

# 用四波混频对反射型物体进行消畸变成像

林 红 张洪钧 丁 汉 泉  
(中国科学院物理研究所) (北京航空学院)

## 提 要

本文讨论了一种利用简并四波混频对反射型物体消畸变成像的方法, 给出了存在两层位相畸变介质时一个反射点和一个反射型物体的消畸变成像的实验结果。

## 一、引 言

消除电磁场在传播过程中产生的各种畸变是人们一直关注的问题。传统的全息术中有几种方法可以消除场的静态位相畸变, 但不能对场进行实时处理。七十年代以来, 人们发现, 一些非线性系数较大的物质在相干光作用下能实时地产生位相共轭波<sup>[1]</sup>, 其中四波混频(FWM)由于所需泵浦功率密度较低, 效率高等优点受到格外注意。四波混频在原理上与传统的全息术有许多相似之处。因此, 人们把全息术中的概念借用到四波混频中来, 设计了各种实时消除位相畸变的方案。

四波混频按共轭波的传播方向可分为前向四波混频(FFWM)和后向四波混频(BFWM), 按参与相互作用的光频率可分为简并四波混频(degenerate FWM)和非简并四波混频(nondegenerate FWM)。O'Meara<sup>[2]</sup>和 Ivakhnik 等<sup>[3]</sup>根据 Goodman<sup>[4]</sup>在全息术中运用的物光和参考光等畸变的思想, 分别设计了利用前向四波混频和后向四波混频对物体进行消畸变成像的系统。但是, 这两种系统都存在一个问题, 即只在畸变介质层很薄且靠非线性介质很近时才能取得较好的消畸变效果。而且, 由于泵浦光与探测光同轴, 就会产生与同轴全息图类似的问题: 消畸变的光场与其它信息混在一起, 必须采用滤波或偏振识别的方法将其提取出来。因而增加了系统的复杂性。Yariv 等<sup>[5]</sup>提出用后向四波混频来解决单程图像传输的问题。之后, 许多人从理论和实验上验证并扩展了这一想法<sup>[6~11]</sup>。然而, 迄今这方面的工作只限于透射型物体的传输, 而在实际生活中大量的物体是漫反射型的。本文讨论一种用后向简并四波混频对反射型物体实现消畸变成像的方法, 并给出一个反射点通过两层位相畸变介质的消畸变成像实验结果和在同样条件下对一个反射型物体的模拟扫描结果。

## 二、原 理

为讨论问题方便起见, 设反射型物体为一球面, 其曲率中心  $O$  点位于光轴上(如图 1 所

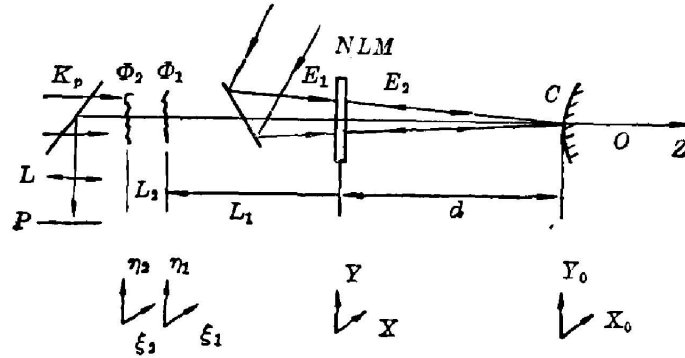


Fig. 1 Illustration of the principle

示), 球面与系统光轴的交点  $O$  与非线性介质(NLM)的间距记为  $d$ 。在观察面  $P$  和物体的  $C$  点之间有两层薄畸变介质, 它们引起的位相畸变为  $\exp[i\Phi_1(\xi_1, \eta_1)]$  和  $\exp[i\Phi_2(\xi_2, \eta_2)]$ ,  $\Phi_1(\xi_1, \eta_1)$  与非线性介质的间距为  $l_1$ ,  $\Phi_1(\xi_1, \eta_1)$  与  $\Phi_2(\xi_2, \eta_2)$  的间距为  $l_2$ 。平行光通过畸变介质照到非线性介质上, 形成探测光场  $E_p$ 。用一束振幅为  $K_1$  的会聚球面波作泵浦光  $E_1$ , 它的会聚点就在  $O$  上。从  $O$  点反射回来的光起到了另一束泵浦光  $E_2$  的作用。设非线性介质的厚度可以忽略, 利用傍轴近似, 这三束光各自的表达式如下

