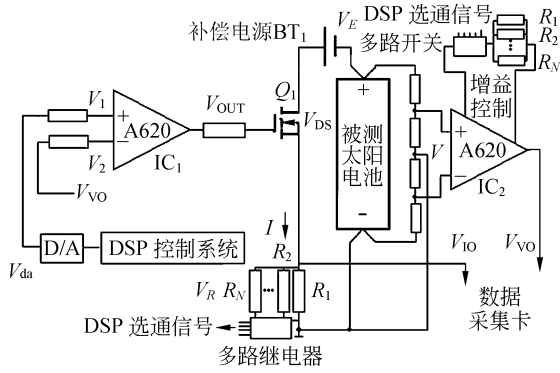
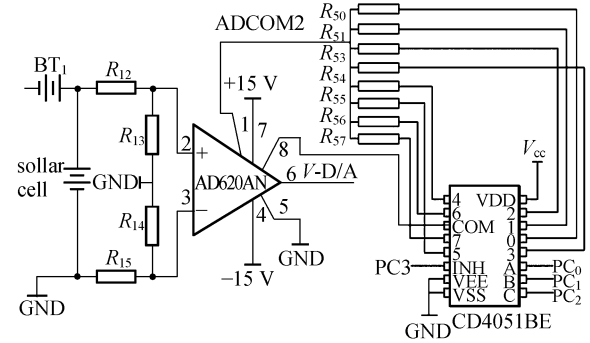


图 3 太阳电池测试系统示意图  
Fig. 3 Test system of solar cell

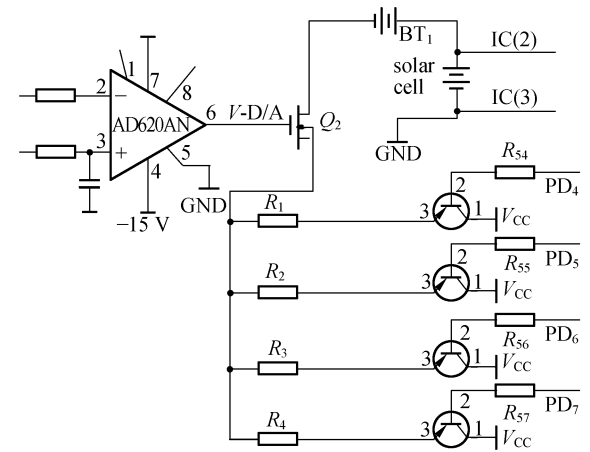
伏安特性的测量。它由 DSP 最小系统、数字输出卡、D/A 模块、IC<sub>1</sub>、VMOS 管 Q<sub>1</sub>、采样电阻 R、补偿电源 BT<sub>1</sub>、被测太阳电池等组成。其中 IC<sub>1</sub> (AD620N)、VMOS 管 Q<sub>1</sub>、采样电阻 R、补偿电源 BT<sub>1</sub>、被测太阳电池等组成了电压跟随器。当 IC<sub>1</sub> 输入两端产生压差时, 运放 IC<sub>1</sub> 有输出, 驱动 VMOS 管, 使 VMOS 管两端的电压 V<sub>DS</sub> 产生变化。IC<sub>1</sub> 的 V<sup>+</sup> 端输入的是单片机给定的电压, V<sup>-</sup> 端输入的是被测太阳电池两端的电压。根据图 4 可得到如下电压表示式:  $V = V_{DS} + V_R - V_E$ , 其中 V<sub>E</sub> 为恒定值。系统运行时, 由运算放大器的原理可知, 线路中的电压最终将调整到  $V^+ = V^-$ 。对于短路电流的测量, 必须要在太阳电池两端电压为 0V 的条件下获得, 即通过调整 VMOS 管栅极电压 V<sub>out</sub>, 改变 V<sub>DS</sub> 的大小, 使得  $V = V_{DS} + V_R - V_E = 0$ 。这时, 经过采样电阻测得的电流值才是真正的短路电流。系统中采用精密运算放大器 AD620AN 提高输出电压的参考值 (在 AD620AN 的 5 脚可接参考电压, ) 当 IC<sub>1</sub> 的 V<sup>+</sup> 端输入的电压为 0 V 时, 根据运算放大器的特性, V<sup>-</sup> 端 (太阳电池两端的电压) 也会跟随到 0 V, 由于 AD620AN 提高了参考电压, 即使在输入为 0 V 电压的情况下, AD620AN 也有足够高的电压驱动 VMOS 管 Q<sub>1</sub>, 即 VMOS 管也有 V<sub>DA</sub> 输出。这样使得在太阳电池两端电压差为零的情况下, VMOS 管 Q<sub>1</sub> 也有电压 V<sub>DS</sub> 输出。从而使得  $V = V_{DS} + V_R - V_E = 0$ 。于是保证了电流采样电阻上流过的电流为真实的短路电流值。

