

基于带通滤波器的激光二极管自混频纳米颗粒干涉测量技术

张秋长 沈建琪 王华睿 陈先庆

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

摘要 激光二极管自混频技术可用于纳米颗粒的测量,采用多通道带通滤波技术分别测量了 180,100,60 nm 三种纳米颗粒,获得自混频信号的频带功率谱(PS-BPF)。作为比较,对实时提取的自混频信号进行傅里叶变换得到功率谱密度(PSD)函数。分别对 PSD 函数和 PS-BPF 反演计算得到颗粒粒径分布。结果显示:两种方法得到的颗粒粒径分布基本一致,并与商用仪器测试结果吻合。对两种处理方式的模式矩阵分析表明,多通道带通滤波技术明显优于 PSD 函数处理方式。

关键词 测量;激光二极管自混频干涉测量;功率谱密度;频带功率谱

中图分类号 O436; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0512001

Measurement Technique on Nanoparticles with Laser-Diode Self-Mixing Interferometry Based on Bandpass Filters

Zhang Qiuchang Shen Jianqi Wang Huarui Chen Xianqing

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract The laser-diode self-mixing interferometry can be employed to measure the sizes of nanoparticles. The standard nanoparticles whose sizes are labeled as 180, 100 and 60 nm are measured and the corresponding power spectra of the self-mixing signals are obtained with a series of bandpass filters. As a comparison, the power spectral densities (PSD) are achieved from the Fourier transform of the self-mixing signals which are recorded in real time. With the inversion algorithm, the particle-size distributions are extracted from either the PSD or the power spectra with bandpass filters (PS-BPF). It is showed that the particle-size distributions obtained from these two methods agree with each other and consist satisfactorily with those measured by the commercial particle-size analyzer. The analysis on the illness condition of modal matrices of these methods indicates that the technique based on bandpass filters is better than that based on the PSD.

Key words measurement; laser-diode self-mixing interferometry; power spectral density; power spectrum with bandpass filters

OCIS codes 120.5820; 290.5850; 290.5820; 140.2020

1 引 言

随着科学技术和生产工艺过程的日益发展和完善,颗粒的粒度有不断减小的趋势。超细颗粒特别是纳米颗粒所体现出来的不寻常特性,使它有着非常广泛的应用背景。在材料科学领域,采用粒度小的组块可以使块状材料强度提高,均匀性改善,并且

具有与众不同的良好性能。在低温物理方面,用超细银颗粒制成的热交换器用于 He³-He⁴ 稀释制冷机,可使最低制冷温度从 30 mK 降低到 2 mK。颗粒体系的粒度决定着其在工艺过程和各种应用过程中的性质和行为。颗粒粒径的测量是颗粒测量中最基本、同时也是最普遍的测量。对颗粒进行测量,

收稿日期: 2011-10-24; **收到修改稿日期**: 2011-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(50876069)、高等学校博士学科点专项科研基金(20093120110006)和上海市科委科技支撑计划(10540501000)资助课题。

作者简介: 张秋长(1984—),男,硕士研究生,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: zqiuzhang@live.cn

导师简介: 沈建琪(1965—),男,博士,教授,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: jqshenk@163.com

尤其是超细颗粒及纳米颗粒的测量,对改善产品质量、控制环境污染和保障人身健康等有着重大的经济意义和深远的社会意义^[1~4]。

纳米颗粒的光学测量主要基于动态光散射原理,利用纳米颗粒的布朗运动特征获取颗粒的粒径信息。广泛采用的是光子相关光谱(PCS)技术和光子互相关光谱(PCCS)技术,这些技术对实验装置的性能要求高,要求稳定的激光源、高灵敏度的光探测器(如光电倍增管)和高性能的信号处理系统(如数字相关器)。最近几年,研究人员将自混频相干(SMI)技术引入纳米颗粒测试技术中,发展了一种基于SMI技术的动态光散射纳米颗粒测量方法^[5~9]。这种方法将颗粒的散射光信号送入激光器的谐振腔放大并与原始光相干得到混频信号。自混频信号反映了纳米颗粒布朗运动的特征,从中可获得纳米颗粒的粒度信息。与PCS和PCCS技术相比较,SMI技术的优点主要体现在:采用了自混频信号放大技术从而降低了对探测器灵敏度的要求;避免了激光源漂移的影响;测量装置结构简单等。

