

# 弛豫铁电单晶光传感器噪声的处理

殷晓敏<sup>1,2</sup> 徐婷婷<sup>3</sup> 丁俊民<sup>1,2\*</sup> 张 华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>南通大学江苏省专用集成电路设计重点实验室, 江苏 南通 226019

<sup>2</sup>中国科学院传感技术联合国家重点实验室, 上海 200050; <sup>3</sup>上海贝尔股份有限公司, 上海 201206

**摘要** 新型热释电材料弛豫铁电单晶(PMN-PT), 其具有优异的压电效应和热释电效应, 对外界的干扰也更加敏感, 制成传感器后会产生更多的噪声。针对新型红外传感器读出信号中噪声的产生机理、特点进行了分析与研究, 利用计算机仿真出的带有白噪声和  $1/f$  噪声, 信噪比为 0 dB 左右的读出信号模型, 分别使用自相关算法和小波降噪算法对其进行降噪处理, 最后使用现场可编程门阵列(FPGA)实现了对实测信号的小波去噪。结果表明, 自相关算法只能降低白噪声, 降噪后信噪比提高了 5.5 dB; 小波降噪算法对温度噪声、白噪声和  $1/f$  噪声等都有效果, 降噪后信噪比提高了 15 dB。

**关键词** 信号处理; PMN-PT; 红外传感器; 自相关算法; 小波变换

中图分类号 TN911.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.010401

## Processing of Noise in Infrared Sensor Made from PMN-PT

Yin Xiaomin<sup>1,2</sup> Xu Tingting<sup>3</sup> Ding Junmin<sup>1,2</sup> Zhang Hua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Jiangsu Provincial Key Laboratory of Application Specific Intergrated Circuits Design, Nantong University, Jiangsu, Nantong 226019, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Transducer Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

<sup>3</sup>Alcatel-Lucent, Shanghai 201206, China

**Abstract** The new infrared material  $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$  (PMN-PT) has more sensitivities and noises because of its perfect piezoelectric and pyroelectric performances. The characteristic noises in the new infrared sensor are analyzed. We use the algorithm of auto-correlation and wavelet transform to analyze the model of readout signal with white noise and  $1/f$  noise at 0 dB simulated by computer. The noise of actual signal is reduced by wavelet transform through field-programmable gate array (FPGA). The result shows that the auto-correlation can only reduce white noise, and the signal-to-noise ratio (SNR) of the signal after de-noise is improved by 5.5 dB. While the wavelet transform can reduce temperature noise, white noise and  $1/f$  noise. The SNR of the signal after de-noise is improved by 15 dB.

**Key words** signal processing; PMN-PT; infrared sensors; auto-correlation; wavelet transform

**OCIS codes** 040.3060; 040.1880; 100.7410

## 1 引言

中国科学院上海硅酸盐研究所<sup>[1]</sup>使用了改进的 Bridgman 方法, 生长出了大尺寸, 高质量的弛豫铁电单晶材料  $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$  (PMN-PT)。这种材料对红外线的吸收大, 具有较高的电流响应优值、电压响应优值和探测优值; 在宽的频率及温度范围内具有大的热释电响应等综合性能, 远远优于传统的热释电材料。其制成的红外探测器具有探测优值高、性能稳定和功耗低等优点。

提高基于 PMN-PT 红外光传感器的性能, 关键在于提高其输出信号的信噪比。首先需要分析新型红外传感器中噪声的种类、特点及产生的机理, 由于在探测过程中存在很多不确定性, 噪声及干扰也存在不确定性, 只能确定传感器中器件的噪声及读出电路中的噪声。接着寻找合适的数字信号处理算法对噪声进行降噪处理。本文尝试着用自相关算法和小波变换的方法对读出信号进行处理, 通过 MATLAB 仿真对比其降噪性能。