### 3.2 电压采样电路设计

电压采样电路主要由电子多路开关 CD4501、精密放大器 AD620AN 和多路精密电阻等组成, 其电路原理图如图 4(a) 所示。



(a) 电压采样电路  
(a) Voltage test circuit



(b) 电流采样电路  
(b) Current test circuit

图 4 电压和电流采样测试电路

Fig. 4 Test circuits for voltage and current

被测太阳电池两端的输出连接精密运算放大器 AD620AN 的输入引脚 2 脚和 3 脚, AD620AN 的 6 脚输出到 A/D 转换芯片的模拟输入端, 通过 A/D 转换, 由计算机采集。AD620AN 的 4 脚和 7 脚接 ±15 V 电源, 5 脚接地作为 6 脚的参考基准, 1 脚和 8 脚接一组电阻 R<sub>G</sub>, 其中  $R_G = 49.4 / (G - 1)$ , G 是 AD620AN 的放大倍数, G 的取值为 1—1000。在本线路中, 串联 8 个不同阻值的精密电阻<sup>[8]</sup>, 实现不同放大倍数, R<sub>G</sub> 值的大小可根据测试时的分档值来设定。而档位的选择是通过多路电子开关 CD4051BE

接通不同阻值的电阻来实现的。选通通过单片机输出给 CD4051BE 3 位地址码 ABC 来决定。“INH”为禁止端,当“INH”=1 时,各通道均不接通。电阻的选择采用筛选的方式,使得精度电压的采样精度大大的提高。本系统能适应 0.5—50 V 的开路电压的测试。

### 3.3 电流采样电路设计

在电路设计中,电流的测量一般是通过电压的采样来完成的。对太阳能电池输出电流的测量是通过将其转化为电压信号送入 ADS8341 芯片来实现的,转化的方式是在电流支路上接一个精密采样电阻。根据量程的大小来设置电阻的数量。本系统的量程为 3 mA~5.6 A。在图 4(b)所示的系统中采用 3 个精密电阻,即量程分 3 档。分档电阻的选通是由单片机的输出数值来决定的,当 PD<sub>4</sub>, PD<sub>5</sub>, PD<sub>6</sub> 的输入为 1,0,0 时,选择第一档分档电阻,当输出为 0,1,0;0,0,1 时,分别选通下面两个分档电阻。PD<sub>7</sub> 为扩展项。系统中电阻的精度决定着电流测量的精度,每个电阻是经过严格筛选而产生的。

## 4 实验验证

测试系统为 SU-II 太阳能电池测试系统,测试系统如图 5 所示。被测太阳能电池为 TD-100<sup>[9]</sup> 与 KC32T02 太阳能电池。

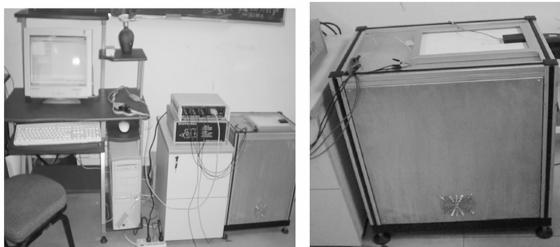


图 5 测试系统实物图

Fig. 5 Solar cell test system

测量次数为 10 次。为了验证测试系统在测试过程中的一致性,必须进行一致性测试,测试按《太阳能电池电性能测试设备检验方法》国标草案的公式计算<sup>[10]</sup>,其中:

$$S = \frac{1}{x} \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中, $\bar{x}$  为测量数据算术平均值, $n$  为测量数据次

