

# 利用色散补偿白光相关器及高通滤波技术检测粒子大小

蔡履中

(山东大学光学系, 济南)

## 提 要

本文提出了一种可用于检测相同形状粒子的大小、具色散补偿作用的白光相关系统, 并完成了理论分析及实验验证。通过自动扫描光谱强度(位于固定点的相关峰)的分布, 可方便地确定输入物的几何标度。本系统与高通滤波技术相结合, 可检测圆环状粒子的大小, 其相对误差的精度 $<2\%$ 。

关键词: 相关检测; 白光相关器; 标度识别。

## 一、引 言

在许多实际情况下<sup>[1~4]</sup>, 被测粒子的形状是相同或基本相同的, 只是大小不同。因此理论上可应用 Vander Lugt 匹配滤波器(MSF)法<sup>[5]</sup>, 由相关峰强度随被测物几何标度的变化来确定其大小<sup>[6~8]</sup>。亦可用标度相关器(scaling correlator), 由相关峰的轴向位移来测定输入物的标度<sup>[6, 9]</sup>。但两种方法都有缺点。故有选用波长可变的染料激光器作光源<sup>[10]</sup>, 但是没有一种染料能覆盖整个白光光谱区。

近年来白光相关器受到广泛注意<sup>[11~16]</sup>。其中 Morris 等的色散补偿白光相关装置<sup>[8, 17, 18]</sup>, 对标度识别具有特殊价值。但是对标度识别的特定目的, 要依靠光源足够宽的连续谱带来判断标度的明显变化。因此, 我们舍弃了 Morris 装置中的狭缝和  $4f$  系统, 而发展一种简化了的白光相关器, 并将它与高通滤波技术相结合, 相当精确地检测了粒子的大小。

## 二、简化的色散补偿白光相关器的原理

图 1(a)、(b) 分别表示 MSF 的综合和标度不变的(scale invariant)白光相关器。其中平面 I、II、III 分别为输入平面、MSF 平面和输出平面。在综合 MSF 时, 将振幅透过率为  $t(x, y)$  的参考物置于平面 I, 用波长为  $\lambda_0$  的相干平面波照明, 平面 II 上光场的复振幅分布为<sup>[19]</sup>:

$$u(x_2, y_2; \lambda_0) = \frac{1}{\lambda_0 f} \iint t(x_1, y_1) \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda_0 f} (x_2 x_1 + y_2 y_1) \right] dx_1 dy_1. \quad (1)$$

为简明起见, 上式(及以下各式)中忽略了某些与结果无关的复常数因子。该平面参考波光场为:

$$R = \exp\left(i2\pi \frac{\sin \theta}{\lambda_0}\right), \quad (2)$$

其中  $\theta$  为参考平面波与光轴的夹角。

将处理后的 MSF 置于原位，以  $g(x, y)$  为输入物，用波长为  $\lambda$  的照明光，可得到透过 MSF 的光场(仅取与相关项有关部分)为：

$$u(x_2, y_2; \lambda) = \frac{1}{\lambda_0 \lambda f^2} T^* \left( \frac{x_2}{\lambda_0 f}, \frac{y_2}{\lambda_0 f} \right) G \left( \frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f} \right) \exp\left(i2\pi \frac{\sin \theta}{\lambda_0} x_2\right), \quad (3)$$

式中  $T$  和  $G$  分别表示  $t$  和  $g$  的傅里叶变换。

通常光学相关器中并无补偿光栅，这时输出平面的光场分布应为<sup>[10]</sup>：

$$u(x_3, y_3; \lambda) = \frac{1}{\lambda_0 f} t^*(-x_3, -y_3) \otimes g\left(\frac{\lambda}{\lambda_0} x_3, \frac{\lambda}{\lambda_0} y_3\right) \otimes \delta\left(x_3 - \frac{\lambda}{\lambda_0} f \sin \theta, y_3\right). \quad (4)$$

这里上标 \* 表示共轭， $\otimes$  表示卷积，式中前两项为  $t$  与  $g$  的相关  $\delta$  函数表示相关峰在  $x$  方向的位置与  $\lambda$  有关。故使用宽谱光源时，输出面上显示的相关项已不再是一个尖锐的点，而弥散成一条彩虹状色线。