$$E_1(x, y) = K_1 \exp[i(k/2d)(x^2 + y^2)], \quad (1)$$

$$E_2(x, y) = \mu K_1 \exp[i(k/2d)(x^2 + y^2)], \quad (2)$$

$$E_p(x, y) = K_p \frac{\exp[ik(l_1 + l_2)]}{\lambda^2 l_1 l_2} \iiint \left\{ \exp[i\Phi_1(\xi_1, \eta_1) + i\Phi_2(\xi_2, \eta_2)] \right. \\ \times \exp\left\{i(k/2l_1)[(x - \xi_1)^2 + (y - \eta_1)^2]\right. \\ \left. + \frac{ik}{2l_2}[(\xi_1 - \xi_2)^2 + (\eta_1 - \eta_2)^2]\right\} d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2, \quad (3)$$

其中  $\mu$  是  $O$  点的反射系数。三束波在非线性介质中相互作用, 产生的感应电极化强度  $P_{NL}$  可表达为

$$P_{NL} = \chi^{(3)} E_1 E_2 E_p^* \quad (4)$$

$P_{NL}$  作为场源, 激发起第四个波, 即“共轭波”。它沿  $E_p$  的反向传播。因此, 在紧靠  $\Phi_2(\xi_2, \eta_2)$  后面的平面上所得场分布为

$$E_O(\xi'_2, \eta'_2) = K_O \frac{\exp[ik(l_1 + l_2)]}{\lambda^2 l_1 l_2} \iiint \left\{ E_1 E_2 E_p^* \exp[i\Phi_1(\xi'_1, \eta'_1) + i\Phi_2(\xi'_2, \eta'_2)] \right. \\ \times \exp\left\{i(k/2l_1)[(x - \xi'_1)^2 + (y - \eta'_1)^2]\right. \\ \left. + \frac{ik}{2l_2}[(\xi'_1 - \xi'_2)^2 + (\eta'_1 - \eta'_2)^2]\right\} dx dy d\xi'_1 d\eta'_1 \\ = K_O \frac{1}{(\lambda l_1)^2 (\lambda l_2)^2} \int \dots \int \exp[i\Phi_2(\xi'_2, \eta'_2) - i\Phi_2(\xi_2, \eta_2)] \\ \times \exp[i\Phi_1(\xi'_1, \eta'_1) - i\Phi_1(\xi_1, \eta_1)] \\ \times \exp\left\{i(k/2l_2)[(\xi'_1 - \xi'_2)^2 + (\eta'_1 - \eta'_2)^2] - \frac{ik}{2l_2}[(\xi_1 - \xi_2)^2 + (\eta_1 - \eta_2)^2]\right\} \\ \times \exp\left\{i(k/2l_1)[(x - \xi'_1)^2 + (y - \eta'_1)^2] \right. \\ \left. - (x - \xi_1)^2 - (y - \eta_1)^2\right\} dx dy d\xi_1 d\eta_1 d\xi'_1 d\eta'_1 d\xi_2 d\eta_2, \quad (5)$$

$$K'_c = K_1 \mu K_1 K_p K_o, \quad (6)$$

其中  $K_c, K'_c$  皆为常数。将(5)式加以整理, 并利用

$$\iint \exp\{i(k/l_1)[(\xi_1 - \xi'_1)x + (\eta_1 - \eta'_1)y]\} dx dy = (\lambda l_1)^2 \delta(\xi_1 - \xi'_1, \eta_1 - \eta'_1), \quad (7)$$

可得到

$$\begin{aligned} E_c(\xi'_2, \eta'_2) &= K'_c \frac{1}{(\lambda l_2)^2} \iiint \exp[i\Phi_2(\xi'_2, \eta'_2)] - i\Phi_2(\xi_2, \eta_2) \\ &\quad \times \exp\{i(k/2l_2)[(\xi'_1 - \xi'_2)^2 + (\eta'_1 - \eta'_2)^2 \\ &\quad - (\xi_1 - \xi_2)^2 - (\eta_1 - \eta_2)^2]\} d\xi'_1 d\eta'_1 d\xi_2 d\eta_2 \\ &= K'_c \iint \exp[i\Phi_2(\xi'_2, \eta'_2) - i\Phi_2(\xi_2, \eta_2)] \\ &\quad \times \exp[i(k/2l_2)(\xi_2'^2 + \eta_2'^2 - \xi_2^2 - \eta_2^2)] \delta(\xi_2 - \xi'_2, \eta_2 - \eta'_2) d\xi_2 d\eta_2 \\ &= K'_c. \end{aligned} \quad (8)$$

