

文章编号: 0253-2239(2009)03-0838-06

一种基于小波变换的太赫兹时域光谱分析方法

余倩 赵跃进 于飞 刘小华 张亮亮 董立泉

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要 传统太赫兹光谱傅里叶分析法要求必须先测量出无样品时的 THz 信号作为参考信号,对测量环境要求高,提出了一种基于小波变换的太赫兹时域光谱信号处理方法,以简化太赫兹光谱测量的步骤。对空气中直接测得的样品光谱信号进行去噪预处理,然后利用 Coiflets 正交小波基进行多尺度下的小波分解,进而计算出各样品不同尺度下的小波多分辨信息熵,得到表征样品的特征信息。实验结果表明,在太赫兹频段,不同样品的小波多分辨信息熵值差异显著,同一样品则保持稳定;不同湿度下光谱信号的小波熵值重复性好,平均偏差小于 0.05。

关键词 光谱学; 光谱分析; 小波变换; 太赫兹; 小波多分辨信息熵

中图分类号 O433.4; O657.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0838

Method for Terahertz Time-Domain Spectral Analysis Based on Wavelet Transform

Yu Qian Zhao Yuejin Yu Fei Liu Xiaohua Zhang Liangliang Dong Liquan

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The conventional terahertz spectral analysis based on Fourier transform needs to measure the terahertz reference signal without samples, and the terahertz spectra measurement is required in nitrogen. A novel method for terahertz time-domain spectral analysis based on wavelet transform is proposed to reduce terahertz spectral measurement steps. Firstly, the de-noising process about the spectroscopic data of the sample is achieved, and then the multi-scale wavelet-transform is realized by Coiflets wavelet base. The wavelet multi resolution entropies of samples under different wavelet decomposition scales are calculated, and the characteristic information describing samples is obtained directly. The experimental results indicate that the wavelet multi-resolution entropies, which are observably different between different samples but adequately stable between the same samples, can provide a valid quantitative criterion for the materials recognition. Spectral signal's wavelet multi-resolution entropies have good repetition in different humidity, and the average variance of the wavelet multi-resolution entropies is smaller than 0.05.

Key words spectroscopy; spectral analysis; wavelet transform; terahertz; wavelet multi-resolution entropy

1 引 言

利用光电导激发机制或光整流效应激发 THz 辐射源产生脉冲 THz 辐射,再利用光导天线法或电光取样技术进行 THz 探测,构成了 THz 时域光谱技术(THz-TDS)^[1]。它本质上是一种相位相干电磁辐射探测技术,能直接探测 THz 波与物质相互作用的电场信息^[2]。由于许多大分子物质的振动能级

或转动能级间距正好处于 THz 的频带范围,利用 THz 时域光谱系统进行物质光谱测量是一种非常有效的光谱测量手段^[3]。

对探测到的 THz 信号进行光谱分析,可获得物质的光学特性参数,这些参数是利用 THz 时域光谱系统进行物质检测和识别的重要前提。目前常用的 THz 时域光谱分析方法是 THz 光谱傅里叶分析

收稿日期: 2008-05-30; **收到修改稿日期**: 2008-08-25

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(10390160)资助课题。

作者简介: 余倩(1984—),女,硕士研究生,主要从事太赫兹检测技术及数据处理方面的研究。

E-mail: yuqian_0201@163.com

导师简介: 赵跃进(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光学测量、太赫兹探测技术、精密仪器设计及图像处理等方面的研究。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn (通信联系人)

法,分别测量不放样品和放置样品后的 THz 信号,通过傅里叶变换并进行一系列计算,从而获得样品光学特性参数^[4]。该方法中,物质在 THz 频段独特的吸收峰位可作为识别物质的特征参数。由于 THz 光谱傅里叶分析法必须先测量出无样品时的 THz 信号作为参考信号,测量过程无法一次性完成;同时,空气中水蒸气在 THz 频段的强烈吸收会引起光谱震荡,而傅里叶变换本身对信号的频谱辨析能力有限。为确保分析结果的准确度,光谱测量通常要求在氮气环境中进行。这些因素都造成了系统实时性较差,检测方法较复杂、频谱辨析能力较低等弊端。