为校正相关峰的色散，可紧靠  $L_3$  放置一补偿光栅(见图 1(b))。此光栅用图 1(a) 光路(去掉  $L_2$ )在波长  $\lambda_0$  时制造，其有效的(-1 级)复振幅透过率为：

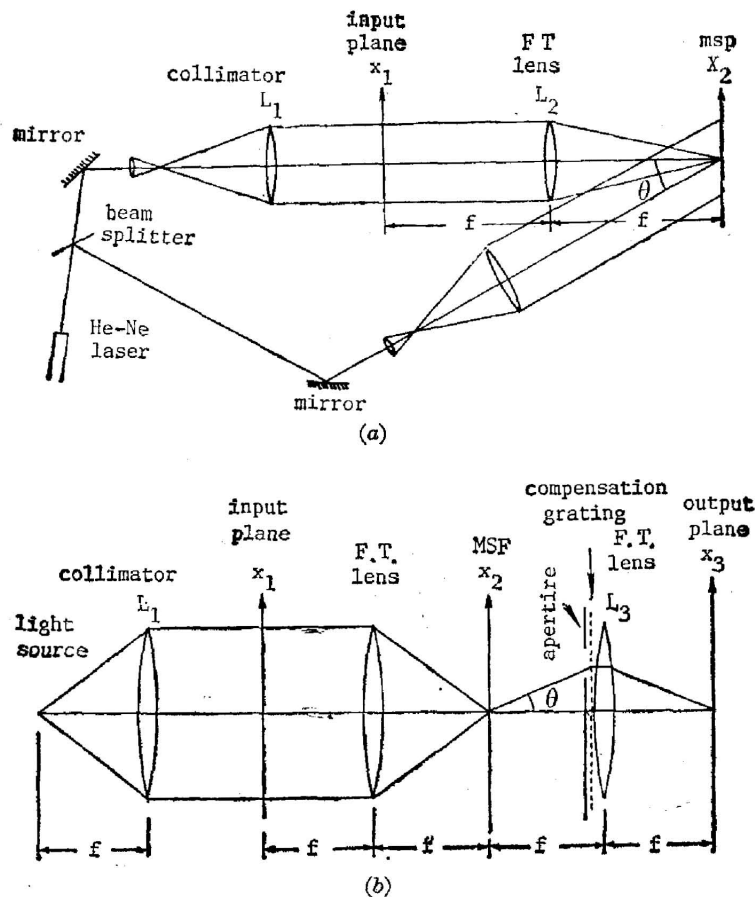


Fig. 1

(a) Fabrication of matched spatial filter (MSF); (b) concept of the dispersion-compensated broadband correlator

$$\text{tg}(x, y) = \exp\left(-i2\pi \frac{\sin \theta}{\lambda_0} x\right). \quad (5)$$

众所周知,透镜的复振幅透过率为

$$t_l(x, y) = \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda f} (x^2 + y^2)\right]. \quad (6)$$

利用表达式 (3)、(5)、(6), 对图 1(b) 两次应用 Fresnel 衍射公式<sup>[19]</sup> (从 MSF 平面到  $L_3$  平面, 再从  $L_3$  平面到输出平面), 可得到平面 III 上最终的相关场分布为:

$$\begin{aligned} u(x_3, y_3; \lambda) &= \frac{1}{\lambda_0 f} t^*(-x_3, -y_3) \otimes g\left(\frac{\lambda}{\lambda_0} x_3, \frac{\lambda}{\lambda_0} y_3\right) \\ &= \frac{1}{\lambda_0 f} t(x_3, y_3) \star g\left(\frac{\lambda}{\lambda_0} x_3, \frac{\lambda}{\lambda_0} y_3\right). \end{aligned} \quad (7)$$