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60837003)资助课题。

作者简介: 殷晓敏(1984—), 女, 硕士, 助教, 主要从事光信息传输与处理方面的研究。E-mail: xiaomin1226\_2006@163.com

\* 通信联系人。E-mail: ding.jm@ntu.edu.cn

## 2 传感器噪声分析

当黑体的频率调制到 10 Hz 时,热释电性能较好,输出信噪比最高<sup>[1]</sup>。包含的主要有温度噪声、热噪声、 $1/f$  噪声、复位(KTC)噪声和运放电压噪声等<sup>[2]</sup>。这些噪声主要分为两大类,一类是白噪声,是一种功率谱密度为常数的随机信号或随机过程,即此信号在各个频段上的功率是一样的。另一种是随着频率变化的噪声,该类噪声的特点是随着信号频率的增加而减小。这就意味着在低频段,噪声的分量将占有很大部分,甚至可能将信号完全淹没。

温度噪声是材料通过热传导和热辐射与环境进行热交换时,产生的材料温度无规则起伏,其噪声电压为

$$V_T = \frac{R_V}{\eta} (4kT^2 g_R)^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $\eta$  为辐射吸收系数, $k$  为玻尔兹曼常数, $T$  为材料的绝对温度, $R_V$  为电压响应率, $g_R$  为探测器单位面积辐射传导率。热噪声是由于温度变换引起的晶体表面电子不规则运动而产生的电压噪声。热噪声电压功率谱密度表达式为

$$S_V(f) = 4kTR, \quad (2)$$

式中  $R$  为电阻。可以看出热噪声电压功率谱密度与频率无关,即属于白噪声。

$1/f$  噪声存在于所有有源器件中,对于半导体器件,它与载流子散射几率的涨落有关,是一种低频噪声,主要出现在 1 kHz 以下。其功率谱密度为

$$S_{1/f}(f) = AI^\beta/f^\gamma, \quad (3)$$

式中  $I$  为通过器件的电流, $f$  为频率;参数  $A$  由器件结构特性决定;常数  $\gamma = 0.8 \sim 1.2$ ,典型值为 1.0;  $\beta = 2.0$ (均匀材料)或  $1.0 \sim 2.0$ (结构较复杂的器件)。KTC 噪声是由电路结构和电路工作方式引起的,由金属氧化物半导体(MOS)晶体管导通时沟道电阻引入,与器件中流过的直流电流无关。其噪声电压大小为

$$V_{KTC} = (kT/C_P)^{1/2}, \quad (4)$$

式中  $C_P$  为前置放大器输入端电容。

由于  $1/f$  噪声是一类具有长程相关性、自相似性以及非平稳性的随机噪声。其非平稳性要求进行时间分析,自相似性又要求进行尺度分析,而小波的多分辨率分析兼具有时频分析和尺度分析的功能,因此成为研究  $1/f$  噪声的良好工具<sup>[3]</sup>。

## 3 数字信号处理降噪

### 3.1 自相关算法去噪

自相关函数也称之为自协方差方程,用来描述信息在不同时间  $\tau$  的信息函数值的相关性。

$$R_f(\tau) = f(\tau) * f^*(-\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t+\tau)f^*(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f^*(t-\tau)dt, \quad (5)$$

式中  $*$  为卷积算符, $f^*$  为取共轭。弛豫铁电红外探测器读出信号中的输入电阻热噪声,KTC 噪声,散粒噪声都属于白噪声。白噪声的自相关函数为  $r_m = E[n(t)n(t-\tau)] = \delta(\tau)$ ,当  $\tau = 0$  时  $r_m$  具有最大值,当  $\tau \neq 0$  时  $r_m = 0$ 。若使用自相关算法处理信号中的白噪声,则效果非常明显。

### 3.2 小波变换去噪

小波去噪的过程为:

1) 小波分解。选择正交小波(db4)基,对信号进行  $N$  尺度正交小波分解,得到各个尺度的小波系数<sup>[4]</sup>。

2) 阈值滤波。确定各个尺度下高频细节信号的阈值,进行量化处理。选取阈值的公式为

$$V_{th_j} = \gamma \sqrt{\text{median}(|d_j(k)|)}/0.6745 \sqrt{2 \lg\{\text{length}[d_j(k)]\}/\ln(j+1)}, \quad (6)$$

