

# 光声方法测量金属材料的热扩散率及热溢出率

高椿明, 鲁旭, 张希仁, 万丹, 赵斌兴

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

**【摘要】**利用固体光声技术开展了对金属材料热扩散率及热溢出率的测量研究。首先, 根据简化的R-G理论建立一维固体光声池检测材料热性能的理论模型, 搭建了相应的光声测试系统; 然后检测了紫铜等标准样品的热扩散率及热溢出率, 完成了实验方法及系统的校准和验证; 最后, 对常见几种金属样品的热扩散率及热溢出率进行了检测。研究结果显示, 利用固体光声技术可以准确测量金属材料的热扩散率及热溢出率, 测量结果与参考值的相对误差均在3%以下。

**关键词** 金属材料; 金属材料; 光声技术; 固体光声池; 热扩散率; 热溢出率

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.06.027

## Thermal Diffusivities and Thermal Effusivities of the Metal Materials Studied by the Photoacoustic Technique

GAO Chun-ming, LU Xu, ZHANG Xi-ren, WAN Dan, and ZHAO Bin-xing

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** The thermal diffusivities and thermal effusivities of metal materials have been measured by the Photoacoustic Technique. Firstly, based on the simplified R-G model, the one-dimensional theory of photoacoustic was analyzed. The corresponding experimental system has been set up, by which the photoacoustic signal of the solid photoacoustic cell can be obtained. Secondly, the thermal diffusivity and thermal effusivity of reference samples were measured, by which the experimental system can be validated. Finally, the diffusivities and effusivities of several kinds of metal material were studied by the photoacoustic cell system. Comparing with the corresponding reference data, it is shown that the photoacoustic techniques can be used to measure both the thermal diffusivity and effusivity of metal materials effectively. The relative error between the experiment data and the reference data are less than 3%.

**Key words** metal material; photoacoustic; solid photoacoustic cell; thermal diffusivity; thermal effusivity

热性能是材料重要的参数, 其中热扩散率反映材料的热传导能力; 热溢出率反映材料的蓄热能力及与其他材料间的热交换能力。对材料的热扩散率和热溢出率的研究, 对涉及建筑、航空、汽车、工艺制造、制冷及生物等的许多材料的应用领域都是非常重要的。目前, 测量材料的这两种热性能参数的方法很多, 有交流量热法<sup>[1]</sup>、平面热源法<sup>[2]</sup>、闪光法<sup>[3]</sup>等。

运用光声技术测量材料的热性能参数, 是20世纪60年代末激光引进光声效应研究发展起来的一项较成熟的技术, 已有许多文献报道, 如运用光热辐射测量法(PTR)<sup>[4]</sup>、光热偏转法(Mirage)<sup>[5]</sup>、光热电法(PPE)、光声压电法(PAPE)<sup>[6]</sup>等方法测量材料的热扩

散率。随着各应用领域对材料蓄热能力的重视程度的不断提高, 运用光热偏转法<sup>[7]</sup>、光热电法、光声混合方法<sup>[8]</sup>等测量材料的热溢出率的研究也在不断展开。

光声法测量材料的热性能参数, 可在获得的光声信号中同时提取材料的热扩散率及热溢出率信息, 其检测系统光路简单, 操作方便, 对样品的大小、透光度、形态及表面状况基本无要求。本文依据文献[9-10]的凝聚态物质的光声理论及文献[10-11]提出的凝聚态介质中的热弹理论, 进行光声法测量金属材料的热扩散率及热溢出率的研究。

### 1 理论模型

本文实验采用的气体-传声器检测模型, 如图1

所示, 该模型的主要理论依据为凝聚态介质中的光声效应。图中, 光声池系统为简单圆柱形密闭系统, 光声池的半径为 $R$ , 气柱长度为 $L$ , 经过周期性调制的平行光垂直入射样品表面, 当样品吸收了光以后(假定气体是不吸收光的), 部分光能量转化为热能并扩散到周围气体中, 就会在样品和气体的边界上产生周期性温度变化, 从而导致边界层气体周期性膨胀和收缩, 产生的声压信号通过整个气柱传输到传声器。这种声压信号就是光声信号, 光声信号再由传声器转换成为电信号输出。

