

文章编号 1004-924X(2012)03-0625-07

1/f 噪声的精确测量及其在太阳能电池 可靠性筛选中的应用

周求湛*, 张彦创, 周承鹏, 吴丹娥
(吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要: 为了实现对太阳能电池可靠性的筛选分类, 建立了一套低频噪声自动测试系统。首先, 根据太阳能电池 1/f 噪声的来源, 确定了在大电流密度情况下以 1/f 噪声功率谱作为太阳能电池可靠性指示的可行性。然后, 由测试得到的功率谱曲线明确了通过比较在 f 为 1 Hz 频点处的 1/f 噪声功率谱值大小可以区分太阳能电池的可靠性。最后, 根据半导体器件可靠性试验验证的分类标准, 给出了确定筛选阈值的方法。实验结果表明: 该方法可以在短时间内无损地完成一批太阳能电池 3 个等级的可靠性分类, 平均每个太阳能电池的测试时间只需 5 min。采用该筛选方法, 能精确检测单一器件, 解决了传统方法花费大、周期长, 易引起器件的损伤, 且只能得到一批器件可靠性的统计规律的问题。该方法适用于对太阳能电池可靠性要求高的应用场合。

关键词: 太阳能电池; 1/f 噪声; 可靠性; 筛选方法

中图分类号: TM914.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122003.0625

Precise measurement of 1/f noise and its application to reliability screening for solar cells

ZHOU Qiu-zhan*, ZHANG Yan-chuang, ZHOU Cheng-peng, WU Dan-e

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

* Corresponding author, E-mail: zhouqz@jlu.edu.cn

Abstract: An automatic measurement system for low frequency noises is established to sort solar cells according to their reliability. First, according to the sources of the 1/f noise of a solar cell, this paper identifies the feasibility of 1/f noise under big current density to be the reliability indication of the solar cell. Then, according to the noise spectral character measured by the automatic measurement system, it points out that comparing the 1/f noise spectrum of different solar cells in f at 1 Hz is an effective method to distinguish the reliability of different solar cells. Finally, the method to determine the threshold of screening solar cells is given based on the standard of semiconductor device quality classification. Experimental results indicate that this kind of method can nondestructively sort the solar cells into three groups according to their reliability, and spends only 5 min for measuring single solar cell. The proposed method can detect every single solar cell correctly and has advantages over tra-

收稿日期: 2011-10-12; 修订日期: 2011-12-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60906034); 吉林省自然科学基金资助项目(No. 201115029)

ditional methods in costs, time and hard to be hurt. This method can satisfy the application requirements of screening solar cells for high reliability.

Key words: solar cell; $1/f$ noise; reliability; screening method

1 引言

太阳能作为一种新型的替代能源,具有洁净和可再生的特点,能够有效解决能源危机和环境污染的问题^[1]。包括晶体硅、化合物和纳米材料在内的多种太阳能电池,它们在成本和转换效率等方面各具优势,但就目前技术和材料的来源考虑,晶体硅太阳能电池仍然占据主流地位。近年来,随着太阳能电池产业的快速发展,太阳能电池的质量与可靠性也愈发受到人们的关注,尤其在航空航天等要求高可靠性的应用环境。

针对太阳能电池的可靠性筛选,传统方法主要有 I-V 特性电测筛选方法、寿命筛选方法和环境应力筛选方法等,这些筛选方法花费大、周期长,而且大多具有破坏性,只能得到可靠性统计特性,不是针对单一器件^[1-3]。因此,通过测量太阳能电池的内部噪声来判断电池可靠性这种快速、无损的方法逐渐发展起来。太阳能电池的内部噪声包括基本噪声(如白噪声、基本 $1/f$ 噪声)和过激噪声(如过激 $1/f$ 噪声、G-R 噪声),如果电池有缺陷,可靠性就会降低,产生过激噪声。因此只需测量分析太阳能电池的过激噪声就可以对太阳能电池的可靠性做出判断。本文主要研究 $1/f$ 噪声(包括基本 $1/f$ 噪声和过激 $1/f$ 噪声)在太阳能电池可靠性筛选中的应用。1983 年, L. K. J. Vandamme 提出单晶硅太阳能电池的 $1/f$ 噪声和电池串联电阻可能有一定的关系,但是针对它们之间的具体关系并没有详细说明^[4]。此后, Kleinpenning 等人在无光、正向大注入电流密度条件下,分析 $1/f$ 噪声和串联电阻的相关性,提出低频噪声可以作为太阳能电池可靠性检验的一个敏感参数^[5]。2005 年, P. V. V. Jayaweera 等人通过研究染料敏化电池中的 $1/f$ 噪声,也证实了 $1/f$ 噪声可以作为太阳能电池可靠性的敏感指示^[6-7]。可以看出,近年来在太阳能电池的可靠性问题研究方面,主要工作是在理论研究的基础上,通过比较多的实验证明了 $1/f$ 噪声作为太阳能电池的可靠性