式中  $\gamma$  为噪声功率谱参数, $d_j(k)$  为第  $j$  层小波细节系数, $j$  为小波分解的尺度。

本文在阈值的选取方法上进行改进,小波固定阈值为  $V_{th} = \gamma\sigma \sqrt{2 \lg\{\text{length}[d_j(k)]\}}$ , $\sigma$  为噪声的标准偏差,估计噪声的方法是取细节系数在各个尺度下绝对值的中位数值  $\text{median}[|d_j(k)|]$ ,然后将该中位数除以常数 0.6745 作为该尺度下细节系数中噪声强度的估计,即  $\sigma = \text{median}[|d_j(k)|]/0.6745$ <sup>[5]</sup>。由于在红外探

测器读出信号中存在多种未知种类的噪声,本文采用了计算细节系数在各尺度下的中位数值再除以0.6745作为噪声的标准差。针对热释电红外探测器读出信号中的噪声在各个尺度上的分布特点,在不同的尺度取不同的阈值,即  $V_{th}/\ln(j+1)^{[6]}$ 。最后使用软阈值法对各层细节系数进行修正,公式为  $g_j(k) = \text{sgn}[d_j(k)] [ |d_j(k)| - V_{th_j} ]$ 。

3) 小波重构。利用阈值处理后的第一层至第  $N$  层的细节系数和第  $N$  层逼近系数进行重构,得到降噪后的信号。

### 3.3 小波降噪的硬件实现

小波的实质是正交镜像滤波器组,如图1所示。

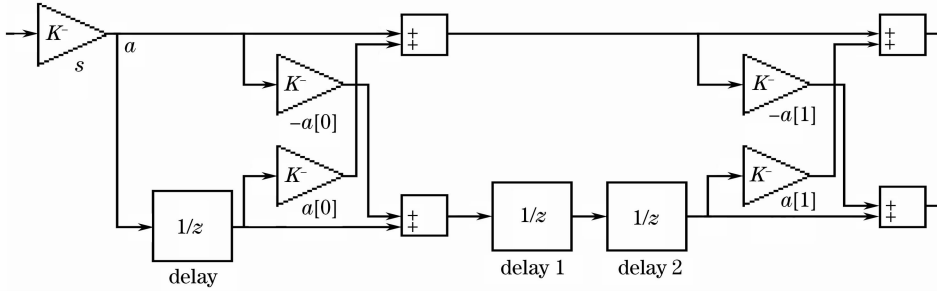


图1 db4小波滤波器网格实现

Fig. 1 Achieve of db4 wavelet filter with grid

小波变换的滤波器系数为<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} G(z) &= (1 + a[0]z^{-1} - a[0]a[1]z^{-2} + a[1]z^{-3})s, \\ H(z) &= (-a[1] - a[0]a[1]z^{-1} - a[0]z^{-2} + z^{-3})s, \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $s = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ ,  $a[0] = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}s}$ ,  $a[1] = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}s}$ , 而镜像滤波器<sup>[8]</sup>的构造必须满足:  $G(-z) = -\hat{H}(z)$ ,

$H(-z) = \hat{G}(z)$ , 计算得图2中逆滤波系数为

$$\begin{aligned} \hat{G}(z) &= (a[1] - a[0]a[1]z^{-1} + a[0]z^{-2} + z^{-3})(-s), \\ \hat{H}(z) &= (1 - a[0]z^{-1} - a[0]a[1]z^{-2} - a[1]z^{-3})(-s), \end{aligned} \quad (8)$$