这里  $\star$  表示相关。显然, 由  $\delta$  函数所表征的色散项在上式中已被去掉。此结果是容易理解的。事实上, 通过 MSF 后的 +1 级衍射光载波沿与光轴成  $\frac{\lambda}{\lambda_0} \theta$  角的方向传播, 而补偿光栅 (其有效级为 -1) 将此载波反方向转动了同样的角度, 故过光栅后此载波方向变为与光轴平行, 而最终相关点定位于输出面的原点, 与波长  $\lambda$  无关。

以上分析基于相干照明。在非相干照明时, 相关峰的光谱强度可写为<sup>[8,10]</sup>

$$I(0, 0; \lambda) = K \iint |t(x, y)|^2 \left| g\left(\frac{\lambda}{\lambda_0} x, \frac{\lambda}{\lambda_0} y\right) \right|^2 dx dy, \quad (8)$$

式中  $K$  是一个与系统参数有关的常数。

若输入物  $g$  与参考物  $t$  形状相同 (其几何线度与  $t$  相比放大  $M$  倍), 则无论从 (7) 式还是 (8) 式均可看到, 仅当  $\lambda = M\lambda_0$  时, 相关峰强度达极大。因此, 可以用白光源和光谱仪探测相关峰的光谱强度分布来确定输入物的大小。

### 三、实验结果及分析

#### 1. 高通滤波对改善检测精度的效果

对直径  $10 \mu\text{m}$  左右的实际粒子进行显微观察或摄影时, 所得图像呈明亮的环形。为模拟实际粒子, 采用透明圆环作输入物, 其内外径之比为 0.8, 如图 2 所示。为提高检测精度, 将其作高通滤波预处理, 滤波时采用白光源以减弱散斑效应, 结果如图 3 (图 2 与图 3 均为负片, 其黑部为透光部分)。显然图 3 中物的边缘 (它是区别物的大小的主要特征) 被大大强

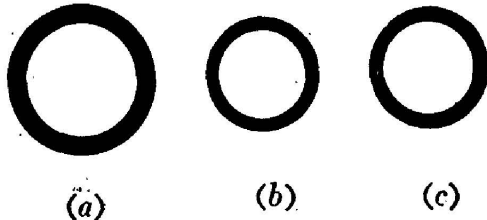


Fig. 2

(a) Reference object used to make MSF at  $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ ; (b) and (c) scaled objects for correlation test, the magnifications are  $M_b = 48.0/632.8 \approx 0.77$  and  $M_c = 514.5/632.8 \approx 0.81$ , respectively

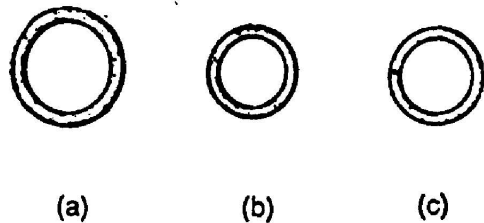


Fig. 3 The same objects as shown in Fig. 2 but after high pass filtering operation

调了。

为验证高通滤波的效果,首先用图 3(a)作参考物,用 He-Ne 激光器作光源综合 MSF,参考光角度  $\theta=21^\circ$ ,记录介质为置于液门中的 Kodak-649F 胶片。然后将所得 MSF 置于图 1(b)相关器中,这时不用补偿光栅,在输出面用多通道光学分析仪(OMA model 1450)接收信号,它在  $x$  方向有足够宽度(1.25cm)的微探测器阵列,并在荧光屏上直接显示结果。图 4 和图 5 分别是用图 3(b) ( $M=0.77$ )和图 3(c) ( $M=0.81$ )作输入物,用  $\text{Ar}^+$  激光器的不同波长照明(功率皆调为定值)时直接从屏上拍摄的相关峰照片(水平轴相应于  $x$  方向)。显然,当波长变化时不仅相关峰强度有变化,其  $x$  方向位置亦有变化,而且位移量与波长变化成比例,此即色散效应。当  $\lambda=M\lambda_0$  时,预期得到最大相关峰,它们分别相应于  $\text{Ar}^+$  激光器