无论是PCS,PCCS技术还是SMI技术,都是研究纳米颗粒布朗运动,探测和处理的都是信号的动态特征。纳米颗粒粒径及其分布的获取,或来源于自相关函数,或来源于功率谱密度(PSD)函数。目

前的测量技术在信号采集方面主要以采集信号序列为主,信号处理由数字相关器或由计算机完成。这要求昂贵的数字相关器、较高的数/模转换(A/D)卡采样速率、较大的计算机储存资源和一定的CPU处理时间,对成本控制和实时测量不利。

本文通过激光SMI技术对标准纳米颗粒进行测量,获取SMI信号。采用多通道带通滤波技术对SMI信号进行处理,得到信号的功率谱曲线即频带功率谱信号(PS-BPF)。对信号功率谱进行反演获得颗粒的粒径分布信息。多通道带通滤波可通过硬件实现,避免了数字相关器的使用,降低对A/D卡的要求、节省信号处理时间和硬件成本,实现对颗粒参数的快速测量。

2 激光自混频的时间相关函数与功率谱函数

如图1所示,半导体激光器(LD)发出的激光被透镜会聚到样品池中的纳米颗粒上,颗粒的后向散射光由同一透镜反馈回半导体激光谐振腔内,与腔内激光发生自混频,小部分自混频信号从激光器后端面射出,被置于后方的光电探测器(PD)侦测到^[10]。

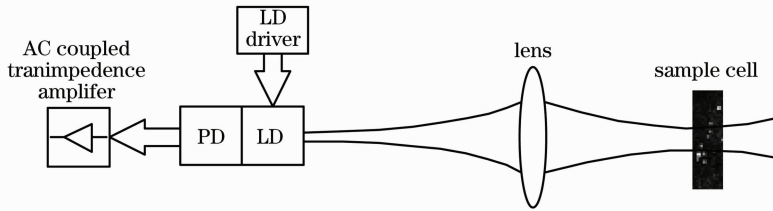


图1 纳米颗粒激光自混频技术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser diode self-mixing interferometry for nanoparticle measurement

当纳米颗粒作布朗运动时,自混频信号的时间自相关函数如下^[11]:

$$R(\tau) = P_0^2 [1 + 2m^2 |C_{\text{Mie}}|^2 \langle N \rangle \exp(-Dq^2\tau)], \quad (1)$$

式中 P_0 为激光输出功率, C_{Mie} 是与颗粒的折射率、颗粒粒径、颗粒与探测点的距离有关的常数(称作米氏散射光强因子), m 是与半导体激光器内部结构有关的特征参数, $\langle N \rangle$ 是散射体积内的平均颗粒数, D 是扩散系数, $q = \frac{4\pi n}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}$ 是散射矢量的值。(1)式

包含一常数项和一扰动项,常数项代表无外反馈(即不存在纳米颗粒)扰动时信号自相关函数,即自相关函数的基线,扰动项代表有外反馈(即存在纳米颗

粒)扰动时反映颗粒布朗运动特征的成份。扰动项由两个因子的乘积组成,分别是系数 $2m^2 |C_{\text{Mie}}|^2 \langle N \rangle$ 和布朗因子 $\exp(-Dq^2\tau)$ 。布朗因子来源于纳米颗粒的布朗运动,由散射矢量大小和扩散系数 D 决定。扩散系数 $D (= k_B T / 3\pi\eta d)$ 与颗粒的粒径 d 、粘度系数 η 和温度 T 有关。扩散系数包含了纳米颗粒粒径的信息,因此由布朗因子可以提取出颗粒粒径的信息。