这种结构可以直接转换成硬件。

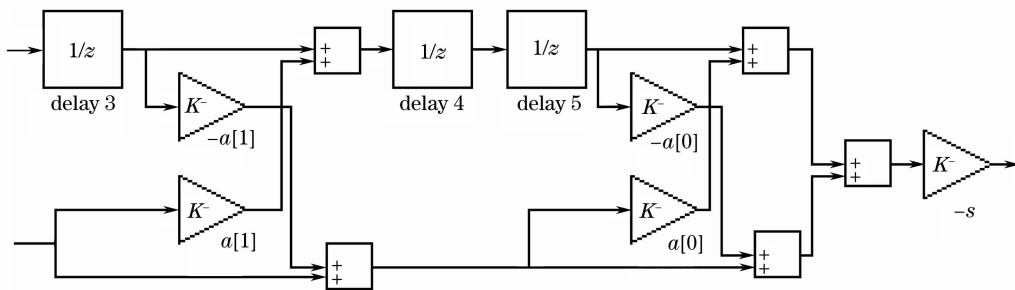


图2 镜像滤波器的实现

Fig. 2 Implementation of the mirror fliter

## 4 自相关与小波降噪结果比较

### 4.1 自相关算法结果

假设输入的有用信号模型为  $s(t) = A\sin(2\pi\omega t)$ , 经过红外探测器读出电路放大以后的信号为

$$x(t) = A\sin(2\pi\omega t) + \omega(t) + f(t), \quad (9)$$

式中  $\omega(t)$  表示均值为零的高斯白噪声,  $f(t)$  表示  $1/f$  噪声<sup>[9]</sup>。在原始信号模型上加上白噪声和  $1/f$  噪声, 信噪比为 0 dB 左右, 如图3所示。

由于  $1/f$  噪声是时间上相关的噪声,自相关算法只对白噪声有效,所以无法降低信号中的  $1/f$  噪声。根据信噪比公式  $20\lg(V_s/V_n)$ ,经过自相关算法以后信号的信噪比提高了 5.5 dB,如图 4 所示。

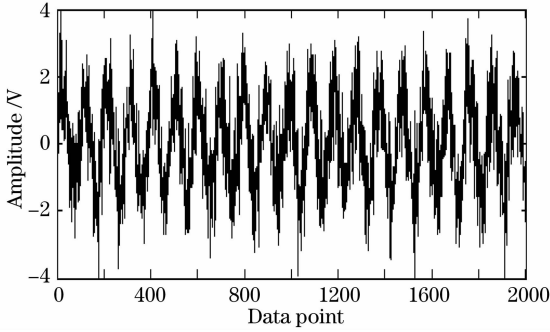


图 3 带白噪声和  $1/f$  噪声的读出信号

Fig. 3 Readout signal with white noise and  $1/f$  noise

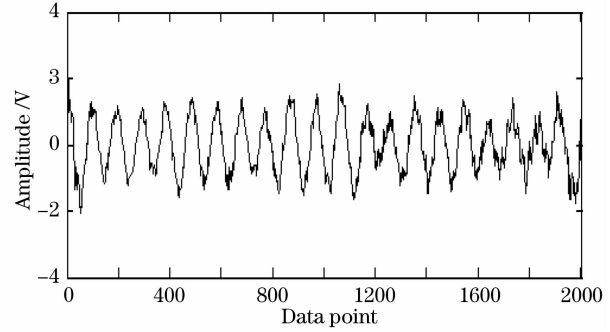


图 4 自相关算法处理后的信号

Fig. 4 Readout signal after auto-correlation

#### 4.2 小波变化结果

对图 5 带噪信号用 db4 小波进行 5 层分解<sup>[10]</sup>,选取噪声功率谱参数  $\gamma$  为 1.0。在 5 层小波分解以后低频逼近信号的数据长度为 69 点,使得重构时有足够的原始数据。

小波降噪以后信号的信噪比提高了 15 dB。通过信号模型可以看出小波变换降噪的方法可以降低信号中平稳或非平稳的加性噪声,能够最大程度地还原信号的本来面目。

弛豫铁电单晶红外探测器的实际读出信号如图 6 所示,采样长度为 2500 点,采样间隔为 0.0001 s。对此信号使用 db4 的 5 层正交小波变换,噪声功率谱参数  $\gamma$  为 0.4。