敏感参数的可行性,但关于噪声筛选的过程和如何确定噪声筛选参数阈值却一直没有说明。目前,国内外尚未见有完整的用于太阳能电池可靠性筛选及分类的噪声测试系统。

针对这些问题,本文构建了一套完整的低频噪声自动测试系统,精确测量了太阳能电池在正向偏置电压大电流密度情况下的 $1/f$ 噪声功率谱曲线。通过对不同太阳能电池 $1/f$ 噪声功率谱曲线的对比分析,明确了可以通过比较噪声功率谱在 $f=1$ Hz 频点处的有效值来判定太阳能电池的可靠性。对于一批太阳能电池的可靠性筛选分类问题,给出了分类筛选阈值的确定办法。

2 测量太阳能电池 $1/f$ 噪声作为可靠性筛选的理论依据

2.1 太阳能电池的 $1/f$ 噪声

$1/f$ 噪声是半导体器件中一种最主要的低频噪声。硅太阳能电池作为大面积的 PN 结,其噪声特性与普通 PN 结有相似之处。Kleinpenning 在针对 PN 结二极管的研究中,阐明了 PN 结二极管中 $1/f$ 噪声的来源^[8]。在不同的电流注入密度时, $1/f$ 噪声有不同的产生原因。当 PN 结处于正向小注入电流密度时,载流子在空间电荷区的产生-复合中心进行的产生-复合运动是引起 $1/f$ 噪声的主要原因。PN 结在处于中等大的正向注入电流密度时, PN 结基底的扩散电流是此时引起 $1/f$ 噪声主要原因。在更大的正向注入电流密度时,由于接触面缺陷引起的串联电阻噪声是 $1/f$ 噪声的主要来源。 $1/f$ 噪声产生机理的明确,为把 $1/f$ 噪声作为指示太阳能电池可靠性的敏感参数提供了理论基础。本文讨论了在太阳能电池处于正向大注入电流密度情况下,如何从串联电阻角度判断太阳能电池的可靠性。

2.2 $1/f$ 电阻噪声作为太阳能电池可靠性指示

在正向大电流密度注入情况下,根据 Hooge 模型经验公式,在串联电阻区域太阳能电池的开

路噪声电压功率谱密度为:

$$S_V = \frac{\alpha}{N_{ff} f} I^2 R_s, \quad (1)$$

其中 I 为正向电流密度, α 为常数, 即 Hooge 常数, R_s 为串联电阻, N_{ff} 为接触面的自由载流子的有效数目。由计算公式(1)可知, 太阳能电池串联电阻的增大会引起噪声相应的增大。太阳能电池的串联电阻主要由接触电阻、扩散方块电阻、基体电阻等组成。当太阳能电池存在表面缺陷或由于表面金属化而产生缺陷时, 会导致串联电阻相应的增大, 从而导致 $1/f$ 噪声的增加。所以在正向大电流密度注入条件下, 若测得 $1/f$ 噪声增加, 则可逆向分析出串联电阻增大, 从而判断出太阳能电池质量退化, 可靠性降低^[9]。因此在大电流密度情况下, $1/f$ 噪声可以作为表征太阳能电池可靠性预测的敏感参数^[10-13]。

3 低频噪声测试系统及筛选方法研究

3.1 测试系统构成

测试系统为双通道低频噪声功率谱测试系统, 包括测试偏置电路、双通道低噪声前置放大器、数据采集卡及上位机分析程序等, 如图 1 所示。

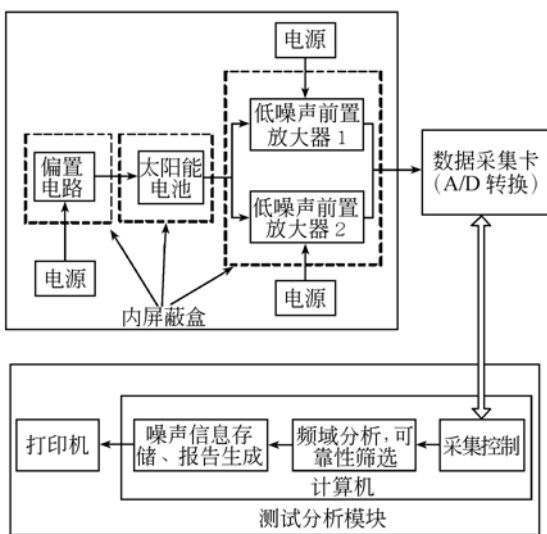


图 1 太阳能电池低频噪声测试系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of test system for low frequency noise of solar cell