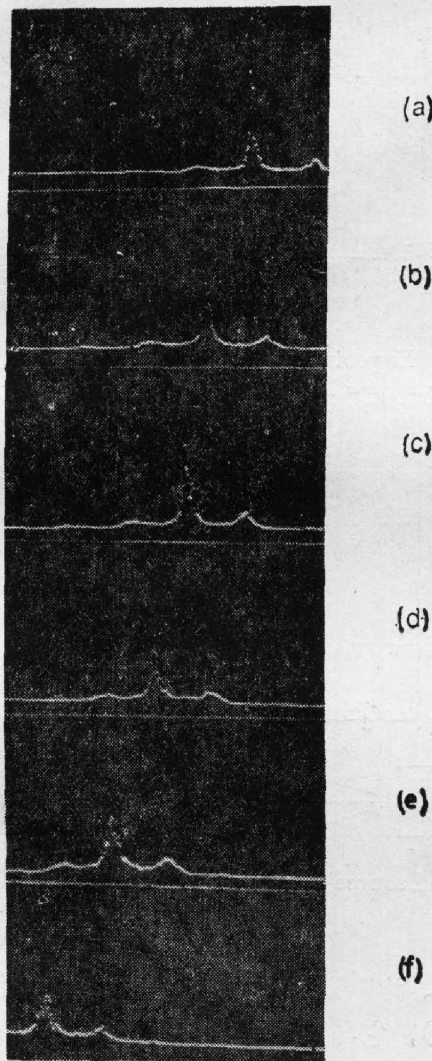


Fig. 4 Experimental correlation peaks with the input object shown in Fig. 3(b) using following wavelengths from an argon laser with a constant power:

(a) 514.5 nm (b) 501.7 nm, (c) 496.5 nm, (d) 488.0 nm, (e) 476.5 nm, and (f) 457.9 nm

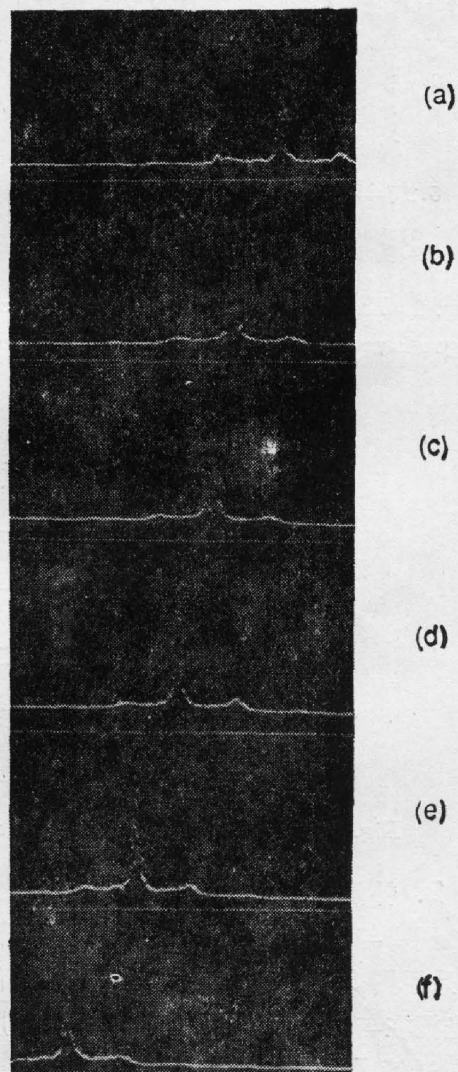


Fig. 5 Experimental correlation peaks with the input object shown in Fig. 3(c) using the same wavelengths as in Fig. 4

的 488.0nm(图 4)和 514.5nm 谱线(图 5)。图 6 是由图 4 和图 5 作出的相对峰值强度随波长变化的曲线。作为对照,图 7 示出了用未经高通滤波的图 2(a)作参考物,用图 2(b)和 (c)作输入物,用同样方法得到的相关峰强度随波长变化的曲线。比较图 6 和图 7 可以看出,图 6 中曲线由极大值下降的速度比图 7 要快得多。