本文提出了一种基于小波变换的 THz 时域光谱信号处理方法,将小波多分辨信息熵应用到物质辨析中,通过计算爆炸物 THz 时域光谱信号的小波多分辨信息熵,并分析不同湿度环境下探测信号小波多分辨信息熵值的重复性。结果表明小波多分辨信息熵能有效表征物质的特征信息。因此,小波分析法在 THz 时域光谱信号分析和物质鉴别方面具有较大的优势和较好的应用前景。

2 THz 时域光谱信号的小波分析方法

基于傅里叶变换的光谱分析方法在傅里叶变换的过程中丢掉了光谱信号的时间信息,无法实现信号的时-频分析,尤其在分析非平稳信号时,傅里叶分析法并非是一种理想的方式^[5]。而 THz 时域光谱的信号就是一种非平稳信号,在时间上的延迟,信号强度的衰减,频谱的展宽等都反映了被测物体的吸收,色散等特性,如图 1 所示。因此,使用傅里叶分析法进行物质检测时精度并不理想。为了更好地研究 THz 信号的偏移、趋势、突变等特征,本文提出了一种基于小波变换的 THz 时域光谱信号处理方法。

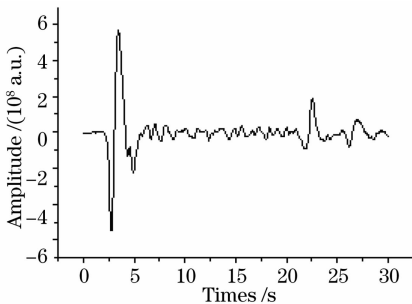


图 1 THz 时域光谱信号

Fig. 1 Terahertz time-domain spectral signal

对于在空气环境中测得的 THz 光谱信号,经由小波去噪处理后,进行多尺度下的小波分解,进而计

算出各样品不同尺度下的小波多分辨信息熵,即可得到表征样品的特征信息。其中,对光谱信号进行小波去噪处理,主要是解决空气环境中测得的 THz 光谱信号因水蒸气对 THz 波的强烈吸收而导致光谱信号震荡严重的问题。小波去噪在信号预处理中已得到广泛应用^[6~10],在消除空气中由水蒸气吸收引起的光谱振荡方面也具有良好效果^[11],相关原理和分析过程本文不再赘述。

2.1 小波变换

小波变换是把某一函数在特定的空间内按照小波基展开和逼近。小波变换可同时进行时域和频域的分析,在时频域都具有很强的表征信号局部特征的能力。因此小波变换是进行信号时频分析的重要方式。

对于任意的函数或者信号 $f(x)$,其小波变换定义为

$$w_f(a, b) = \int_{\mathbb{R}} f(x) \psi_{(a, b)}(x) dx = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbb{R}} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (1)$$

式中 $\psi_{(a, b)}(x)$ 为有母小波 $\psi(x)$ 伸缩和平移得到的一族分析小波函数。参数 b 表示分析的时间中心或时间点,而参数 a 体现的是以 $x = b$ 为中心的附近范围的大小。小波变换 $w_f(a, b)$ 体现的是原来的函数或信号 $f(x)$ 在 $x = b$ 点附近随着分析和观察的范围逐渐变化时表现出来的变化情况。由此可见,小波变换具有时频局部化和多分辨特性^[12]。

2.2 小波多分辨信息熵

在信息论中,熵的概念是从平均意义上表征了随机对象的总体信息测度。传统的信息熵无法分析一些突变或非平稳信号,这时引入小波分析技术就能解决这一问题。因为它是一种信号的时间尺度(时间频率)分析方法,具有多分辨率分析的特点。不同信号在时频分布上的差异表现为时频平面上不同的小块时频段的能量分布的差异,各时频区能量分布的均匀性则反映了各种被测样品特性的差别^[12]。