在此系统中通过偏置电路来改变太阳能电池两端的偏置电压, 然后将太阳能电池的开路电压噪声信号分别送入两个低噪声前置放大器, 使用 NI 公司的数据采集卡 PCI-6251 同时采集两路放大器的输出信号。计算机对采集到的两路信号数据进行互谱运算分析、筛选、存储等操作。

在太阳能电池的噪声测试过程中, 为了保证测试的精确度, 同时减少测试耗费时间和互谱运算时间, 采用了分段平均测量的方法, 取不同的步长, 分 3 段测量, 如表 1 所示。3 段测量完成后, 通过曲线拟合得到完整的功率谱密度。

表 1 分段测量的频率范围及步长

Tab. 1 Frequency ranges and step sizes for section measurement

频率	采样速率 (Sa/s)	采样点数	频率分辨率/Hz
0.25~100 Hz	1 000	4 000	0.25
0.1~5 kHz	50 000	4 000	12.5
5~100 kHz	500 000	2 000	250

(1) 偏置电路: 即太阳能电池的噪声信号产生电路^[14], 如图 2 所示。太阳能电池两端的偏置电压调整可以通过调整电位器 R_w 的接入电阻来实现。测量太阳能电池两端的开路电压噪声, 然后此电压噪声通过测试端子 3、4 送入双通道放大器。本文研究的是太阳能电池串联电阻噪声的影响, 需要在大的正向电流注入密度条件下进行测试, 经过多次试验测试, 确定偏置电压 $U=0.5$ V。

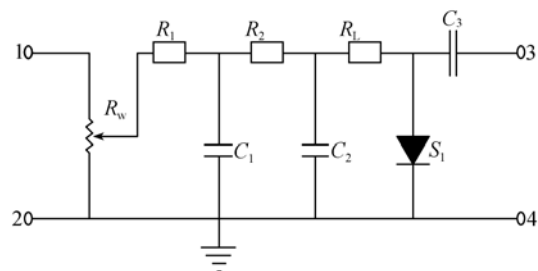


图 2 太阳能电池低频噪声测试偏置电路

Fig. 2 Bias circuit for testing low frequency noise of solar cell

因为太阳能电池的电压噪声信号测量属于微弱信号测量, 所以偏置电路的设计必须考虑低噪声的要求。因此直流电源采用稳定可靠的 12 V 镍氢

电池,电位器采用多圈线绕电位器,电阻采用军用的金属膜电阻。为了最大限度地减少外界环境噪声干扰(如电源线 50 Hz 工频噪声等),本设计将偏置电路放置于一个密闭的铜质盒,然后再将这个铜质盒置于一个更大的全封闭金属屏蔽箱。

改变太阳能电池在偏置电路中的接入极性,本系统即可方便地测试太阳能电池正偏或反偏状态下的噪声。在图 2 所示的偏置电路中,为了滤掉电源可能产生的干扰或纹波,由电阻 R_1 、 R_2 和电容 C_1 、 C_2 组成滤波网络,用于保证加载于太阳能电池上的电压纯净、稳定。

(2)低噪声前置放大器:太阳能电池的开路电压噪声属于十分微弱的模拟信号,为纳伏(nV/\sqrt{Hz})数量级,为了对 $1/f$ 噪声进行精确测量,前置放大器需要将太阳能电池的开路电压噪声信号放大至数据采集卡的输入范围内,且不能引入过大的噪声,否则会将有用信号淹没,因此放大器本身的噪声水平大小会直接影响整个测试系统的性能指标^[15]。采用 2 个前置放大器是为了采用互谱估计的方法,最大限度地减少前置放大器的噪声、零漂及电源等干扰的影响,同时降低了测试系统对放大器等精度的要求和系统成本。