因此, 从第二个畸变层后面出射的是振幅为  $K'_c$  的平面波。用观察透镜  $L$  把它聚焦在  $P$  平面上, 就可以得到一个无畸变的像点。借助于文献[11]中用过的同样方法可知, 这个结论可推广到多层畸变介质的情况。

我们注意到, 在以上的推导过程中, 对畸变介质本身的性质和畸变介质与非线性介质的相对位置不需要提出附加要求。换句话说, 在非涅耳-夫琅和费衍射公式成立的条件下, 这种方法能够“百分之百”地恢复物点。从(6)式中还可看到, 共轭光的光强也与反射点的反射率成正比。 $\mu$  越大,  $K'_c$  就越大, 从而  $I_c$  也越大。

任一反射体可以看成是许多反射点的集合, 物体上各点的反射系数都不同, 是空间坐标的函数  $\mu = \mu(x_0, y_0, z_0)$ 。我们在定义  $\mu$  时只计及那些反射回会聚光锥内的光波。因为在此光锥内, 反射波与入射波相共互轲, 位相匹配条件  $\mathbf{K}_1 = -\mathbf{K}_2$  总是满足的。至于物体上各点究竟有多少光波能进入此光锥, 正好反映了物体各点在会聚泵浦光束方向上的反射特点。在上述方法的基础上, 让会聚泵浦光束对物体进行逐点扫描。由于反射系数逐点不同, 最后得到的消畸变图像将真实地反映物体在此方向上的图像信息。

### 三、实验方法和结果

首先, 我们验证了反射型物体上一个点消畸变成像的想法。实验装置如图 2 所示。用 50 mW He-Ne 激光器作相干光源, 以掺铁量 0.1% 的铌酸锂晶体 (Fe:LiNbO<sub>3</sub>) 作非线性介质<sup>[13]</sup>, 晶体的光轴与激光振动方向处于同一平面内, 用两块厚度不同的且形状不规则的玻璃作畸变介质。 $M_1$  和  $M_2$  是反射镜。分束板  $BS_1$  把经过扩束-准直系统(由  $L_1$  和  $L_2$  组成)的激光分为两束, 一束经过  $L_3$  变为会聚于  $C$  点上的球面波  $E_1$ ; 另一束通过两个畸变层照到晶体上, 形成探测波  $E_p$ 。反射点  $C$  是最简单的反射体——平面反射镜上的一点, 它反射回来的光即为  $E_2$ 。图 3 给出了  $C$  点无畸变、有畸变和消畸变的三种情况。实验结果说明, 这种方法可以有效地消除一个反射点的位相畸变。

随之我们进行了一维扫描实验。物体是反射系数很高的两条窄缝, 如图 4 所示。它的反射系数为

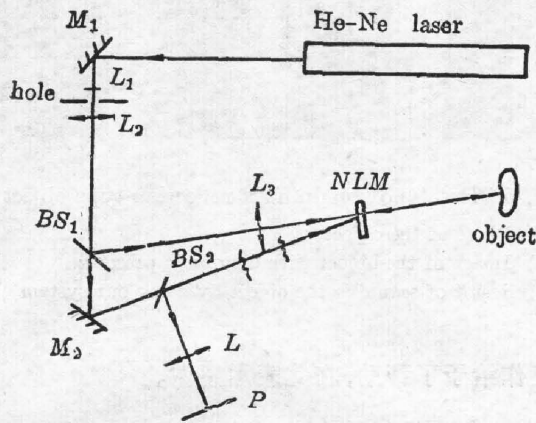


Fig. 2 Experimental arrangement

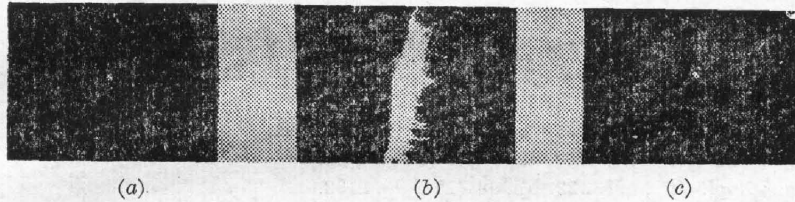


Fig. 3 The experimental result of a reflecting point

- (a) The point without distortion;
- (b) Imaging the point only with a lens;
- (c) The point eliminated distortion using our experimental arrangement

$$\mu(x_0, y_0) = \begin{cases} 0 & [(b/2) + t] < |x_0| < (b/2); |y_0| > (h/2) \\ k & \text{其余处} \end{cases}$$