(1)式所表示的自相关函数中与颗粒布朗运动特征有关的项可以表示为

$$R_0(\tau) = \exp(-Dq^2\tau), \quad (2)$$

所对应的 PSD 函数就是 $R_0(\tau)$ 的傅里叶变换:

$$S_0(\omega) = \mathcal{F}[R_0(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_0(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau, \quad (3)$$

由此可得到布朗因子所对应的 PSD 函数表达式为^[12]

$$S_0(\omega) = \frac{q^2 D}{(2\pi f)^2 + (q^2 D)^2}. \quad (4)$$

自混频信号的 PSD 函数与自相关函数等价,都包含了纳米颗粒的粒径信息。

3 基于带通滤波技术的测试原理与实验装置

实验装置分光学系统和电子系统两部分(见图 1)。光学系统包括半导体激光器探测器模块(LDPD)、会聚透镜和样品池;电子系统包括半导体激光器驱动电路和交流耦合跨阻放大电路。LD 中的激光芯片被驱动电路激励产生激光,出射光经透镜会聚到样品池中的纳米颗粒上,颗粒的后向散射光经透镜耦合入激光腔内产生激光自混频,很小部分自混频信号透过激光腔后端面,被置于激光芯片

后方的光电探测器侦测并转化为微弱的电流信号,电流信号经过交流耦合跨阻放大器转化为自混频电压信号。

根据(4)式给出的自混频信号 PSD 函数和扩散系数关系 $D(=k_B T/3\pi\eta d)$ 可知,其频谱特征与纳米颗粒的粒度存在对应关系。颗粒越小,自混频信号的频谱分布越向高频区扩展;反之,大粒径颗粒的自混频信号主要分布在低频区。因此,对自混频信号的频谱分析可通过多种途径解决^[13~16]。一种途径是用 A/D 卡实时采集自混频电压信号,将所得到的离散信号送入计算机,将离散信号进行傅里叶变换获得 PSD 函数,如图 2(a)所示。在本文中,采用带通滤波技术对自混频信号进行处理。将电压信号并行送入 16 个通道,每个通道包含缓冲器、带通滤波器(BPF)和 RMS 处理器(AD536)。每个通道的 BPF 具有不同中心频率,16 个通道的 BPF 中心频率按照对数坐标均匀分布在 22.5 Hz 和 6.82 kHz 频率范围内。16 个通道的信号方均根值被 A/D 卡采样,取平方后即得到 16 路不同中心频率处相应频段内的 PS-BPF,如图 2(b)所示。

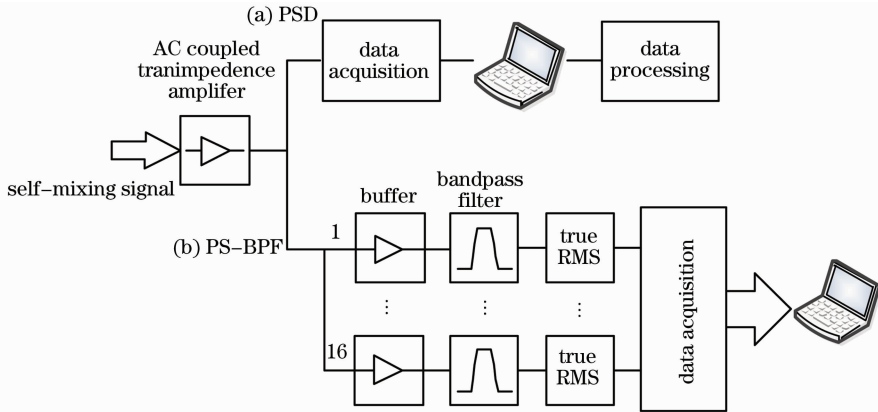


图 2 PSD 和 PS-BPF 两种信号处理方式

Fig. 2 Two methods of PSD and PS-BPF for signal processing

单个通道带通滤波的信号功率谱为

$$S_i^{\text{BPF}}(\omega) = \int_0^{\infty} S(\omega) |H_i(\omega)|^2 d\omega, \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (5)$$