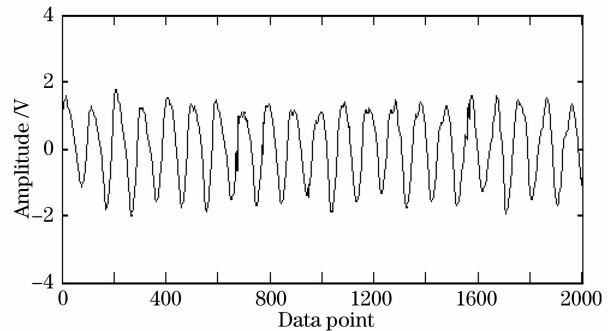


图 5 小波去噪后的信号

Fig. 5 Readout signal after wavelet

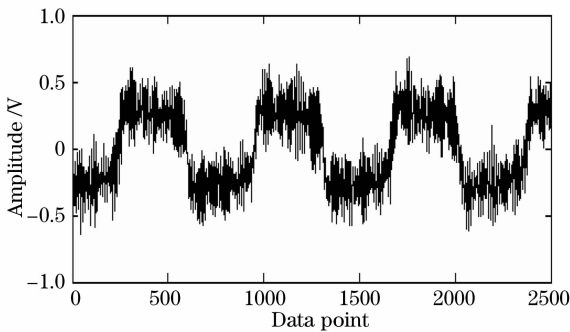


图 6 探测器实际读出信号

Fig. 6 Real signal of detector

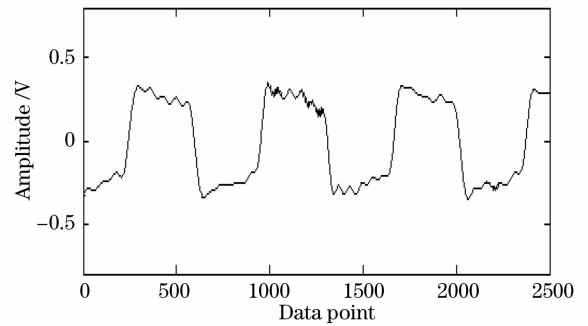


图 7 小波降噪处理后的信号

Fig. 7 Real signal after wavelet

从图 6,7 可以看出,实测信号的信噪比较低,读出信号中只能判断其大概的频率及波形,无法看出其细节特征。通过小波变换去噪声以后,将信号能量集中的频率段保留或者减去一个较小的权重,而在其他频段的小波系数减去本设计中改进的阈值,即降低噪声含量。处理以后的信号特征可被辨别出,从图 7 可以看出乃是方波加正弦波调制。用小波的多分辨率的特点对红外焦平面读出信号做降噪处理,证明小波变换在实际信号的降噪上同样有很好的效果。

#### 4.3 硬件测试结果

现场可编程门阵列(FPGA)采用 Altera 公司 Cyclone II 系列的 EP2C35。为了验证小波去噪声模块能否降低信号中的噪声,使用信号片段的处理结果与通过 MATLAB 处理的信号片段相比较。使用硬件描述语言的小波去噪声模块处理后的信号如图 8 所示。

通过 signal tap 获得了硬件仿真图, signal\_wire 为实际噪声信号的一部分, dac\_data\_o 为经过小波变换去噪后的波形。可以看出经过去噪算法以后输出信号中的噪声有明显改善, 说明了基于小波变换的弛豫铁电红外读出信号的降噪具有可实现性。