图 3 所示为测试出的合格太阳能电池(No. 005)和不合格太阳能电池(No. 007)以及放大器本底噪声的功率谱比较。由图中可以看出放大器的本底噪声和太阳能电池的噪声相比非常小,所以该系统完全可以区分太阳能电池噪声的大小。大量的测试结果显示在 $f=1$ Hz 频率点处,不合格太阳能电池的噪声功率谱值至少比合格太阳能电池的噪声功率谱值大 1~2 个数量级。

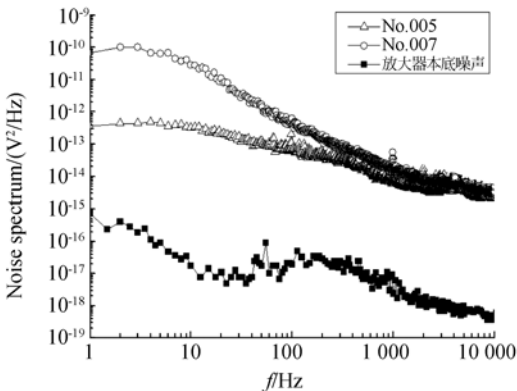


图 3 噪声功率谱比较
Fig. 3 Comparison of noise spectra

3.2 $1/f$ 电压噪声的幅度分布研究

现在太阳能电池的等级分类方法还主要依据电参数,采用噪声参数进行太阳能电池的可靠性筛选分类属于新兴的技术领域,因此合适阈值参数的确定并没有一个明确的标准。

可靠性筛选分类是针对一批特定的太阳能电池,但是因为生产工艺、生产技术等的原因,各个厂家的产品性能会有很大不同,即使是同一个厂家的不同批次产品性能指标也可能会有较大的变化,因此需要针对不同批次的产品确定不同的筛选参数阈值。在一批特定的产品中,阈值参数的确定并不是一个固定不变的值,为了兼顾可靠性与经济性的平衡,需要对一批特定产品的 $1/f$ 噪声幅度分布进行统计分析,从而确定合理的筛选参数阈值。

采用图 2 所示的测试电路,对 BF2 批次共计 180 个太阳能电池进行电压噪声测量,提取噪声功率谱在 $f=1$ Hz 频点处的幅度值,对其进行开方,获得太阳能电池的 $1/f$ 电压噪声有效值。对 BF2 批次的所有太阳能电池进行统计分析,得到图 4 所示的 180 个太阳能电池的 $1/f$ 电压噪声有效值频度的直方图分布。

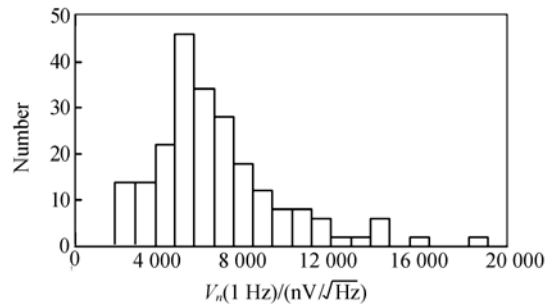


图 4 太阳能电池 $1/f$ 电压噪声有效幅值分布
Fig. 4 Distribution of RMS amplitude for $1/f$ voltage noise of solar cells

其中横坐标表示在 1 Hz 时太阳能电池噪声有效值的大小,纵坐标表示对应不同噪声值的太阳能电池的个数。从图 4 中可以看出结果基本可以用正态分布来描述,横坐标在 15 000 附近柱状图略有突起,这是因为测试样本数量只有 180 个,若增加测试样本,正态性分布将更加明显。

3.3 可靠性筛选阈值参数的确定

3.1 节已经说明,通过大量的太阳能电池噪

声测量,在 $f=1$ Hz 频点处,不合格太阳能电池噪声功率谱值明显比合格太阳能电池的噪声功率谱值大 1~2 个数量级。

由图 4 所示的 BF2 批次 180 个太阳能电池 1/f 电压噪声在 $f=1$ Hz 频点处的有效值幅度分布可知,噪声值大的产品应该被认定为可靠性不合格产品。

根据太阳能电池在 1 Hz 频点处噪声谱的有效值,即 1/f 电压噪声有效值(记为 $V_n(1 \text{ Hz})$),构造可靠性筛选判据为:

$$V_n(1 \text{ Hz}) \geq V_{\text{statistics}}, \quad (2)$$

其中 $V_{\text{statistics}}$ 为一个统计值。当太阳能电池的 1/f 电压噪声在 $f=1$ Hz 频点处有效值大于这个统计筛选阈值时,说明此太阳能电池串联电阻噪声过大,即太阳能电池存在表面缺陷或者由于表面金属化而引起了其它缺陷。