式中 i 为频率通道号,对应不同的频率区域, M 为通道总数; ω 为角频率; $S(\omega)$ 为不存在 BPF 时的 PSD 函数; $H_i(\omega)$ 为第 i 通道 BPF 的频率响应函数,适用于各种 BPF。本文实验中取二阶 KRC 带通滤波,二

阶带通函数的标准形式是 $H(\omega) = H_{0\text{BP}} H_{\text{BP}}(\omega)$,式中 $H_{0\text{BP}}$ 称为谐振增益^[17],取 $H_{0\text{BP}} = 2\sqrt{2}Q - 1, Q > \frac{\sqrt{2}}{3}$,

$$H_{\text{BP}}(\omega) = \frac{(j\omega/\omega_0)/Q}{1 - (\omega/\omega_0)^2 + (j\omega/\omega_0)/Q}. \quad (6)$$

PSD 函数与颗粒粒径之间的线性关系如下:

$$S_i(\omega) \propto \sum_{j=1}^N \underbrace{\frac{q^2 D(x_j)}{\omega_i^2 + [q^2 D(x_j)]^2}}_{\text{matrix}} \underbrace{|C_{j,\text{Mie}}|^2 f(x_j) \Delta x_j}_{\text{particle size distribution}}, \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

式中 ω_i 为第 i 档频率值, j 为粒径分档号 ($j = 1, 2, \dots, N$), 对应不同的粒径分档, N 为粒径分档总数; x_j 为第 j 档颗粒粒径平均值; Δx_j 为第 j 档粒径的分档宽度; $f(x_j)$ 为第 j 档粒径颗粒的数目分布函数, 米氏散射光强因子 $C_{j,\text{Mie}}$ 与颗粒数目分布函数组合成以光强因子为权重的颗粒粒径分布函数。PS-BPF 与颗粒粒径之间的线性关系如下:

$$S_i^{\text{BPF}}(\omega) \propto \sum_{j=1}^N \underbrace{\int_0^{\infty} \frac{q^2 D(x_j)}{\omega^2 + [q^2 D(x_j)]^2} \cdot |H_i(\omega)|^2 d\omega}_{\text{matrix}} \cdot \underbrace{|C_{j,\text{Mie}}|^2 f(x_j) \Delta x_j}_{\text{particle size distribution}}, \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

(7)式和(8)式均为线性方程组,可写成矩阵与向量 $\mathbf{S}=\mathbf{MF}$ 的形式。其中向量 \mathbf{S} 即 PSD 函数 $S_i(\omega)$ 和 PS-BPF $S_i^{\text{BPF}}(\omega)$, 均可通过实验测量得到;在二种处理方法中,模式矩阵 \mathbf{M} 具有不同的形式,都可通过理论计算得到;向量 \mathbf{F} 是以光强因子为权重的颗粒粒径分布函数,可通过反演计算得到。在颗粒测量领域,较常用的反演方法有 Chahine 算法^[18]、Kaczmarz 投影算法^[19]等。本文在 Kaczmarz 投影算法的基础上应用改进的投影算法进行反演计算^[10]。

4 实验结果与讨论

图 3 给出了标称粒径为 60 nm 和 100 nm 两种聚苯乙烯标准纳米颗粒(由中国石油大学提供)以及 180 nm 二氧化硅标准纳米颗粒(由武汉华科科技有限公司提供)的测量结果。可以看出,PSD 曲线呈洛仑兹函数展宽,在双对数坐标下,高频区曲线随频率增加呈明显的线性下降;纳米颗粒粒径越小,曲线展宽越大;此外还可以看到,由于周边环境噪声影响,PSD 函数曲线在低频区域(大于 200 Hz)存在误