数, $S$  为一致性。

相对误差  $\gamma$  的计算公式为:

$$\gamma = \frac{\text{理论值} - \text{实际值}}{\text{理论值}} \times 100\% . \quad (2)$$

测量结果如表 1,表 2 所示。

从表 1,表 2 可以看出,该测试系统对开路电压的不一致性 < 0.3%,短路电流的不一致性 < 0.5%;开路电压的最大相对误差 < 0.4%,短路电流的最大相对误差 < 0.8%,取得了较理想的结果。

表 1 电压与电流的测试结果(TCS-100)

Tab. 1 Test results of voltage and current (TCS-100)

	真实值: $V_{oc} = 0.602 \text{ V}$ $I_{sc} = 2.4 \text{ A}$	
	开路电压 $V_{oc}/\text{V}$	短路电流 $I_{sc}/\text{A}$
1	0.602	2.39
2	0.601	2.42
3	0.602	2.42
4	0.599	2.41
5	0.601	2.41
6	0.600	2.41
7	0.602	2.40
8	0.601	2.41
9	0.602	2.42
10	0.599	2.40
平均值	0.600	0.696
一致性	0.012	0.032
最大相对误差	0.3	0.7

表 2 电压与电流的测试结果(KC32T02)

Tab. 2 Test results of voltage and current (KC32T02)

	真实值: $V_{oc} = 27.1$ $I_{sc} = 1.99 \text{ A}$	
	开路电压 $V_{oc}/\text{V}$	短路电流 $I_{sc}/\text{A}$
1	27.211	1.985
2	27.121	1.991
3	27.210	1.978
4	27.151	2.001
5	27.182	1.995
6	27.131	2.000
7	27.082	2.002
8	27.151	1.995
9	27.095	1.996
10	27.180	1.988
平均值	27.142	1.993
一致性	0.005 6	0.001 2
最大相对误差	0.41	0.6

## 5 结 论

本文在系统分析现役太阳能电池测试系统的基础上,提出了基于 DSP 的太阳能电池光电参数测试系统。采用总线结构与模块化的设计思想,不仅使得实时响应性能优越,而且具有易于维护和扩展性好等特点。采用精密放大器组成的测试系统解决了测试过程中太阳能电池两端的电压自动跟随问题,精确获取了真实的短路电流。在电流与电

压的采样电路中,分别采用多路开关、多路继电器与精密电阻的组合设计,实现了分档测试的目的。上述措施大大地提高了测试精度与测量范围,使系统可适用于多规格、多品种太阳能电池的光电参数测试。实验证明,系统可实现开路电压 0.5~50 V,短路电流 3 mA~5.6 A 的测量,且具有较高的测试精度。开路电压的不一致性 $<0.3\%$ ,短路电流的不一致性 $<0.5\%$ ,能够较好地满足不同规格,不同品种的薄膜与小组件太阳能电池的自动测试要求。