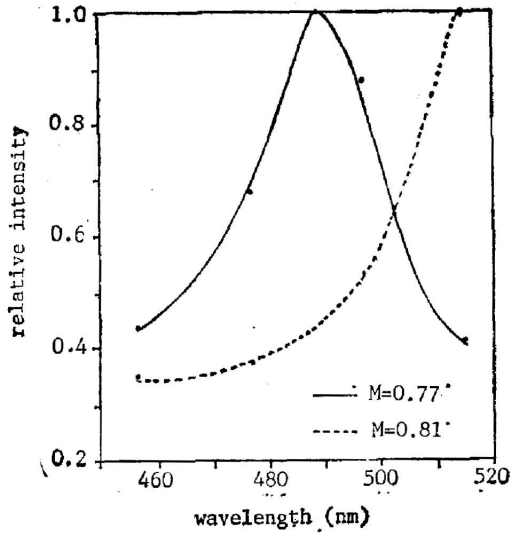


Fig. 6 Experimental correlation with an argon laser and high pass filtering operation

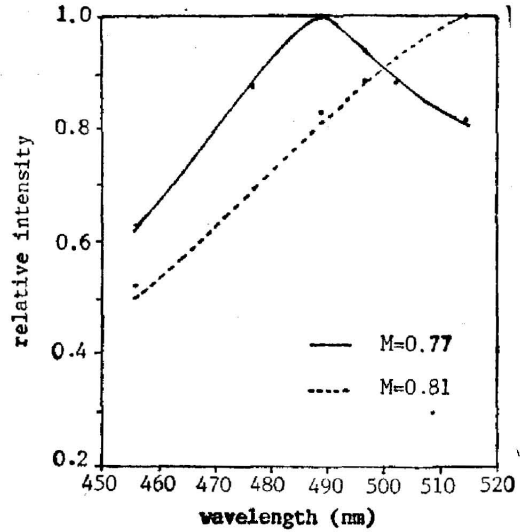


Fig. 7 Experimental correlation with an argon laser but without high pass filtering operation

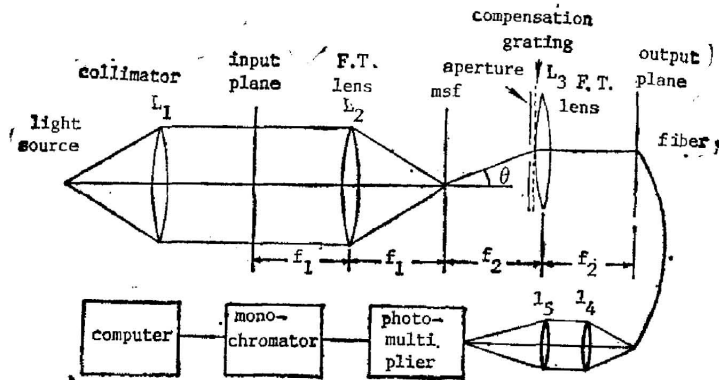


Fig. 8 Experimental arrangement for broadband source correlation measurements

### 2. 补偿光栅校正色散的效果

图 4 与图 5 已明显显示出普通相关器的色散效应。为验证加入补偿光栅后的消色散作用,采用图 8 中上半部装置(从光源平面到输出平面),它与图 1(b)相比稍有变化。图中补偿光栅在与综合 MSF 时的同样条件下用 Kodak 649F 干板制造,并经过漂白提高衍射效率。透镜  $L_3$  的中心位于  $x=f_2 \sin \theta, y=0$  处,使得经过 MSF 后的 1 级衍射波可以达到  $L_3$  的中心,而相关峰则出现在  $L_3$  本身的光轴上。由于避免了利用  $L_3$  的边缘部分,相关点的质量可得到一定改善。 $L_3$  之前的孔径则是用以阻挡 MSF 的零级和 2 级衍射波。在相关平面仍用 OMA 接收信号。图 9 为使用图 3(a)为参考物,在  $\lambda_0=632.8\text{nm}$  时综合 MSF,而以