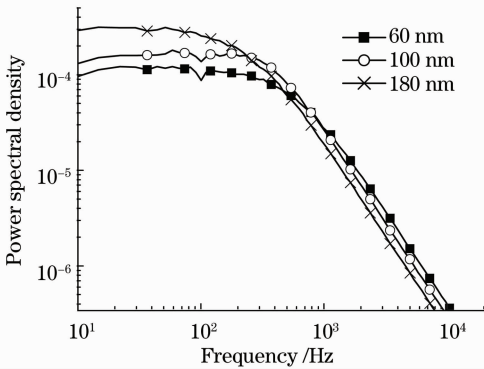


图 3 标准纳米颗粒的 PSD 函数曲线

Fig. 3 Measurement results of the PSD of the self-mixing signals for standard nanoparticles

差。图 4 给出了三种标准纳米颗粒的 PS-BPF 测量结果。可以看出,PS-BPF 曲线呈钟形分布,标称粒径分别为 60,100,180 nm 纳米颗粒的 PS-BPF 曲线峰值位置依次位于第十通道、第八通道和第七通道。

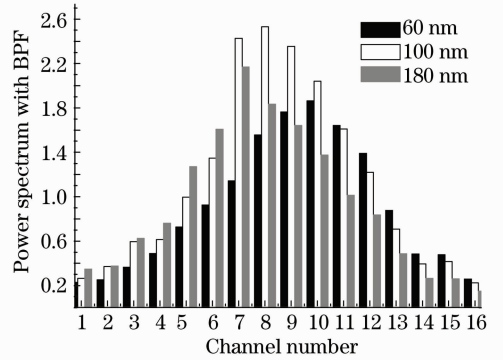


图 4 标准纳米颗粒自混频信号的 PS-BPF

Fig. 4 PS-BPF of standard nanoparticles

应用改进的投影算法分别对实验测得的 PSD 函数和 PS-BPF 进行反演计算,以获得颗粒粒径分布。对于测得的 PSD 函数,在 10 Hz~12.4 kHz 频率范围内按对数区间均匀选取 $M=32$ 个值,颗粒粒径分布函数在 10~1000 nm 粒径区间按对数区间均匀选取粒径值,颗粒粒径分档数取 $N=32$ 。对于 PS-BPF 信号反演计算,如前所述,在频率范围 22.5 Hz~6.82 kHz 内按对数区间均匀选取 $M=16$ 测量通道,颗粒粒径分布函数参数的选取与 PSD 函数的反演计算一致。

图 5~7 分别给出了 180,100,60 nm 标准颗粒的反演结果图,其中带 \blacktriangle 曲线是由 PSD 函数信号反演计算得到的颗粒粒径分布曲线(标 PSD),见(7)式,带 \bullet 曲线是由 PS-BPF 信号反演计算得到的结果(标 PS-BPF),见(8)式。为了验证测量结果的合理性,在相同测量条件下采用马尔文公司的 Zetasizer Nano ZS 纳米颗粒测量仪对三种标准颗粒

进行了比照测试,测量结果在图中以带■曲线(标 Malvern)画出。可以看出,二种反演方法计算得到的三个纳米颗粒试样的粒径分布曲线均较好地与 Zetasizer Nano ZS 纳米颗粒测量仪的测量结果吻合。