其中  $k$  为一小于 1 的正数。把物体和记录干板都装在微调平台上, 沿  $x_0$  方向对物体进行扫描, 记录干板也作相应的移动, 等间距地记录消畸变像点。图 5 是扫描的实验结果。由于是沿  $x_0$  方向扫描, 所以得到两条宽为  $t$ , 相距为  $b$  的亮线。可以想象, 如果进行的是二维扫描, 必定可得到整个物体的消畸变成像结果。

理论分析和实验结果表明, 这一方法为反射型物体通过位相畸变介质成像提供了一种有效手段。这种方法的优点是: 对反射率较高的物体, 只需两束相干光就可进行工作; 而对反射不够强的物体, 可以采用 Wang<sup>[12]</sup> 的方法, 再用一非线性介质去产生会聚于物体上的强光, 由于采用了会聚泵浦光束, 对激光器功率和非线性介质的效率的要求也相应降低了, 比非会聚方式要低若干量级。在我们的系统中, 不要求探测光与泵浦光同轴, 所以不会产生观察不便的问题。而且当存在多层位相畸变介质时以及畸变物离非线性介质较远的情况下, 也能得到良好的消畸变效果。如果配以相应的光电扫描装置, 就有可能制成具有实用价值的经畸变介质成像的实时装置。

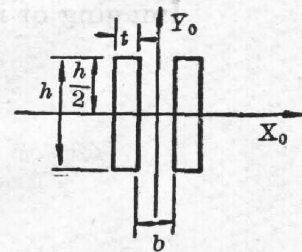


Fig. 4 Reflection-type object used in the experiment

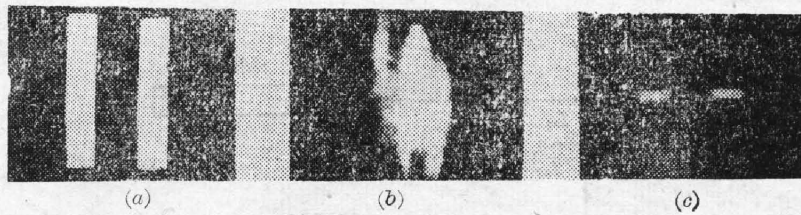


Fig. 5 Results of scanning a reflection-type object

- (a) Photo of the object;
- (b) Image of the object with distortion present;
- (c) Result of scanning the object by using our system

戴建华同志在实验工作给予了帮助,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] «Optical Phase Conjugation», Edited by Robert A. Fisher, (Academic Press, 1983).
- [2] T. R. O' Meara; *Opt. Engng*, 1982, **21**, No. 2 (Mar/Apr), 231.
- [3] V. V. Ivakhnik *et al.*; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1980, **10**, No. 4 (Apr), 514.
- [4] J. W. Goodman *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **8**, No. 12 (15 Jun), 311.
- [5] A. Yariv, T. L. Koch; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 3 (Mar), 113.
- [6] B. Fisher *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**, No. 2 (15 Jul), 141.
- [7] J. Feinberg; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **42**, No. 1 (1 Jan), 30.
- [8] O. Ikeda *et al.*; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 14 (15 Jul), 2192.
- [9] O. Ikeda *et al.*; *J. O. S. A. (A)*, 1984, **1**, No. 2 (Feb), 176.
- [10] H. Lin *et al.*; *to be published*.
- [11] H. Lin *et al.*; *to be published*.
- [12] V. Wang; *Opt. Engng*, 1985, **24**, No. 3 (May/Jun), 267.
- [13] 张洪钧等;《物理学报》, 1984, **33**, No. 11 (Nov), 1593.

## Imaging of reflection-type objects through distorting media via four-wave mixing

LIN HONG AND ZHANG HONGJUN  
(Institute of Physics, Academia Sinica)

DING HANQUAN  
(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

(Received 27 May 1985; revised 26 October 1985)

### Abstract

A method for imaging of reflection-type objects through distorting media via degenerated four-wave mixing is discussed. The experimental results of imaging a reflecting point and an object through two phase-distorting layers are presented.