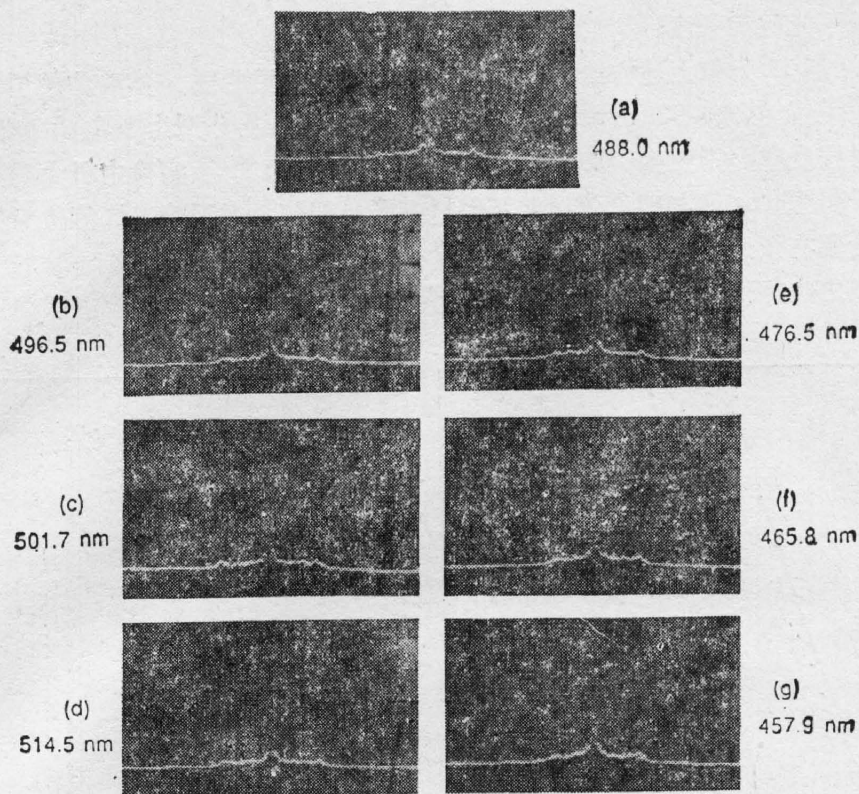


Fig. 9 Experimental correlation peaks showing the cancellation of dispersion with an input object magnified by  $M=0.77$  and the compensation grating using different wavelengths from an argon laser

图 3(b) 作输入物, 用  $\text{Ar}^+$  激光器的七个不同波长照明时(功率恒定)直接从 OMA 显示屏上拍摄的相关峰照片, 可以看到所有相关峰在屏上的位置重合是相当精确的。

其次, 换用 75 W 氙灯作白光源, 并在其像面用小孔将有效光源大小限制为直径  $200 \mu\text{m}$ 。仍用与前文相同的 MSF, 当分别以图 3(a) 和 (c) 作输入物时, 理论上相关峰极大值应分别出现于  $\lambda=632.8 \text{ nm}$  和  $512.6 \text{ nm}$ 。移去 OMA, 在输出平面上的确可以观察到一个相当清晰的红色光点(对图 3(a)) 和绿色光点(对图 3(c)), 其直径约为  $200 \mu\text{m}$ , 它们定位于同一位置。红点的照片(略)。以上结果说明此装置的色散补偿作用是相当令人满意的。

### 3. 用白光相关器检测粒子大小

一般说来, 白光源的光谱强度在其整个光谱范围内并非理想均匀, 有时背景噪声亦随波长而变化。故仅靠观察 OMA 屏幕上的曲线来确定相关峰极值波长, 往往是不准确的。因此在实际检测粒子大小时, 应用图 8 所示的整套装置。图中一根直径  $200 \mu\text{m}$  的光导纤维一端固定于输出面相关点上, 另一端通过透镜  $L_4$  和  $L_5$  耦合输入到光子倍增器和一大型光谱仪。由计算机控制, 此光谱仪可自动实施不同波长的扫描, 并完成测量数据及相应曲线的自动记录、处理和显示。

首先测定在没有 MSF 及补偿光栅的衍射时, 在输出面接收到的光源光谱强度分布, 及(遮住光源时)背景噪声的光谱强度分布。然后用下述方法将不同输入物相关强度的实测值, 进行归一化处理: (1) 将每一波长下测得的表观强度减去相应的背景噪声; (2) 将此差值

