

用于检测透明介质中微粒的光奇异滤波器的研究

张铁强 申铨国 王晓东 郭山河
(吉林工业大学应用物理系, 长春 130025)

提要 本文报道我们研究设计的实时、平行处理像的光学奇异滤波器(Optical Novelty Filter)的原理与结构,以检测透明介质中的微粒为例,分析了影响处理结果的各种因素。利用这一滤波器可以检测出 $15\ \mu\text{m}$ 以上尺寸的微粒,检测的重复性可达 98.6%。

关键词 光学奇异滤波器,双光束耦合,光致折射晶体,检测微粒

Study of optical novelty filter using into detection particle in transparent medium

ZHANG Tiejie, SHEN Xuanguo, WANG Xiaodong, GUO Shanhe

(Department of Applied Physics, Jilin University of Technology, Changchun, 130025)

Abstract This paper describes theory and setup of optical novelty filter, which was used for detecting particle in transparent liquid, and analyses experimental factors to affect measuring accuracy. Using this device, $15\ \mu\text{m}$ size particle could be detected, and its repeatability is up to 98.6%.

Key words optical novelty filter, two beams coupling, photorefractive crystal, detected particle

1 引言

目前已研究设计的光学奇异滤波器有环形光奇异滤波器^[1]、四波混频光奇异滤波器^[2]、频带光奇异滤波器^[3]、扇形光奇异滤波器^[4]等。我们设计了一种新型的具有应用前景的光奇异滤波器。此装置以光束耦合理论为基础,用光致折射晶体 BaTiO_3 作为记忆元件,由柱透镜组成光路。利用此滤波器,检测了在透明流体中的微粒,结果在输出屏幕上观察到明亮的小颗粒运动轨迹。利用此系统,可以检测出 $15\ \mu\text{m}$ 以上尺寸的微粒,其重复性可达 98.6%。

2 原 理

光学奇异滤波器基于如下原理:当两束相干参考光和物光在光致折射晶体里相遇时,干涉光场引起晶体内部折射率的变化,形成折射率光栅。这一光栅场和干涉场之间有 90° 相位差^[5,6]。当参考光继续照射到已形成折射率光栅的晶体上,就会产生衍射,使一部分参考光沿物光方向传播,这时又产生 90° 的相位差。这样,原物光和沿物光方向衍射的参考光之间存在 180° 相位差,因而物光经光致折射晶体后被削弱,在物光输出屏幕上的光强变得很微弱,甚至出现暗场。另外,由于干涉场引起折射率光栅的过程不是即时的,需要一定的响应时间 τ 。因此,当物光光路上的透明像(或物)发生变化或运动的一刹那,因光致折射效应还没有产生,所以在输出屏幕上将出现移动物体或变化了的像的部分。

通过光致折射晶体之后的物光 $I_o(d)$ 和参考光 $I_r(d)$ 可由下式计算得到^[7]

$$I_o(d) = I_o(0) \frac{1 + 1/r}{1 + g/r} \quad (1)$$

$$I_r(d) = I_r(0) \frac{1 + r}{1 + r/g} \quad (2)$$

式中 $I_o(0)$ 和 $I_r(0)$ 分别为入射到晶体上的物光和参考光的光强; d 是两束光在晶体内作用距离; $g = \exp(\gamma d)$ 是耦合增益, γ 是决定于光致折射晶体、激光参数和耦合几何尺寸的耦合系数^[4]; r 是输入光束的光强之比,即

$$r = \frac{I_o(0)}{I_r(0)} \quad (3)$$

当两束光发生强耦合时, $g \rightarrow \infty$,物光的输出 $I_o(d) \sim 0$,在输出屏上几乎不存在物光,呈现一片暗。如果物光束的相位突然发生变化(物体运动或发生变化),但在晶体响应时间内折射率光栅来不及变化,两束光之间的耦合被破坏,这时在物光输出屏上出现移动物体或变化的部分的像。用对比度 C 描述光奇异滤波器的特性,其定义为

$$C = \frac{I_o(\text{new})}{I_o(\text{old})} = \frac{1 + g}{1 + 1/g} \quad (4)$$