## 参考文献:

- [1] SALMON J B. Solar cell measurement system for NPS spacecraft architecture and technology demonstration satellite [C]. *Proceedings of the 17th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, SSC03-X-4, Logan, Utah: NPSAT1, August, 2003.
- [2] 王志明,张洪欣. 四线制测量在单体太阳能电池测试中的应用[J]. 电子测量技术,2006,29(6):38-45.  
WANG Z M, ZHANG H X. The application of four-wire measurement in a single solar cell [J]. *Electronic measurement technology*, 2006,29(6):38-45. (in Chinese)
- [3] RAJKMAN K, SINGH R, SHEWCHUN J. Absorption coefficient of silicon for solar cell calculations [J]. *Solid-State Electronics*, 1979,22:793-797.
- [4] 王志明,龚振邦,魏光谱,等. 用于太阳能电池测试的太阳模拟技术[J]. 光学精密工程,2009,17(7):1542-1547.  
WANG Z M, GONG ZH B, WEI G P, *et al.*. Solar simulation technique for solar cell measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1542-1547. (in Chinese)
- [5] 姜培培,裘燕青,傅志辉,等. 基于 DSP 和 FPGA 的多路型光纤光谱仪系统 [J]. 光学精密工程,2006,14(6):944-947.  
JIANG P P, QIU Y Q, FU Z H, *et al.*. DSP and FPGA-based multi-channel fiber-optic spectrometer [J]. *Mechanical & Electron*, 2006, 14(6): 944-947. (in Chinese)
- [6] 王红雨,张克农,丁杰,等. 基于 DSP 的太阳能电池测试系统硬件设计[J]. 测控技术,2004,(13):64-65.  
WANG H Y, ZHANG K N, DING J, *et al.*. Hardware design of solar cell test system based on DSP [J]. *Monitoring and Control Technology*, 2004, (13):64-65. (in Chinese)
- [7] 王平. 有源器件伏安特性测试仪的研制[J]. 西安石油大学学报,2001,16(4):63-65.  
WANG P. Development of the instrument for testing active device's voltage-current characteristic [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute.*, 2001, 16(4):63-65. (in Chinese)
- [8] 蔡建文,李萍萍,徐传明,等. 太阳能电池测试系统及其参数匹配优化研究[J]. 光学精密工程,1997,15(4):517-521.  
CAI J W, LI P P, XU CH M, *et al.*. Study on solar cell testing system and its parameter matching optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 15(4):517-521. (in Chinese)
- [9] 汪东翔. TDB-100 硅太阳能电池仿真及 P-V 特性研究[J]. 太阳能学报,1994,15(3):268-273.  
WANG DX. Emulation of TDB-100 silicon solar cell and the study on its P-V character [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1994,15(3):268-273. (in Chinese)
- [10] 黄嘉豫. 太阳能电池性能测试设备检验方法[S]. 国家标准局,2002.  
HUANG J Y. Methods of equipment check in the performance test of solar cells [J]. *National Bureau Standards*, 2002. (in Chinese)

## 作者简介:



王志明(1967—),男,副教授,1990年、1998年、2008年于上海大学分别获学士、硕士、博士学位,现任上海大学精密机械工程系测控技术与仪器专业主任,主要从事光机电一体化检测技术的研究。E-mail: suwangzm@sina.com



魏光普(1937—),男,教授,1961年毕业于南京大学物理系,主要从事半导体材料、太阳电池及光电器件、分析测试技术等方面的研究。E-mail: gpwei@sh163a.sta.net



龚振邦(1941—),男,教授,博士生导师,1964年毕业于上海科技大学,现任上海大学精密机械研究所所长、微机械技术研究中心主任,主要从事先进机器人技术与精密工程等方面的研究。E-mail: zhbong@shu.edu.cn

## ● 下期预告

## 面向聚合物微器件超声波 精密封接的阵列微导能结构

罗 怡<sup>1</sup>,张苗苗<sup>2</sup>,孙屹博<sup>2</sup>,王晓东<sup>1</sup>

(1. 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室,辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

聚合物超声波精密封接是一项重要的 MEMS 加工方法,对提高聚合物 MEMS 器件键合或封接效率具有重要意义。为提高封接可控性,预防高温场下的聚合物熔融流延影响封接界面质量和精度,提出了阵列式微导能结构。以 PMMA 微小管道的封接为实验对象,研究了阵列微导能结构的尺度对超声波封接过程的影响,采用热压成型工艺在被封接表面制作了 5 组不同高度的微结构。实验采用基于声波传递效率反馈的超声波精密封接方式,对超声波作用下聚合物界面润湿行为进行了观察分析,讨论了结构尺度对超声波封接质量的影响。结果表明,随着微结构尺寸的增大,实现完全联接需要的超声波能量呈递增的趋势。该种微导能结构有效控制了聚合物熔融流延,获得了均一的封接面,可实现高质量精密封接。