除以该波长下光源的强度; (3) 将 (2) 中结果除以其极大值。

图 10 和图 11 为依上述方法得到的两条相对光谱强度曲线。实验中使用的 MSF 是以图 3(a) 作参考物在  $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$  时综合的, 识别时输入物分别为图 3(a) 和图 3(b)。理论上最大相对强度应分别发生于  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  和  $487.3 \text{ nm}$  处。实验中极大值分别相应于  $\lambda = 639 \text{ nm}$  和  $489 \text{ nm}$ , 与理论值误差不超过 1%。即使考虑到确定峰值位置时可能产生的误差, 为留有余地, 取从最大值下降 5% 作为最大误差范围, 这时其波数可确定到  $\pm 20 \text{ nm}^{-1}$  之内, 而测量中总的相对误差最大值约为 2%。

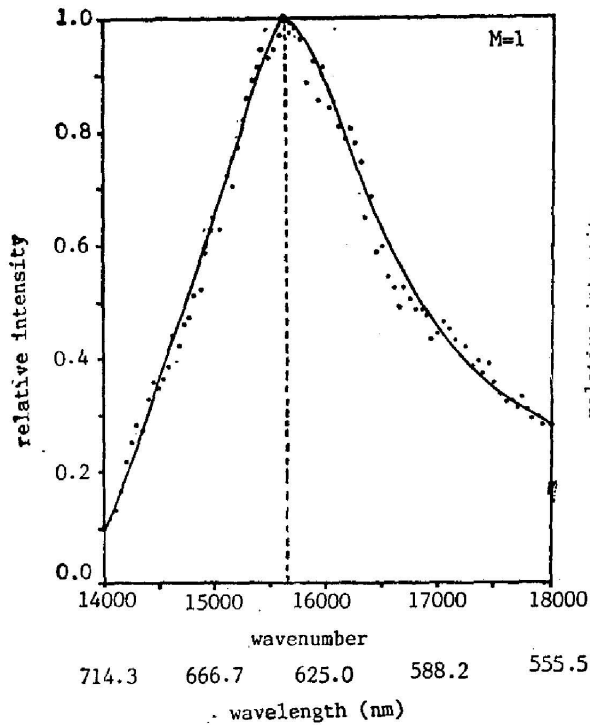


Fig. 10 Experimental correlation with white light source, high pass filtering operation, and input object  $M=1$

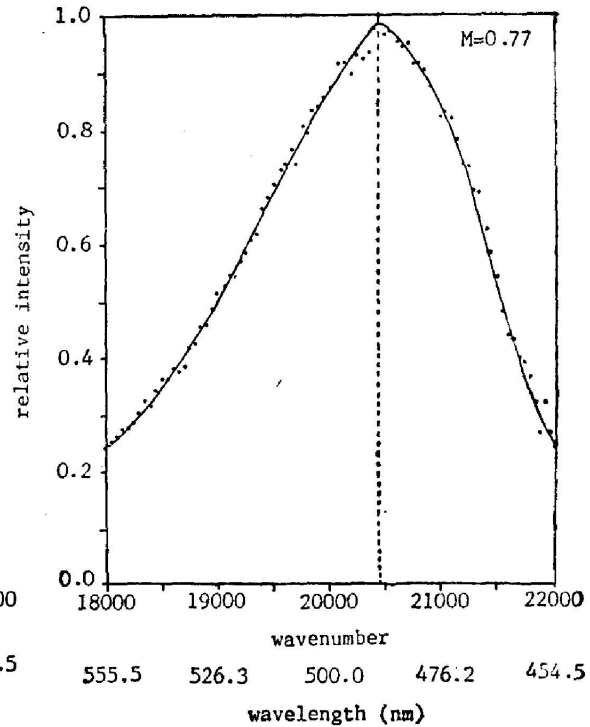


Fig. 11 Experimental correlation with white light source, high pass filtering operation, and input object  $M=0.77$