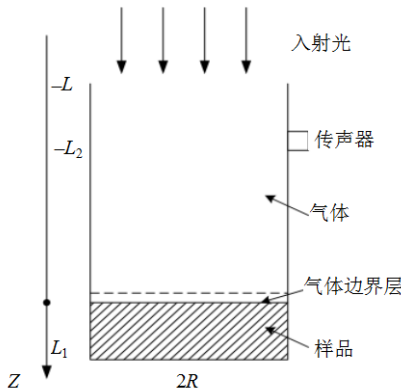


图1 简单圆柱形光声池

1.1 光声系统测量金属材料热性能的理论模型

对金属材料测量时, 热性能参数是通过实验曲线及理论曲线的拟合得到的, 就需要建立光声系统测量金属材料热性能的理论模型。

首先考虑温度的变化。根据交界面  $z=0$  处温度和热流连续, 以及  $z=L$  及  $z=L_1$  处满足绝热的边界条件, 可以由热扩散方程<sup>[11]</sup>得到交界面上的温度为:

$$T'_0 = T' \Big|_{z=0} = \frac{\beta I}{(k'\sigma' + k\sigma)(\beta + \sigma)} \quad (1)$$

式中,  $I$  是入射光强;  $\beta$  是光吸收系数;  $\sigma^2 = i\omega/D$ ;  $\sigma'^2 = i\omega/D'$ ;  $D = k/\rho c$  为样品的热扩散系数;  $k$  为样品的热导率;  $D' = k'/\rho'c'$  是空气的热扩散系数;  $k'$  是空气的热导率。

然后分析样品升温后空气中的声压变化。一般情况下, 样品的声阻抗比气体的大, 所以边界条件为在两端  $z=0$  及  $z=-L$  处受约束( $u=0$ )。由弹性波动方程确定质点在  $z$  方向上的位移量, 从而建立光声信号  $Q$  与样品的热扩散率关系的理论模型为:

$$Q = -i \frac{\alpha'_i \sigma' T'_0 \mu}{\mu'^2 + \sigma'^2} \times \frac{(2e^{-\sigma'L} - e^{-i\mu'L})e^{i\mu'z} + (2e^{-\sigma'L} - e^{i\mu'L})e^{-i\mu'z}}{e^{-i\mu'L} - e^{i\mu'L}} \quad (2)$$

式中,  $\mu' = \omega/c'$  是气体中声波的波矢量;  $c'$  是气体

中的声速;  $\alpha'_i$  为气体的线性热膨胀系数。对于热溢出率  $E$ , 因为  $E = \sqrt{k\rho c}$ , 则式(1)变为:

$$T'_0 = \frac{\beta I}{(1+i)(E+E')(\beta + \sigma)\sqrt{\pi f}} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)就可以建立光声信号与样品的热溢出率关系的理论模型, 已知空气的热溢出率  $E'$  为  $0.00055 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{C})^{[12]}$ ,  $\sigma$  可以转化为  $E$  的表达式即  $\sigma = (1+i)\rho c\sqrt{\pi f}/E$ 。

拟合时, 根据已建立的理论模型, 以测量的参数(热扩散率/热溢出率)为变量, 可得到指定范围内的光声信号幅度或相位的理论曲线簇, 并通过最小二乘法判断出与实验曲线最相近的理论线, 该条线所代表的热扩散率/热溢出率就是金属样品的热扩散率/热溢出率值。并且, 由于幅度信号更多地依赖于激光光强和电子系统的稳定性, 实验误差较大, 因此一般采用相位曲线来拟合。