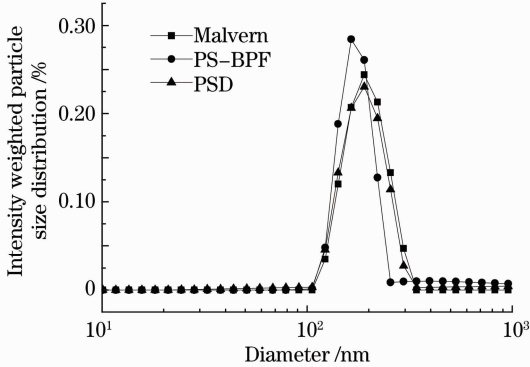


图5 标称粒径 180 nm 标准颗粒反演结果

Fig. 5 Inversion results of the 180 nm nanoparticles

为了比较两种处理方法反演问题的病态情况,在 22.5 Hz~6.82 kHz 频率区间和 10~1000 nm 粒径区间内计算两种方法的模式矩阵(32×32),如图 8 所示。可以看出 PSD 函数反演方法[图 8(a)]和 PS-BPF 反演方法[图 8(b)]的模式矩阵具有不同的特征。PS-BPF 反演方法的模式矩阵在对角线附近具有极大值,而且极大值不随粒径的变化而变化;PSD 函数反演方法的模式矩阵则不具备这样的特征。分别计算两个模式矩阵的条件数发现,PSD 函数反演方法模式矩阵的条件数为 9.4×10^{10} ,而 PS-BPF 反演方法模式矩阵的条件数为 1.6×10^9 。从颗粒粒径分布反演计算的角度来说,模式矩阵的条件数越小,反演问题越容易得到合理的结果^[9,20,21]。为了进一步考察两种处理方法的差异,对双峰分布纳米颗粒系进行了模拟计算。首先设定

颗粒粒径分布函数,分别计算 PSD 和相应的 PS-BPF 并赋予一定的随机误差。然后采用对应的模式矩阵(见图 8)进行反演计算,并与设定的粒径分布函数比较。作为示例,图 9 给出了粒径比 x_2/x_1 分别为 2 和 5 的两个双峰分布颗粒系的反演结果,PSD 和 PS-BPF 的随机误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。带■曲线为设定的颗粒粒径分布,带●曲线是 PSD 函数的反演结果,带△曲线是 PS-BPF 的反演结果。