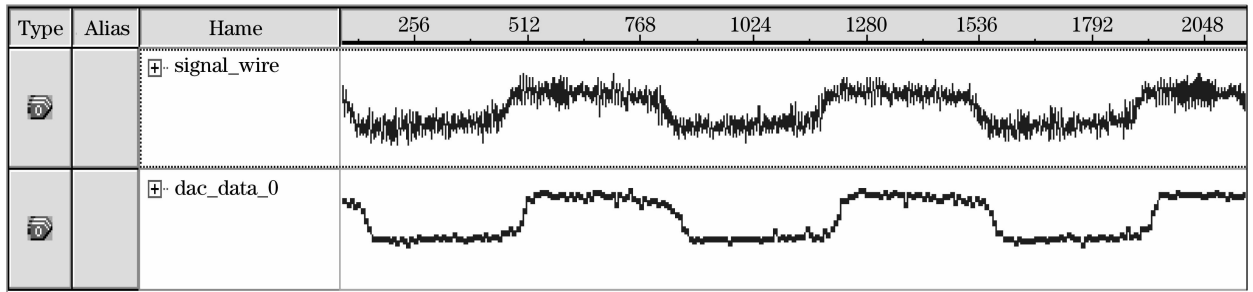


图 8 小波去噪的 FPGA 实现

Fig. 8 FPGA implementation of wavelet

## 5 结 论

对弛豫铁电红外探测器中的温度噪声、热噪声以及  $1/f$  噪声做了分析与研究。针对弛豫铁电红外探测器中噪声的特点, 通过对比, 选择合适的小波基函数和小波阈值, 用小波变换的方法来降低信号中的噪声含量。结果表明, 小波变换可以通过信号和噪声的不同特点进行滤波, 且具有硬件的可实现性。在频率域内分辨率高时, 时间域内分辨率低, 在时间域分辨率高时, 在频率域内分辨率低, 即通过这种手段达到了信噪分离的目的。FPGA 的实现为该传感器的大规模数字化应用打下了基础。

## 参 考 文 献

- 1 Yanxue Tang, Xiangyong Zhao, Xiqi Feng *et al.*. Pyroelectric properties of [111]-oriented  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(8): 082901
- 2 Wang Xianya, Chen Qian, Gu Guohua. Real-time infrared noise reduction based on anisotropic diffusion method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 176~179  
王娴雅, 陈 钱, 顾国华. 一种新的各向异性扩散红外噪声实时抑制算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 176~179
- 3 Hu Guangshu. Modern Signal Processing Guide[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 397~405  
胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 397~405
- 4 Wang Aiping, Wang Huinan.  $1/f$  noise eliminating based on wavelet analysis[J]. *J. Data Acquisition & Processing*, 2006, **21**(2): 217~220  
王爱萍, 王惠南. 基于小波分析的  $1/f$  噪声降噪[J]. *数据采集与处理*, 2006, **21**(2): 217~220
- 5 Jiang Qinxian, Wu Fumei. Robust estimation for FOG data based on wavelet threshold de-noising[J]. *Chinese J. Sensors and Actuation*, 2009, **22**(11): 1596~1601  
蒋庆仙, 吴富梅. 基于小波阈值消噪的光纤陀螺信号的抗差估计[J]. *传感技术学报*, 2009, **22**(11): 1596~1601
- 6 Zhao Ruizhen, Song Guoxiang. An improved method for white noise reduction based on wavelet transform[J]. *J. Xidian University*, 2007, **27**(5): 619~622  
赵瑞珍, 宋国乡. 一种基于小波变换的白噪声消噪方法的改进[J]. *西安电子科技大学学报*, 2000, **27**(5): 619~622
- 7 Uwe Meyer-Baese. Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays[M]. New York: Springer, 2001
- 8 Jia Weimin, Yao Minli. Two channel filter banks and wavelet transform[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2004, **24**(3): 249~252  
贾维敏, 姚敏立. 双通道滤波器组与小波变换[J]. *核电子学与探测技术*, 2004, **24**(3): 249~252
- 9 Li Guang, Yu Shenglin. Presentation of  $1/f$  noise based on wavelet transform[J]. *J. Data Acquisition & Processing*, 2003, **18**(1): 119~122  
李 光, 于盛林. 基于小波变换的拟  $1/f$  信号生成[J]. *数据采集与处理*, 2003, **18**(1): 119~122
- 10 Li Xiang, Zhang Guangjun, Li Qingbo. An improved wavelet analysis preprocessing method applied to mid-IR blood glucose non-invasive measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 479~584  
李 响, 张广军, 李庆波. 一种血糖红外无创检测的改进小波预处理方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 479~584