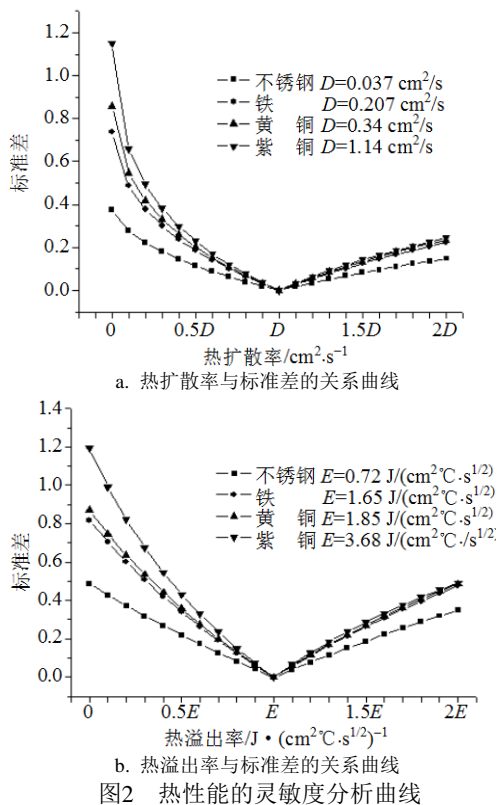
1.2 光声系统测量金属材料热性能的精度分析

根据图1的模型, 在理论上通过标准差的对比, 对几种金属材料热性能的测量精度进行研究。首先, 根据式(2)画出热扩散率为  $D$  的材料的光声信号相位理论曲线  $\varphi_1$ ; 然后令  $D$  值在  $0 \sim 2D$  范围内变化, 得到对应的曲线  $\varphi_2$ ; 最后, 由式(4)<sup>[13]</sup>计算出  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  曲线之间的标准差为:

$$s_{21} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\varphi_{2i} - \varphi_{1i}}{\varphi_{1i}} \right)^2} \quad (4)$$

式中,  $\varphi_{1i}$ 、 $\varphi_{2i}$  分别为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  曲线上的点;  $N$  为比较的点数; 调制频率  $f$  为  $1 \sim 300 \text{ Hz}$ 。

按照上面的方法, 就可以画出不同的热扩散率  $D$  以相同的比例变化时, 标准差变化的曲线, 如图2a所示; 在  $0 \sim 2E$  的范围内用该方法同样也可以得到标准差与热溢出率  $E$  的变化曲线, 如图2b所示。可以看出, 对于不同的被测材料, 热扩散率  $D$  与热溢出率  $E$  越大, 标准差的变化越多, 说明测量的精度越高。这是因为样品吸收光能升温后, 热溢出率较大的材料传热好, 温度能从样品表面大量地传递到气体中, 在气体中形成的温度梯度较大, 产生的光声信号就更加明显, 测试就更加准确。另外通过图2a与图2b的对比也可以看出, 对于同一种材料, 热溢出率  $E$  的标准差变化较大, 说明热溢出率  $E$  的精度比热扩散率  $D$  要高。这是因为  $D = k/\rho c$ ,  $E = \sqrt{k\rho c}$ ,  $D$  与  $E^2$  成正比, 所以拟合时,  $D$  的精度与  $E^2$  的精度是基本一致的, 而  $E^2$  开方后得到  $E$  的精度要比  $E^2$  高, 所以  $E$  的精度要高于  $D$ 。



## 2 光声检测系统

光声技术检测材料热扩散率的实验系统如图3所示。

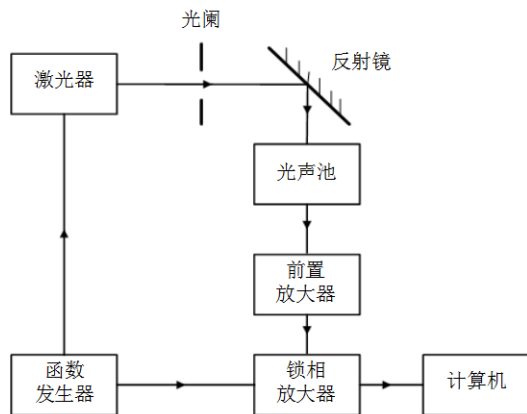


图3 光声检测实验系统

图3中，激光经函数发生器调制后，垂直入射到光声池中的样品表面，产生的光声信号经气体传输，被传声器室中的微音器接收，转化为电信号，再经过前置放大器放大后输入锁相放大器，得到的数据经计算机处理后拟合出材料的热扩散率和热溢出率。其中光源为发射波长808 nm的半导体激光器，功率2.5 W。光声池为自行设计加工的T形光声池，可用于检测固体及液体的光声信号，其剖面结构如图4所示。图中，池身为圆柱形结构，采用不锈钢材料，上下光窗采用石英玻璃并使用O圈密封，传声