BF2 批次 180 个太阳能电池的可靠性等级分类主要依据图 4 所示的 1/f 电压噪声在 $f=1$ Hz 频点处的有效值幅度分布和 Konczakowska 提出的对半导体器件可靠性试验验证的分类方法^[16],通过计算此批太阳能电池在 $f=1$ Hz 频点处噪声有效值的平均值 \bar{V}_0 和均方差 σ ,得到 BF2 批次太阳能电池可靠性分类的筛选阈值参数:

$$\begin{aligned} V_{01} &= \bar{V}_0 - \alpha\sigma \\ V_{02} &= \bar{V}_0 + \beta\sigma \end{aligned}$$

一般情况下可采用 $\alpha=\beta=0.67$ 。

由 V_{01} 、 V_{02} 可确定太阳能电池筛选分类条件为:

I 级: $V_n(1 \text{ Hz}) \leq V_{01}$;

II 级: $V_{01} < V_n(1 \text{ Hz}) < V_{02}$;

III 级: $V_n(1 \text{ Hz}) > V_{02}$ 。

根据上述分类筛选条件,计算 BF2 批次 180 个太阳能电池 1/f 电压噪声的平均值 \bar{V}_0 和均方差 σ ,结果如下:

$$\bar{V}_0 = 7\ 581.54 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}, \sigma = 2\ 027.75;$$

筛选参数阈值为:

$$V_{01} = 6\ 222.947\ 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$V_{02} = 8\ 940.132\ 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}.$$

根据 V_{01} 和 V_{02} 的计算值,对 BF2 批次的 180 个太阳能电池进行可靠性等级分类。1/f 电压噪声有效值大于 $8\ 940.132\ 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的太阳能电池为 III 类产品(可靠性最低),共计 29 个;1/f 电压噪声有效值小于 $8\ 940.132\ 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 大于 $6\ 222.947\ 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的太阳能电池为 II 类产品,共计 32 个;1/f 电压噪声有效值小于 $6\ 222.947\ 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的太阳能电池为 I 类产品(可靠性最高),共计 119 个。

4 结 论

基于 1/f 噪声的太阳能电池的可靠性研究目前主要集中在理论分析上,对一批太阳能电池的筛选的具体实现过程并没有相关研究。本文通过对一批太阳能电池的 1/f 噪声的精确测量和分析,详细地介绍了一批太阳能电池可靠性筛选的过程和筛选阈值的确定方法。在大电流密度情况下,串联电阻噪声是太阳能电池 1/f 噪声的主要来源,而串联电阻的增大说明太阳能电池存在接触面缺陷、电接触缺陷等,从而说明太阳能电池可靠性降低。因此在大电流密度情况下,可以将 1/f 噪声作为太阳能电池可靠性的指示。本文设计了一套完整的太阳能电池低频噪声测试及分析系统,对 BF2 批次 180 个太阳能电池进行了测试和互谱功率密度统计分析,通过比较太阳能电池 1/f 噪声在 $f=1$ Hz 频点处的噪声有效值大小,将此批太阳能电池按可靠性等级分为了 3 类。实验结果证明在大电流密度情况下,这种基于 1/f 噪声的可靠性筛选技术在单个器件平均 5 min 的时间内即可对一批太阳能电池完成无损筛选,为一些要求高可靠性的场合如航天应用等,从技术上提供了可靠保证。

参考文献:

[1] GEOFFREY K. *Solar Cells and Their Applications*. [M]. 2nd ed. Canada, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

[2] 周春兰,王文静,李海玲,等.用电学参数表征晶体硅太阳能电池特性[J].光学精密工程,2008,16(7): 1164-1169.