式中 $I_o(\text{new})$ 是物体运动或变化的瞬间物光的输出光强; $I_o(\text{old})$ 为物体不动或不变时物光的输出光强。对应于强耦合的情况,耦合增益很高,即 $g \gg 1$, (4) 式化为

$$C \approx g \quad (5)$$

即在强耦合时,对比度和增益近似相等。

3 实验装置与实验结果

图 1 是所设计的光奇异滤波器的实验装置。由 50 mW He-Cd 激光器发射的激光束被分束器 BS 分为物光束和参考光束。其中物光束通过光闸 OW 后经扩束准直镜 COL 扩束,又通过柱面镜 CL_1 聚焦成垂直线状光束照射到样品 RS 上。样品是在纯净的水里分别加入已知或未知尺寸的微小颗粒,如玻璃纤维等,并且样品瓶用可调速的马达来转动。由样品出来的信号光经柱面镜 CL_2 水平聚焦后,通过成像透镜 L 把样品成像于屏幕 DP 上,该系统的放大倍数为 10 倍,参考光束经反射镜 MR 反射后与物光成很小角度同时照射到光致折射晶体 $BaTiO_3$ 上。由晶体输出的物光束直接通过放置在晶体之后光路上的屏幕来观察。

实验过程表明,当电机不转,样品处于静止不动状态时,光束之间产生强耦合,由晶体输出的物光很弱,屏幕为暗的。当闸关闭的同时,电机带动样品瓶旋转很短时间(约为 1 s)后停止转

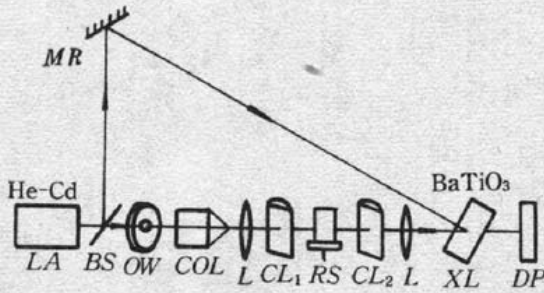


Fig. 1 Experimental apparatus

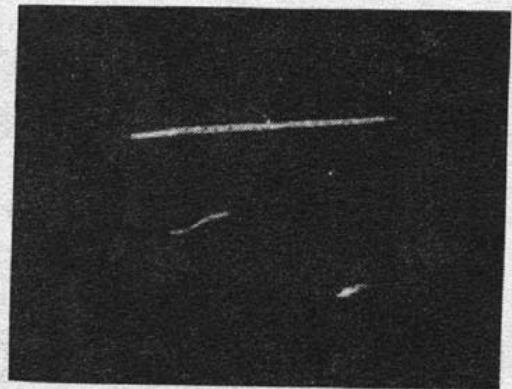


Fig. 2 Bright fringes of moving particles

动,同时打开光闸,则样品瓶内纯净液体里的微粒将靠惯性继续运动,在响应时间 τ 内在屏上观察到反映运动微粒的亮条纹或像,如图 2 所示。

小微粒条纹或像的清晰度明显与对比度 C 成比例,而对比度 C 同折射率光栅矢量方向 (K) 与光轴方向之间的夹角 θ 和入射光强之比 r 有关,图 3 和图 4 是利用该装置得到的实验曲线。由图中可见,当 $\theta \approx 55^\circ, r = 0.6$ 时,其对比度最大,可达到 13。