器室垂直于样品室并通过毛细管与样品室中的空气柱连接，毛细管结构可以有效地防止传声器室中的传声器损坏或受到样品的污染，传声器为音频范围输出稳定的微音器，灵敏度为-35 dB左右。

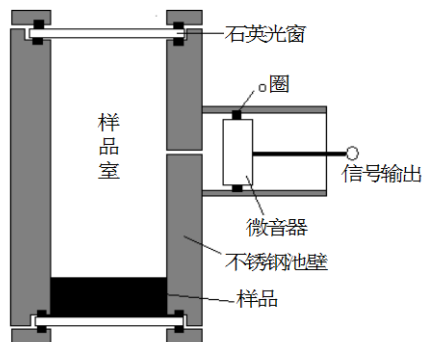


图4 光声池结构

## 3 系统验证及实验结果分析

### 3.1 实验系统的验证

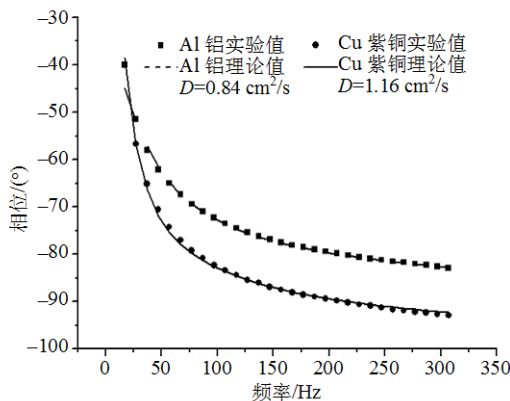
为了验证实验系统，分别对铝、紫铜进行测量，观察实验结果和参考值的相对误差，并采用一致性参数 var 评定实验曲线和理论曲线拟合的情况，其表达式为<sup>[14]</sup>：

$$\text{var} = \frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_i^{\text{exp}} - \varphi_i^{\text{th}})^2}{\sum_{i=1}^N (\varphi_i^{\text{th}})^2} \quad (5)$$

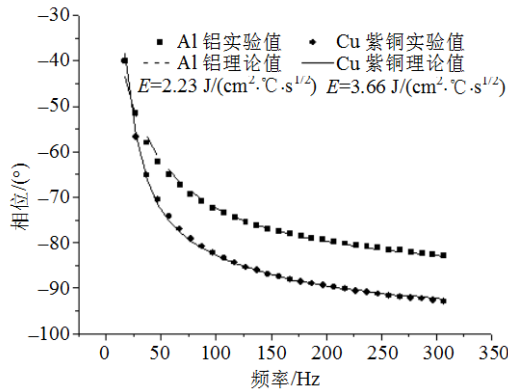
式中， $\varphi_i^{\text{exp}}$  是实验所测相位； $\varphi_i^{\text{th}}$  是拟合结果在理论模型中对应的理论相位； $N$  是实验所测的数据个数。

实验采用的铝和紫铜样品的直径均为8 mm，厚度分别为2.5 mm和2 mm。利用相位-频率关系拟合所得热扩散率及热溢出率结果如图5所示。

拟合得到铝的热扩散率和热溢出率与文献[10]中的参考值相比，相对误差分别为2.3%和0.9%；紫铜的热扩散率和热溢出率与文献[10]中的参考值相比，相对误差分别为1.7%和0.5%。拟合结果都在3%以内，说明光声池实验系统能够比较准确测量材料热扩散率及热溢出率。



a. 铝和紫铜的热扩散率拟合结果



b. 铝和紫铜的热溢出率拟合结果

图5 铝和铜的拟合结果

计算得到铝拟合的热扩散率及热溢出率的一致性参数 var 分别为0.000 26及0.000 82, 紫铜拟合的热扩散率及热溢出率的一致性参数 var 分别为0.000 16和0.000 12。这两种样品的一致性参数都很小, 数量级在 $10^{-3}$ 以下, 拟合的效果都很好, 说明本文的光声检测系统可比较稳定可靠地测量金属材料的热扩散率和热溢出率。