- ZHOU CH L, WANG W J, LI H L, *et al.*. Characterization of crystalline silicon solar cells by electrical parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1164-1169. (in Chinese)
- [3] 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*, 2007, 15(4): 518-520.
- CAI J W, LI P P, XU C M, *et al.*. Study on solar cell testing system and its parameter matching optimization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 518-520. (in Chinese)
- [4] VANDAMME L K J, ALABEDRA R, ZOMMITI M. $1/f$ noise as a reliability estimation for solar cells [J]. *Solid-State Electronics*, 1983, 26(7): 671-674.
- [5] KLEINPENNING T G M, SCHURINK F, VAN DER VEER J H C, *et al.*. $1/f$ noise as a sensitive parameter in the life prediction testing of photovoltaic modules [J]. *Solar Cells*, 1984, 12(4): 363-370.
- [6] JAYAWEERA P V V, PITIGATA P K D D P, PERERA A G U, *et al.*. $1/f$ noise and dye-sensitized solar cells [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(7): 40-42.
- [7] JAYAWEERA P V V, PITIGATA P K D D P, SENEVIRATNE M K I, *et al.*. $1/f$ noise in dye-sensitized solar cells and NIR photon detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2007, 50(2-3): 270-273.
- [8] KLEINPENNING T G M. $1/f$ Noise in p-n diodes [J]. *Physica B-C*, 1980, 98(4): 289-299.
- [9] BREITENSTEIN O, BAUER J, ALTERMATT P P, *et al.*. Influence of defects on solar cell characteristics [J]. *Solid State Phenomena*, 2010, 156-158(1): 1-10.
- [10] SMULKO J, AZENS A, MARSAL R, *et al.*. Application of $1/f$ current noise for quality and age monitoring of electrochromic devices [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2008, 92(8): 914-918.
- [11] JIRI V, PAVEL K, JAN D, *et al.*. Micro-plasma luminescence and signal noise used to solar cells defects diagnostic [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1129(1): 641-644.
- [12] MACKU R, KOKTAVY P, KARVADA P, *et al.*. Diagnostics of forward biased silicon solar cells using noise spectroscopy [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1129(1): 145-148.
- [13] MACKU R, KOKTAVY P, KARVADA P. Advanced non-destructive diagnostics of monocrystalline silicon solar cells [J]. *Wseas Transactions on Electronics*, 2007, 4(9): 192-197.
- [14] CHOBOLA Z. Noise as a tool for non-destructive testing of single-crystal silicon solar cells [J]. *Microelectronics Reliability*, 2001, 41(12): 1947-1952.
- [15] 吴丹娥. 太阳能电池低频噪声测试系统设计及其可靠性筛选方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- WU D E. *Low-frequency noise measurement system design and study of reliability screening methods for solar cells* [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [16] KONCZAKOWSKA A. Methodology of semiconductor devices classification into groups of differentiated quality [J]. *Microelectronics Reliability*, 2008, 48(1): 37-44.

作者简介:



周求湛(1974—),男,黑龙江佳木斯人,博士,副教授,1997年于吉林工业大学获得学士学位,2001年、2004年于吉林大学分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为微弱信号检测,半导体器件噪声可靠性估计等。E-mail: zhouqz@jlu.edu.cn



张彦创(1988—),男,河南许昌人,硕士研究生,2010年于吉林大学获得学士学位,研究方向为虚拟仪器技术,微弱信号检测等。E-mail: jluzyc@yahoo.cn



周承鹏(1990—),男,甘肃兰州人,现为吉林大学在读本科生,研究方向为嵌入式系统开发。E-mail: zcp178@sina.com



吴丹娥(1985—),女,广西桂林人,硕士,2011年在吉林大学获得硕士学位,研究方向为太阳能电池低频噪声测试及可靠性筛选方法等。E-mail: 316530013@qq.com

●下期预告

管道机器人无线电磁自适应定位技术

魏明生^{1,2},童敏明¹,訾斌³,夏静⁴,陆阳²

(1. 中国矿业大学信息与电气工程学院,江苏徐州 221008;

2. 江苏师范大学物理与电子工程学院,江苏徐州 221116;

3. 中国矿业大学机电工程学院,江苏徐州 221008;

4. 南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094)

针对管道机器人跟踪定位问题,提出了一种改进的自适应无线电磁定位方法,应用该方法在未知管道几何尺寸和周围环境电磁参数的情况下能实现管道内机器人的三维定位。首先,通过磁偶极子模型,分析了管道外极低频电磁场分布规律;其次,建立了六传感器接收天线的自适应定位模型,设计了电磁发射和接收电路,并且基于该模型推导出了含有6个未知数的非线性方程组,分别采用3种算法进行了仿真分析;最后,分别对不同壁厚及不同埋藏深度管道进行了试验研究。试验结果表明,在管道壁厚为5.74 mm,埋藏深度为0.8~2 m的情况下,总位置误差的平均值小于18.7 cm,比原模型减少了3.4 cm,满足机器人实际工作中定位的需要。