信号 $f(x)$ 经过多尺度小波分解后,可分别得到各尺度下的小波分量,设在分解尺度 j 下,多分辨率分析的离散小波分量为 $D = \{D(k), k = 1, 2, \dots, N\}$, N 为小波分量系数的个数。在此小波分量上定义一滑动窗口,设窗宽为 $w \in N$,滑动因子为 $d \in N$, M 为当窗宽为 w 、步长为 d 时,窗口在小波分量上的移动次数,则滑动窗为

$$W(m, \omega, d) = \{D(k), k = 1 + md, 2 + md, \dots, \omega + md\}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中 $M = (N - \omega)/d, M \in N$ 。将滑动窗划分为如下 L 个区间:

$$W(m, \omega, d) = \bigcup_l^L Z_l, \quad (3)$$

式中 $Z_l = (S_{l-1}, S_l), l = 1, 2, \dots, L, S_0 < S_1 < \dots < S_L$ 。

$$S_0 = \min[W(m, \omega, d)] = \min\{[D(k), k = 1 + md, \dots, \omega + md]\}, \quad (4)$$

$$S_L = \max[W(m, \omega, d)] = \max\{[D(k), k = 1 + md, \dots, \omega + md]\}, \quad (5)$$

每一窗内信号能量分布的概率为

$$p^m(Z_l) = E_k/E, \quad (6)$$

式中 E_k 为落于窗口 Z_l 内的信号能量, E 为信号的总能量, 则多分辨统计熵 MRE (Multi-resolution entropy) 定义为

$$H_{\text{MRE}}(m) = - \sum p^m(Z_l) \lg[p^m(Z_l)], \quad (7)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

每一尺度, 可相应计算其 H_{MRE} , 它对信号的变化具有较强的检测和定位能力。

2.3 THz 信号小波多分辨信息熵分析

对于在空气中环境中直接探测到的 THz 时域信号(如图 1 所示), 为消除水蒸气对光谱信号的影响, 须先利用小波去噪的方法进行预处理, 再经过多尺度的小波变换后得到各尺度下相应的小波系数 $D = \{D(k), k = 1, 2, \dots, N\}$ 。尺度较大时表征 THz 信号趋势信息, 尺度较小时表征 THz 信号细节信息。根据小波系数的点数 N 、分布状况设置窗宽 ω 和滑动因子 d , 可知窗口的滑动次数为 $M = (N - \omega)/d$, 参数选择依据相邻窗口信号能量差小于某一阈值的原则, 首先计算各个窗口内的能量值:

$$E_k = \sum_{k=i}^{i+\omega-1} D(k)^2, \quad (8)$$

式中 $D(k), k = i, i+1, \dots, i+\omega-1, i = 1, 2, \dots, M$ 为落于窗口内的小波系数, 对于正交小波变换, 变换后各尺度的能量可直接由其小波系数的平方得到, 即

$$E = \sum_{k=1}^N D(k)^2, \quad (9)$$

窗内 THz 信号小波系数分布的概率为

$$p^m = E_k/E, \quad (10)$$

将可能的概率进行叠加, 得到 THz 信号小波多分辨信息熵为

$$W_E = - \sum_{l=1}^L p^m \ln p^m. \quad (11)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

由于小波多分辨信息熵的计算量和算法复杂性

将随着分解级数的增加而增加, 先按较小分解级数对 THz 信号进行分解, 计算其不同尺度上的信息熵, 根据相邻尺度 j 上和 $j+1$ 上熵的相近程度来决定是否进一步进行小波分解。若第 j 层小波多分辨信息熵和第 $j+1$ 层小波多分辨信息熵差值小于 5%, 则停止分解。