#### 四、结论和讨论

本文提出了一种简化了的具有色散补偿性能的白光相关器。分析与实验均证明, 它可以有效地用于检测具有相同形状的粒子的大小。此系统中补偿光栅的应用使得不同波长的相关点能定位于输出平面的同一位置, 而高通滤波处理则提高了检测精度。尽管实验中存在着光源强度及背景噪声的涨落, 但测量精度仍能达到相对误差 1~2% 以内。而且白光源与沿用的染料激光器相比, 有着方便、廉价、光谱范围宽的优点。

实验中的误差来源于多种因素, 例如光源强度与背景噪声的涨落现象。它使得图 10 和图 11 中某些实测点偏离其“正常”值。故提高光源强度, 降低背景噪声对测量是有利的。

本工作仅是白光相关器实际应用于粒子大小识别的初步研究。尚有许多可改进的地

方。如,可选用更适当的记录介质和处理方法来提高 MSF 和补偿光栅的衍射效率,从而改善整个系统的传输特性。另外,若采用低温致冷的 CCD 阵列探测器接收信号,并与适当的光谱分析和数据处理系统相配合,可显著改善系统的 SNR 和灵敏度,并可实施平行处理,从而使同时检测多粒子成为可能。

本项工作是在美国犹他大学电机系光学实验室完成的,并得到了美国 Center for sensor technology 的资助及犹他大学 Robert E. Benner 教授的支持和帮助,特此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Norman Chigier, Gerald Steward; *Opt. Eng.*, 1984, **23**, No. 5 (Sep), 554~556.
- [2] B. A. Weiss *et al.*; *Opt. Eng.*, 1984, **23**, No. 5 (Sep), 561~566.
- [3] M. J. Houser; *Opt. Eng.*, 1980, **19**, No. 6 (Nov), 873~877.
- [4] W. Grabowski; *Optics and Laser Technology*, 1983, **14**, No. 4 (Aug), 199~205.
- [5] A. Vander Lugt; *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1964, **IT-10**, 139~145.
- [6] D. Cassasent, A. Furman; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 6 (Jun), 1652~1661.
- [7] K. Hinsch; *Opt. Act.*, 1977, **24**, No. 10 (Oct), 1027~1037.
- [8] G. M. Morris and N. George; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 22 (Nov), 3843~3850.
- [9] A. Vander Lugt; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 11 (Nov), 1760~1765.
- [10] T. H. Chao, M. Chen; *Opt. Eng.*, 1986, **25**, No. 6 (Nov), 828~833.
- [11] J. Coedgebuer, R. Gazeu; *Opt. Comm.*, 1978, **27**, No. 1 (Oct), 53~56.
- [12] E. N. Leith, G. J. Swanson; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 4 (Feb), 638~644.
- [13] R. C. Sherman *et al.*; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 22 (Nov), 3579~3583.
- [14] Berndt Kuhlow; *Appl. Opt.*, 1986, **25**, No. 14 (Jul), 2351~2356.
- [15] B. Javidi, F. T. S. Yu; *Appl. Opt.*, 1986, **25**, No. 14 (Jul), 2365~2371.
- [16] T. H. Chao *et al.*; *SPIE Proceedings*, 1987, 754.
- [17] G. M. Morris, N. George; *Opt. Lett.*, 1980, **5**, No. 5 (May), 202~204.
- [18] K. Mersereau, G. M. Morris; *Appl. Opt.*, 1986, **25**, No. 14 (Jul), 2338~2342.
- [19] G. W. Goodman; *«Introduction to Fourier Optics»*, (McGraw-Hill, New York, 1968).
- [20] M. Born, E. Wolf; *«Principle of Optics»*, (Pergamon, New York, 1975), Chap. 10.

## Particle sizing using dispersion-compensated white light correlation and high pass filtering

CAI LUZHONG

(Department of Optics, Shandong University, Jinan)

(Received 12 May 1988; revised 17 April 1989)

### Abstract

A simplified white light correlator with a compensation grating has been developed and proved to be effective for particle sizing when high pass filtering is adopted during MSF fabrication. Both the theoretical analysis and experimental results are presented in this paper. By using this technique the size of objects with the annulus shape can be determined to the accuracy within 1~2% relative error.

**Key words:** correlation detection; white light correlator; particle sizing.