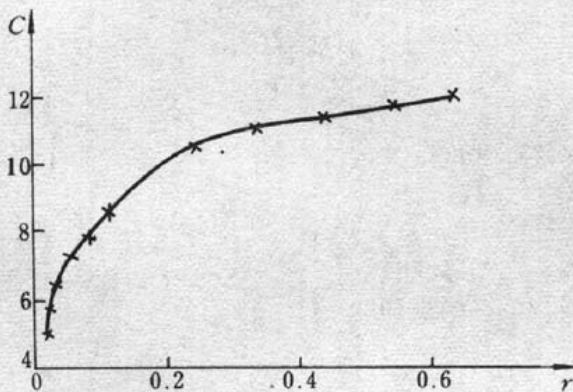


Fig. 3 Contrast ratio vs angle between the grating vector and the optic axis

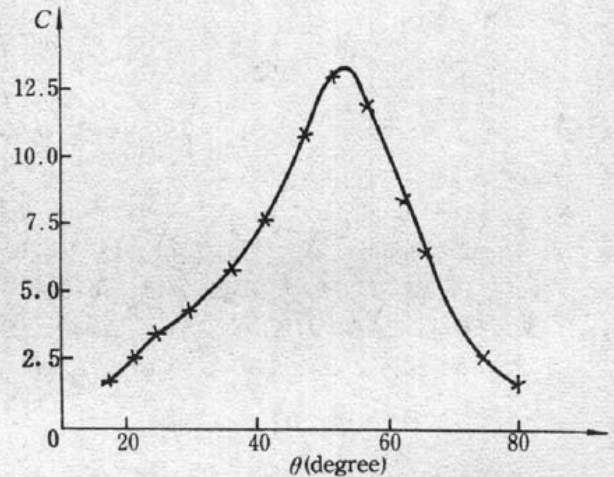


Fig. 4 Contrast ratio measured as a function of the intensity ratio of mixing beams

在最佳条件下,分别对不同尺寸的微粒 ($10 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m}, 30 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m}$ 等) 进行探测,结果明显地观察到 $15 \mu\text{m}$ 以上尺寸的微粒运动的亮条纹(当微粒快速运动时)或像(当微粒速度很小时),经 500 次同样实验,其可探测重复率达 98.6%。显然,反过来也可以根据像的大小和系统放大倍数,检测微粒的大小。

如果微粒运动速度非常缓慢,则双光束的耦合将跟上物(或像)的变化,物光仍处抽空状态,屏幕上观察不到运动微粒的亮纹或像。可测微粒的最小运动速率由响应时间 τ 和系统最小分辨尺寸 l 决定,有如下关系

$$V_{\min} = \frac{l}{\tau} \tag{6}$$

耦合响应时间 τ 与入射到晶体上的物光和参考光的总光功率决定,图 5 为所得到的实验曲线。当响应时间为 200 ms 时,因该装置的最小分辨尺寸为 $15 \mu\text{m}$,所以可检测的最小微粒速度 V_{\min} 是 $75 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

本文中的主要实验是在美国 Rose-Hulman 工学院应用光学研究中心完成的。作者感谢他

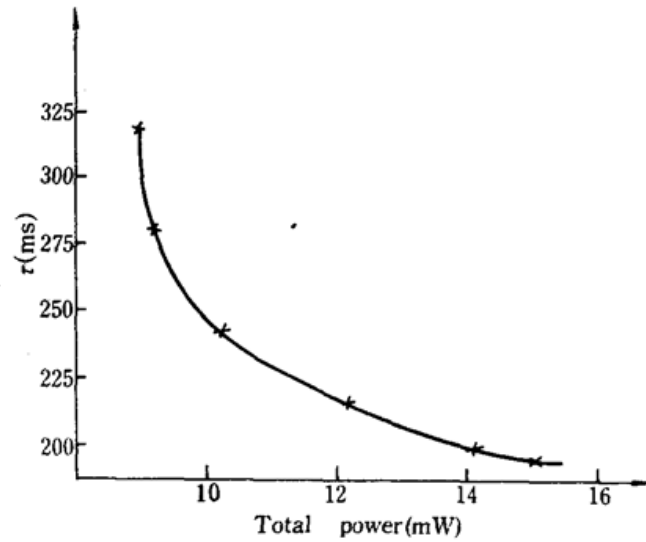


Fig. 5 Crystal response plotted against the total power of the object beam and reference beam

们提供良好的实验条件和热情友好的帮助。

参 考 文 献

- 1 U. S. Patent 477 3719, Sep. 27(1988)
- 2 D. Z. Anderson *et al.*, *Opt. Lett.*, **12**, 123~125(1975)
- 3 N. S. K. Kwong *et al.*, *J. Opt. Soc. Amer. B*, **5**, 1788~1791(1988)
- 4 M. Cronin-Glomb *et al.*, *Opt. Lett.*, **12**, 1029~1031(1987)
- 5 Vahey, D. W. J., *Appl. Phys.*, **46**, 3510~3515(1975)
- 6 S. K. Kwong *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-22**, 1508~1523(1986)
- 7 D. Z. Anderson *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-25**(3), 635~641(1989)