3 实验结果与分析

在实验室条件下, 利用脉冲 THz 时域光谱成像系统对三种爆炸物: HMX, DNT, RDX 进行时域光谱扫描测量。测量直接在空气环境中进行, 装置所处的实验室环境温度为 21℃, 湿度为 40%。实验样品的制备采用压片方式, 首先将三种爆炸物研磨后分别与聚乙烯粉末按 9 种不同比例均匀混合, 从而使每一样品具有 9 种不同的纯度, 其范围为 50%~90%。再利用红外压片机分别将其制成厚度为 1 mm, 直径为 1.3 mm 的圆形薄片, 并将同一纯度的样本一同放入正方形塑料容器, 如图 2 所示。容器材料对 THz 几乎没有吸收, PE 为聚乙烯粉末作为对比信号。设置好样品平移台相应的扫描参数。本实验中, 设置扫描点数为 52×49 , 可同时获得 52×49 个与图 1 类似的 THz 时域光谱信号。然后提取每个信号的时域最大值进行图像重构, 如图 3 所示。

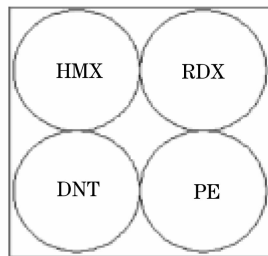


图 2 样品放置分布图

Fig. 2 Schematic illustration of the four samples

根据图像重构的结果, 分别选取该纯度下三种爆炸物对应的某一光谱数据作为待处理的样本, 在计算小波多分辨信息熵前, 首先对 THz 探测信号进

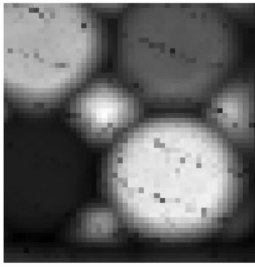


图3 时域最大值重构图

Fig. 3 Image of the sample targets formed by extracting the maximum of the terahertz time-domain signal. 行阈值选择并采用小波阈值去噪的方法对信号进行预处理^[13]。

根据小波多分辨信息熵的定义,选用具有有限冲激响应滤波器的正交小波 Coiflets 将光谱信号进行 3 级小波分解,其中某一样本的一级的小波系数

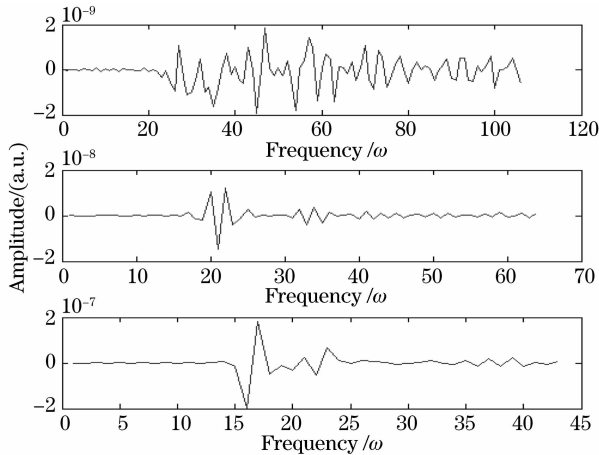


图4 某个样本的 THz 时域信号经 3 级小波分解后各级系数分布

Fig. 4 Wavelet coefficients of the terahertz time-domain signal of a swatch obtained by three-scale wavelet transform

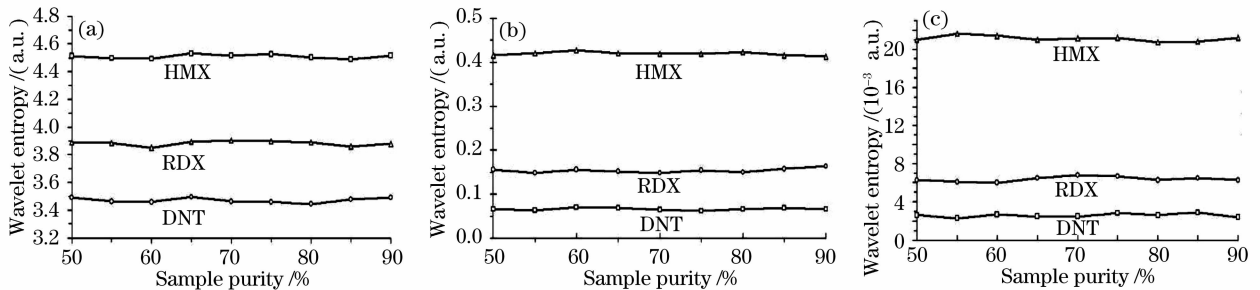


图5 尺度 1 (a), 尺度 2 (b), 尺度 3 (c) 下 3 种信号的小波多分辨信息熵曲线

Fig. 5 Wavelet multi-resolution entropy curve of three kinds of samples under scale 1 (a), scale 2 (b), scale 3 (c)