### 3.2 金属材料的热性能测量

本文测量了多种不锈钢、铅、铁等金属材料的热扩散率及热溢出率。测量中样品的直径均为8 mm, 厚度分别为1~5 mm不等。

测量结果如表1所示。

表1 光声池法测量金属材料热性能的实验结果

样品	参数			var
	热扩散率/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	参考值/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差/ (%)	
铅	0.230	0.236	2.5	0.001 300
黄铜	0.350	0.340	2.9	0.000 670
铁	0.210	0.207	1.5	0.000 930
不锈钢	0.038	0.037	2.7	0.000 237

样品	参数			var
	热溢出率/ $\text{J} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{s}^{-1/2})^{-1}$	参考值/ $\text{J} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{s}^{-1/2})^{-1}$	相对误差/ (%)	
铅	0.707	0.707	0	0.001 40
黄铜	1.82	1.850	1.6	0.000 71
铁	1.61	1.645	2.1	0.000 17
不锈钢	0.721	0.720	1.4	0.000 16

可以看出, 对于不同厚度的不同金属材料, 测出的热扩散率及热溢出率值的误差均在3%以内, 一致性参数均在 $10^{-3}$ 量级以下, 说明测量结果是稳定可靠的。同时, 从表1也可以看出, 相同材料间热溢出率  $E$  拟合得到的相对误差比热扩散率  $D$  要小, 与前面的精度分析结果吻合。不同材料间热溢出率与热扩散率拟合的相对误差与精度分析结果有微小偏差, 这是在实际实验过程中的实验误差导致的。

## 4 结论

本文利用固体光声检测系统, 通过对光声信号相位曲线和理论模型相位曲线的拟合, 测量了多种金属材料的热扩散率及热溢出率。

拟合值与参考值相比, 相对误差均小于3%, 一致性参数的数量级也都位于 $10^{-3}$ 以下, 说明测量结果是准确且稳定可靠的。

通过精度分析可知, 材料的热扩散率及热溢出率越大, 测量的精度越高; 相同材料热溢出率的测量精度高于热扩散率。

### 参考文献

- [1] 陈海军, 马灵芝, 唐祯安. 交流量热法测量SiO<sub>2</sub>薄膜的热扩散率[J]. 功能材料, 2002, 33(5): 539-541.  
CHEN Hai-jun, MA Ling-zhi, TANG Zhen-an. Measurement of thermal diffusivity of SiO<sub>2</sub> thin films using AC calorimetric method[J]. Journal of Functional Materials, 2002, 33(5): 539-541.
- [2] 于帆, 张欣欣, 何小瓦. 非稳态平面热源法同时测量材料的导热系数和热扩散率[J]. 宇航计测技术, 2006, 26(6): 13-18.  
YU Fan, ZHANG Xin-xin, HE Xiao-wa. Measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity for materials on transient hot-plane method[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2006, 26(6): 13-18.
- [3] 葛山, 尹玉成. 激光闪光法测定耐火材料导热系数的原理与方法[J]. 理化检验-物理分册, 2008, 44(2): 75-79.  
GE Shan, YIN Yu-cheng. Principle and method of refractory thermal conductivity measurement by laser flash method[J]. PTCA, 2008, 44(2): 75-79.
- [4] 王培吉, 范素华. 激光光热辐射技术测量不透明复合材料的热扩散率[J]. 中国激光, 2000, 27(12): 1129-1132.  
WANG Pei-ji, FAN Su-hua. Laser photothermal radiometry technique to measure thermal diffusivity of opaque complex materials[J]. China Laser, 2000, 27(12): 1129-1132.
- [5] 张仲, 陈康, 侯庆军, 等. 光热偏转技术测量Sr<sub>2-x</sub>Sm<sub>x</sub>FeMoO<sub>6</sub>材料的热扩散率[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 348-351.  
ZHANG Zhong, CHEN Kang, HOU Qing-jun, et al. Measuring the thermal-diffusivity of Sr<sub>2-x</sub>Sm<sub>x</sub>FeMoO<sub>6</sub> using photo-thermal deflection technique[J]. Optical Technique, 2008, 34(3): 348-351.
- [6] 高椿明, 张淑仪, 陈妍, 等. 利用压电光声方法研究生物组织的热扩散特性[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2273-2277.  
GAO Chun-ming, ZHANG Shu-yi, CHEN Yan, et al. Using piezoelectric photoacoustic method to analyse thermal diffusivity characteristics of biological tissue[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(22): 2273-2277.
- [7] SANDOVAL-ROMERO G E, GARCIA-VALENZUELA A, SÁNCHEZ-PÉREZ C. Device for characterization of thermal effusivity of liquids using photothermal beam deflection[J]. American Institute of Physics, 2007, 78(10): 104901(1-7).