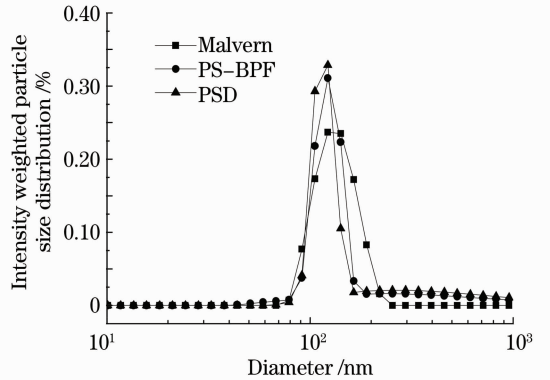


图6 标称粒径 100 nm 标准颗粒反演结果

Fig. 6 Inversion results of the 100 nm nanoparticles

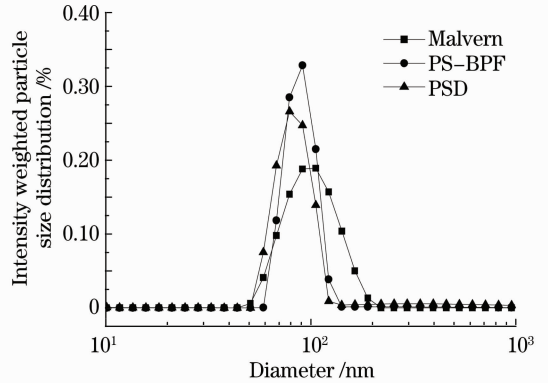


图7 标称粒径 60 nm 标准颗粒反演结果

Fig. 7 Inversion results of the 60 nm nanoparticles

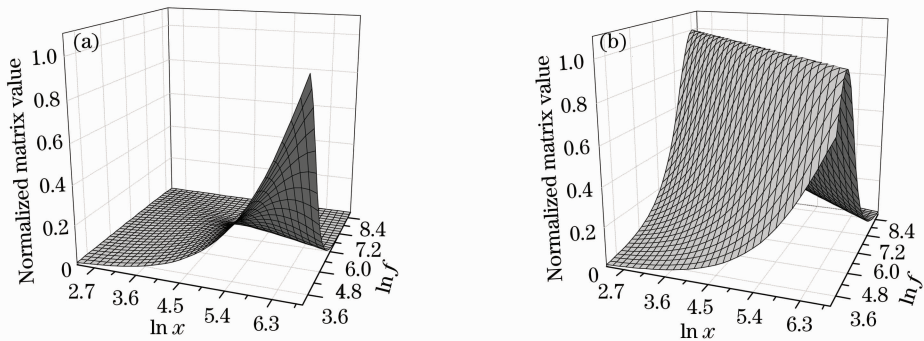


图8 反演问题中的模式矩阵。(a) PSD 函数反演方法;(b) PS-BPF 反演方法

Fig. 8 Modal matrices of the inverse algorithms based on (a) PSD and (b) PS-BPF

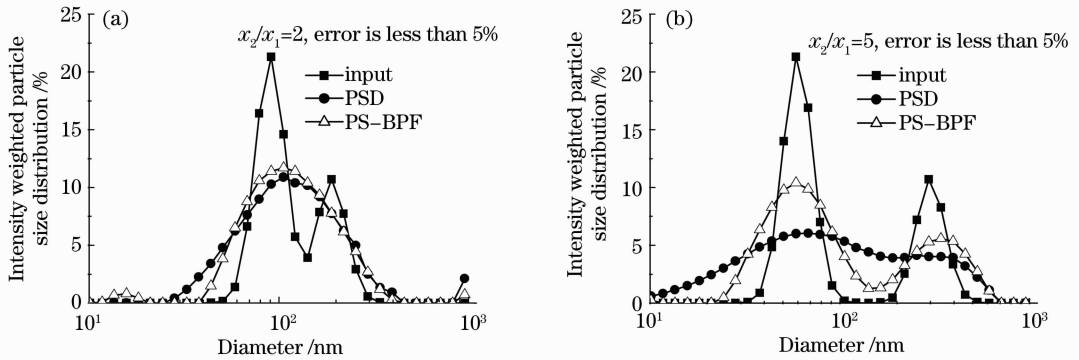


图9 两种方法对双峰分布颗粒系模拟计算结果比较。(a)粒径比为2;(b)粒径比为5

Fig. 9 Comparison of the simulated results on bimodal particles with different methods. (a) Ratio of mean particle sizes is 2; (b) ratio of mean particle sizes is 5

可以看出,当粒径比值较小时,两种方法均覆盖了相应的粒径范围但无法分辨出双峰结构;当粒径比值较大时,反演结果可体现出双峰结构,PS-BPF处理方法具有较强的粒径分辨能力。

因此,采用PS-BPF处理方法测量纳米颗粒粒径分布优于直接采用PSD函数的反演方法。此外,PSD函数处理方法需要采集一系列的自混频信号、作傅里叶变换,这需要快速的数据采集系统、大量的计算机内存和花费一定的CPU时间;而PS-BPF处理方法采用了模拟电路方式来实现信号的提取,对数据采集速度、内存容量要求不高,并且省去了傅里叶变换的CPU时间。这对实现纳米颗粒粒径的实时测量和研制便携式纳米颗粒测量仪是非常有利的。

5 结 论

采用带通滤波技术对激光SMI信号进行处理,在频率对数坐标上均匀设置多个中心频率的二阶BPF和RMS处理器,得到自混频信号的PS-BPF并反演获得颗粒粒径分布信息。实验测试了三个标准纳米颗粒试样,所得粒径分布与传统的PSD处理结果和Malvern公司的动态光散射纳米粒度分析仪测试结果吻合。理论分析了PS-BPF处理方法的病态情况,模拟计算了双峰分布颗粒系的反演结果,并与PSD函数方法进行比较。

实验结果与模拟计算显示:基于PS-BPF处理技术的激光自混频纳米颗粒测量方法较好地改善了PSD处理方法模式矩阵的病态情况。可通过模拟电路实现,从而降低对数据采集率的要求、节省信号处理时间和数据储存容量,有利于实现实时测量和研制便携式纳米颗粒测量仪。