表 2 中平均偏差反映了各个尺度下小波多分辨信息熵波动的剧烈程度,信号在尺度 j 下的平均偏差定义为

$$\delta_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_i - a_{\text{mean}}| / a_{\text{mean}}, \quad (12)$$

式中 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为信号在尺度 j 下, n 种不同

如图 4 所示。根据小波系数分布状况和小波多分辨信息熵算法原则,选择窗宽 ω 为 4,滑动因子 d 为 2 进行多分辨率小波多分辨信息熵的计算。

由于是三级小波分解,所以每个样本可获得三维特征向量。类似地,对其余 8 种纯度的样品进行光谱测量和小波多分辨信息熵的计算,并将其结果由图 5 表示如下。图 5 分别是不同纯度的三类样品的 THz 信号在尺度为 1、2、3 下的小波多分辨信息熵。图中横坐标为样本的纯度,纵坐标为三类样品不同纯度所对应小波多分辨信息熵值。

由图 5 可知,不同样品的小波多分辨信息熵值存在着明显的差异性,同一样品不同含量时小波多分辨信息熵亦能保持稳定。可见被测样品纯度的变化只会导致测得光谱信号强度的变化,不会影响其光谱波形,而小波熵是对光谱特征信息的统计,具有归一化的特点。信号在不同分解尺度下分布不同,且随着频率复杂度的增加,其小波多分辨信息熵值也增加。不同尺度间的能量(方差)分布差异,既能发挥小波在时频局域化分析中的特点,又能表征随机信号整体的结构和有序性,对探测信号的微小变化具有独特的敏感性,将上述三类样品不同含量时的小波熵向量取均值后得

$$\mathbf{H}_{\text{HMX}} = [3.4721 \quad 0.1538 \quad 0.0064],$$

$$\mathbf{H}_{\text{RDX}} = [4.5101 \quad 0.0656 \quad 0.0026],$$

$$\mathbf{H}_{\text{DNT}} = [3.8830 \quad 0.4192 \quad 0.0211].$$

该向量可作为表征三种爆炸物质的特征向量模板。但由于环境湿度是影响 THz 光谱测量精度的重要因素,为考察小波多分辨熵受测量环境湿度变化的影响程度,本文还对不同湿度环境下测得的无样品时的 THz 信号进行了小波多分辨信息熵的计算,见表 1。对数据的重复性进行了分析,如表 2 所示。

湿度所对应的小波熵, a_{mean} 为该尺度下 n 种湿度的平均小波熵。可见各个尺度的小波熵的偏差均小于 0.05, 表明不同湿度下的小波多分辨信息熵值重复性好。该结果说明, 当环境湿度改变时, 利用小波多分辨信息熵来表征物质特征信息是可行性的。所以, 上述计算得到的 3 维小波熵向量可以作为 3 类爆炸物质的特征量, 以用于物质识别。THz 探测信号的小波多分辨信息熵具有多维特性, 能有效提高描述信号特征信息的准确性, 从而构成 THz 物质检测的有效定量判据, 在模式识别的过程中, 亦能有效降低误判率。

表 1 探测信号在不同湿度条件下的小波多分辨信息熵

Table 1 Wavelet multi-resolution entropy of the terahertz signal under different humidities

| Different humidity / % | Decomposition scale 1 (wavelet entropy) | Decomposition scale 2 (wavelet entropy) | Decomposition scale 3 (wavelet entropy) |
|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 3.80 | 2.2523 | 0.1218 | 1.1133×10^{-4} |
| 5.05 | 2.2012 | 0.1212 | 1.1074×10^{-4} |
| 8.70 | 2.2323 | 0.1313 | 1.0751×10^{-4} |
| 12.75 | 2.3507 | 0.1202 | 1.1454×10^{-4} |
| 16.05 | 2.1939 | 0.1278 | 0.9713×10^{-4} |
| 25.50 | 2.2429 | 0.1298 | 1.0932×10^{-4} |
| 29.35 | 2.3585 | 0.1209 | 1.0863×10^{-4} |
| 34.90 | 2.1771 | 0.1329 | 1.0806×10^{-4} |
| 37.20 | 2.1719 | 0.1257 | 1.0799×10^{-4} |