- [8] ASTRATH F B G, ASTRATH N G C, SHEN J, et al. A composite photothermal technique for the measurement of thermal properties of solids[J]. *J Appl Phys*, 2008, 104(6): 066101(1-3).
- [9] ROSENCWAIG A. Theoretical aspects of photoacoustic spectroscopy[J]. *J Appl Phys*, 1978, 49(5): 2905-2910.
- [10] ROSENCWAIG A, GERSHO A. Theory of the photoacoustic effect with solids[J]. *J Appl Phys*, 1975, 47(1): 64-69.
- [11] BLONSKIJ I V, TKHORYK V A, SHENDELEVA M L. Thermal diffusivity of solids determination by photoacoustic piezoelectric technique[J]. *J Appl Phys*, 1996, 79(7): 3512-3516.
- [12] 殷庆瑞, 王通, 钱梦騷. 光声光热技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- YIN Qing-ru, WANG Tong, QIAN Meng-lu. Photoacoustic photothermal technique and its application [M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [13] 赵斌兴, 王亚非, 高椿明, 等. 压电光声技术对材料热性能的研究[J]. *中国激光*, 2008, 35(s2): 324-327.
- ZHAO Bin-xing, WANG Ya-fei, GAO Chun-ming, et al. The thermal properties of the material studied by the photoacoustic piezoelectric (PAPE) technique[J]. *China Laser*, 2008, 35(s2): 324-327.
- [14] 高椿明, 毕艳芳, 孙启明, 等. 压电技术测量热扩散率的精度分析[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 426-429.
- GAO Chun-ming, BI Yan-fang, SUN Qi-ming, et al. Measurement accuracy analysis of thermal diffusivities determined by the photoacoustic piezoelectric technique[J]. *China Laser*, 2009, 36(2): 426-429.

编辑 漆蓉

(上接第940页)

- [5] 王健, 来金梅, 童家榕. 基于开关阵列的连接单元版图自动生成[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2008, 47(1): 26-32.
- WANG Jian, LAI Jin-mei, TONG Jia-rong. Layout auto-generation of interconnection unit based on switch array[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2008, 47(1): 26-32.
- [6] KUON I, EGIER A, ROSE J. Design, layout and verification of an FPGA using automated tools[C]//ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays-FPGA. Monterey, California, USA: IEEE Press, 2005: 215-226.
- [7] XIE Jing, WANG Ya-bin, CHEN Li-guang, et al. Fast configuration architecture of FPGA suitable for bitstream compression[C]//Proceedings of 2009 8th IEEE International Conference on ASIC. Changsha: IEEE Press, 2009: 126-130.
- [8] CLAUDHURI S, DANGER J, GUILLEY S. Efficient modeling and floorplanning of embedded-FPGA fabric[C]//Proceedings of 2007 International Conference on Field Programmable Logic and Applications. Amsterdam, Netherlands: IEEE Press, 2007: 665-669.
- [9] MRABET H, PARVEZ H, MARRAKCHI Z, et al. Automatic layout generator of domain specific FPGA[C]//Proceedings of the International Conference on Microelectronics. Sharjah, UAE: IEEE Press, 2008: 183-186.
- [10] BETZ V, ROSE J, MARQUARDT A. Architecture and CAD for deep-submicron FPGAs[M]. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1999, 1: 38-67.
- [11] NEUMANN B, VONSYDOW T, BLUME H, et al. Design flow for embedded FPGAs based on a flexible architecture template[C]//Proceedings of Design, Automation and Test in Europe. Munich, German: IEEE Press, 2008: 56-61.
- [12] XIE Xiao-dong, LI Ping, RUAN Ai-wu, et al. A new design methodology for standard cell based PLC[C]//Proceedings of 2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems. California, UAS: IEEE Press, 2009: 267-270.

编辑: 张俊