致谢 Malvern公司上海代表处朱天兴先生和黎小宇工程师及上海理工大学材料学院何代华博士对本文所涉三个试样进行了比照测量,谨表谢意。

参 考 文 献

- 1 S. Soltanian, J. Horvat, X. Wang *et al.*. Effect of nano-carbon particle doping on the flux pinning properties of MgB₂ superconductor[J]. *Physica C*, 2003, **390**(3): 185~190
- 2 Federal Standard No. 209E. Federal Standard Clean Room and Workstation Requirements, Controlled Environment [S]. Washington D C: General Services Administration, 1992
- 3 B. Scarlett. 25 Years of Particle Size Conferences, Particle Size Analysis[M]. New York: Plenum Press, 1991
- 4 D. Grant, W. Schmidt. Improved methodology for determination of submicron particle concentration in semiconductor process chemicals[J]. *The Journal of Environmental Sciences*, 1987, **30**(3): 28~33
- 5 C. Zakian, M. Dickinson. Self-mixing interferometry with a laser diode: experimental considerations for sensing applications [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(6): 555~568
- 6 C. Zakian, M. Dickinson, T. King. Dynamic light scattering by using self-mixing interferometry with a laser diode[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(10): 2240~2245
- 7 C. Zakian, M. Dickinson, T. King. Particle-sizing and flow measurement using self-mixing interferometry with a laser diode [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(6): S445~S452
- 8 S. Sudo, Y. Miyasaka, K. Otsuka. Quick and easy measurement of particle size of Brownian particles and plankton in water using a self-mixing laser[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1044~1054
- 9 Wang Huarui, Shen Jianqi, Yu Haitao *et al.*. Inversion problem in submicron and nanometer particle sizing using laser self-mixing interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28** (12): 2335~2343
- 王华睿, 沈建琪, 于海涛等. 激光自混合干涉法亚微米及纳米颗粒测量中的反问题[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2335~2343
- 10 H. Wang, J. Shen. Size measurement of nano-particles using self-mixing effect[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 871~874
- 11 H. Wang, J. Shen, B. Wang *et al.*. Laser diode feedback interferometry in flowing Brownian motion system: a novel theory[J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **101**(1/2): 173~183
- 12 H. Wang, J. Shen. Power spectral density of self-mixing signals from a flowing Brownian motion system[J]. *Appl. Phys. B*, 2011; DOI 10.1007/s00340-011-4700-3

- 13 J. Shen, B. Yu, Y. Xu *et al.*. Particle sizing by spectral analysis on transmission fluctuations [J]. *Powder Technology*, 2006, **166**(2): 91~99
- 14 Xu Yamin, Yu Bin, Liu Lei *et al.*. Measurements on particle by transmission fluctuation spectrometry using second order filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1495~1500
许亚敏, 于 彬, 刘 蕾等. 基于二阶滤波器的消光起伏谱颗粒测量结果[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1495~1500
- 15 Y. Xu, J. Shen, X. Cai *et al.*. Particle size analysis by transmission fluctuation spectrometry with band-pass filters[J]. *Powder Technology*, 2008, **184**(3): 291~297
- 16 Xu Yamin, Shen Jianqi, Cai Xiaoshu. Characteristics of transmission fluctuation frequency spectrum with band-pass filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3184~3190
许亚敏, 沈建琪, 蔡小舒. 基于带通滤波器的透射率起伏信号频谱特征[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3184~3190
- 17 Sergio Franco. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits[M]. 3rd ed. Liu Shutang, Zhu Maolin, Rong Mei, Transl.. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005. 111~122
赛尔吉欧·弗朗哥. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 第三版. 刘树棠, 朱茂林, 荣玫, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2005. 111~122
- 18 M. T. Chahine. Determination of the temperature profile in an atmosphere from its outgoing radiance[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1968, **58**(12): 1634~1637
- 19 S. Kaczmarz. Angenachte aufloesunf von systemen linearer gleichungen[J]. *Bull. Ini. Acad. Po. Sci. Lett. A.*, 1937: 355~357
- 20 ISO 13320-1. 1999 Particle size analysis-Laser diffraction methods-Part 1: General principles[S/OL]. www.iso.org
- 21 J. Shen, M. Su, J. Li. A new algorithm of relaxation method for particle analysis from forward scattered light [J]. *China Particuology*, 2006, **4**(1): 13~19

栏目编辑: 李文喆