表 2 小波熵值波动性分析

Table 2 Fluctuation of wavelet entropy

| | Decomposition scale 1 | Decomposition scale 2 | Decomposition scale 3 |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Average entropy | 2.2423 | 0.1257 | 1.0836×10^{-4} |
| Average variance | 0.0108 | 0.0333 | 0.0481 |

4 结 论

提出了一种基于小波变换的 THz 时域光谱信号分析方法, 实现了 THz 时域光谱物质检测信号的定量描述。使用这种方法进行 THz 时域光谱物质检测时, 不仅无需测量参考信号波形, 直接对样品探测信号进行处理和分析就可以获得与被测物相应的 THz 光谱特征量; 而且与传统的傅里叶分析方法相比, 由于小波变换在分析和刻画非平稳信号方面具有良好的特性, 基于小波变换的 THz 时域光谱信号分析法在分析 THz 信号非平稳特征方面具有更大的优势。通过小波去噪、多级小波分解和小波多分辨信息熵的计算, 即使直接在空气中进行物质测量,

亦能经过数据处理获得被测物相对精确的 THz 光谱特征信息。同时, 由于这种方法无须测量参考信号, 因此可以简化测量过程, 提高检测效率和检测精度。

对 3 种爆炸物进行的 THz 时域光谱检测实验, 证明小波多分辨信息熵可以对被测物质的检测信号特征进行准确描述, 进而完成被测物的识别。因此, 使用本文提出的方法可以快速、准确地分辨出所要检测的物质。但使用这种方法进行物质检测时, 需要事先获得被测物质的小波多分辨信息熵作为其特征模板。当建立起完整的物质特征模板库后, 就可以将其集成到 THz 时域光谱分析系统中, 实现实时的物质检测。

参 考 文 献

- Li Fuli, Ren Rongdong, Wang Xinke *et al.*. The theory and some applications of terahertz radiation[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(suppl.): 785~791
李福利, 任荣东, 王新柯等. 太赫兹辐射原理与若干应用[J]. 激光与红外, 2006, **36**(增刊): 785~791
- Ming Li, Fortin J, Kim J Y *et al.*. Dielectric constant measurement of thin films using goniometric terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Quant. Electron., IEEE*, 2001, **7**(4): 624~629
- Zhao Hongwei, Ge Ming, Wang Wenfeng *et al.*. Application of terahertz time-domain spectroscopy in chemistry and biology[J]. *Chemistry*, 2005, **6**(2): 87~90
赵红卫, 葛敏, 王文峰等. 太赫兹时域光谱技术在化学和生物研究中的应用 [J]. 化学通报, 2005, **6**(2): 87~90
- Zhang Liangliang, Zhang Cunlin, Zhao Yuejin *et al.*. Time-resolved terahertz spectroscopy of explosives[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(8): 1457~1460
张亮亮, 张存林, 赵跃进等. 爆炸性物质时间分辨光谱测量[J]. 光谱学和光谱分析, 2007, **27**(8): 1457~1460
- Zhou Wei, Gui Lin, Zhou Lin *et al.*. Wavelet Analysis Advanced Technology[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Press, 2006. 87~99
周伟, 桂林, 周林等. 小波分析高级技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006. 87~99
- Zhi Yang, Yifan Dai, Guilin Wang. Use of wavelet in specifying optics[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 44~46
- Fu Wei, Xu Shanchuan. An improved algorithm for de-noising in wavelet transform domain [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, **42**(11): 80~84
付炜, 许山川. 一种改进的小波域去噪算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, **42**(11): 80~84
- Yihua Tan, Jinwei Tian, Jian Liu. Adaptively wavelet-based image denoising algorithm with edge preserving[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 80~83
- Guoping Zeng, Ruizhen Zhao. Image denoising using least squares wavelet support vector machines[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 632~635
- Li Suwen, Xie Pinghua, Li Yujing *et al.*. Wavelet transform based differential optical absorption spectroscopy data processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1601~1603
李素文, 谢品华, 李玉金等. 基于小波变换的差分吸收光谱数据处理方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(11): 1601~1603
- Wang Yingxin, Chen Zhiqiang, Zhao Ziran *et al.*. Study on the method of explosives detection based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(4): 587~590

- 王迎新, 陈志强, 赵自然 等. 基于太赫兹时域谱分析的爆炸物检测方法研究[J]. 光学技术, 2007, **33**(4): 587~590
- 12 Li Jianxun, Ke Xizheng, Guo Hua. The application of wavelet variance and wavelet entropy in signal feature extraction[J]. *J. Xi'an University of Technology*, 2007, **23**(4): 365~369
- 李建勋, 柯熙政, 郭华. 小波方差与小波熵在信号特征提取中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2007, **23**(4): 365~369

- 13 Deng Yuqiang, Xing Qirong, Lang Liying *et al.*. Wavelet-transform in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(11): 240~243
- 邓玉强, 邢岐荣, 郎利影 等. THz 波的小波变换频谱分析[J]. 物理学报, 2005, **54**(11): 240~243

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》) 2009 年“*Nanophotonics*”和 “*Digital and Computer-Generated Holography*” 专题征稿启事

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》) 计划于 2009 年 10 月在正刊上推出“*Nanophotonics*”(“纳米光子学”)专题, 特向国内外广大读者以及作者征集该方面原创性的研究论文。征稿范围包括:

- Metamaterials; negative index, cloaking and nonlinear phenomena
- Materials synthesis; molecular architectures for photonic applications, eg. carbon nanotubes, DNA and dendrimers
- Nanofabrication techniques; eg. multiphoton polymerization and nanoimprint technology
- Nanocharacterization methods and instrumentation: Near-field techniques, super-resolution and high temporal resolution
- Nanosensors; resonators and field enhancement strategies for improved sensitivity
- Photonic crystals; spatial and temporal dispersion phenomena with applications and nonlinear effects
- Plasmonics; localized and propagating surface modes, metallodielectrics, fishnet structures
- Quantum confined structures; quantum dots to quantum wells with applications to sources and detectors
- Nanostructures for energy; Dye-sensitization, plasmonic enhancement, organic and carbon based nanomaterials, quantum structures

Feature Editors:

Joseph W. Haus, Director

Electro-Optics Program, University of Dayton, Dayton, USA

Yiping Cui

Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing, China

截稿日期: 2009 年 5 月 30 日

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》) 计划于 2009 年 12 月在正刊上推出“*Digital and Computer-Generated Holography*”(“数字与计算全息”)专题, 特向国内外广大读者以及作者征集该方面原创性的研究论文。征稿范围包括:

- Digital holography theory and systems
- Phase unwrapping
- Computer generated holograms
- Spatial light modulators for holography
- Holographic optical elements
- 2D and 3D pattern recognition
- Three-dimensional imaging and processing
- Three-dimensional display
- 2D-3D content conversion
- Shape and deformation measurement
- Holographic imaging and microscopy
- Holographic Optical Micro-Manipulation

Feature Editor:

Ting-Chung Poon, Ph. D., Professor

Bradley Department of Electrical and Computer Engineering

Virginia Tech

Blacksburg, Virginia 24061 USA

截稿日期: 2009 年 7 月 15 日

投稿方式以及格式: 可直接将稿件电子版发至邮箱: col@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“专题(上述两个专题的具体名称)投稿”), 或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission, 备注中写明具体专题名称, 推荐用此方式投稿), 详情请参见《中国光学快报》网站: <http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿, 其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shcnc.ac.cn 询问。