

全息位相差放大技术

戚张芬 陈建文 张大可 傅淑芬

(中国科学院上海光机所)

提要: 提出了在位相差放大技术中用来消除波象差的一种方法。在 Mach-Zehnder 干涉仪的两臂中分别插入一张全息图,其中一张既带有物体位相信息,也带有系统象差;另一张只带有系统象差信息;再现时能消除象差,同时物体位相差得到放大。

Holographic technique used in phase difference amplification

Qi Zhangfen, Chen Jianwen, Zhang Dake, Fu Shufen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: A method for eliminating wavefront aberration used in phase difference amplification was proposed. Two holograms were inserted in two optical paths of a Mach-Zehnder interferometer respectively. One of the holograms recorded the information of both object phase and wave-front aberration of the system, the other recorded only that of wavefront aberration. While reconstructing, the wavefront aberration could be eliminated and the amplified phase difference obtained. The experimental results were given finally.

一、引言

用全息术进行微小位相差放大,已有许多理论和实验研究工作^[1~6]。文献[4]给出了高达 32 倍的位相差放大方法,但与大多数文献所报道的一样,在放大位相物体位相差的同时,也把光学系统的波象差进行了同样倍数的放大,因此,限制了它的适用性。文献[3]报道了一种全息非线性位相差放大中消除波象差的方法,但这种方法只适用于非线性位相差放大。本文报道另一种消除波象差的方法,这种方法比较简便,并且对于各种位相差放大的方法均可适用。

二、原理

二次曝光全息干涉仪一个显著的优点是在时间上是微分的,相干涉的两列波在时间上是分离的,而不象一般干涉仪那样在空间上是分离的。在位相差放大技术中,如果应用全息干涉仪,那么就可消去由于光学系统质量不好而引起的波象差。这就是本文的出发点。

但是,在非线性全息位相差放大技术中,全息记录是非线性的,全息图在再现时将会出现高阶衍射项,位相差放大正是用了这些

收稿日期:1985年8月26日。

高阶项才得以实现。而对于二次曝光的全息图，衍射级次的增加只会使再现光波的条纹图变锐，而没有位相差放大。我们的目的是要求既能进行非线性位相差放大，又能用二次曝光的原理消除波象差。

1. 直接放大

如图1，采用一个Mach-Zehnder干涉仪，在其一臂插入物体O。设各光束均为平面波。在H处放置干板H₁，那么，在H₁上点x处的参考光为(x为全息干板的横向坐标)：

$$U_r = \exp iK [\delta_r + x \sin \theta_r]$$

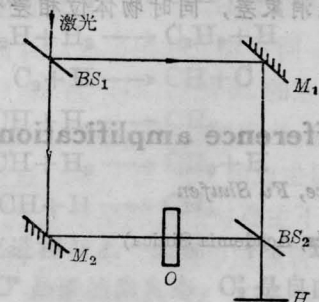


图1 用于记录全息图的光学系统

物光为：

$$U_o = \exp iK [\varphi(x, y) + \delta_o + x \sin \theta_o]$$

式中 $K = 2\pi/\lambda$ ， λ 为激光波长； θ_r 、 θ_o 分别为参考光、物光相对于干板法线方向的入射角； δ_r 为参考光从 BS₁ 到干板的总光程(包括该光路中光学元件引起的波象差，是坐标的函数)， δ_o 为物光从 BS₁ 至干板的光程(同样也包括了该光路中光学元件的波象差)； $\varphi(x, y)$ 是由物体引起的程差。为简单起见，已假定光波振幅为单位值。到达干板处的光强为：

$$I_1 = |U_r + U_o|^2 = 2 + 2 \cos K [\varphi(x, y) + (x \sin \theta_o - x \sin \theta_r) + (\delta_o - \delta_r)] \quad (1)$$

如果记录是非线性的，那么经过一系列处理以后其振幅透射率为：

$$T_1 = \sum_{m=-N}^N b_m \exp \{imK [\varphi(x, y) + x(\sin \theta_o - \sin \theta_r) + (\delta_o - \delta_r)]\} \quad (2)$$

b_m 为第 m 阶衍射光的振幅。在完成了第一张全息图的记录以后，把物体从光路中移走，并在 H 处放上第二张干板 H₂ 此时到达干板处的光强为：

$$I_2 = 2 + 2 \cos K [x(\sin \theta_o - \sin \theta_r) + (\delta_o - \delta_r)] \quad (3)$$

全息记录也是非线性的，且同处理第一张全息图一样，可得振幅透射率为：

$$T_2 = \sum_{m=-N}^N b_m \exp \{imK [x(\sin \theta_o - \sin \theta_r) + (\delta_o - \delta_r)]\} \quad (4)$$

将处理好的两张全息图 H₁、H₂ 分别插到干涉仪的两个臂，如图2所示。在干涉仪之后放一空间滤波系统，调节 M₁、BS₂ 使得 H₁ 的第 m 阶衍射波与 H₂ 的第 m 阶衍射波在同一方向，且用空间滤波器 F 选出。到达 S 面处的两束光为：

$$U_1 = b_m \exp \{imK [\varphi(x, y) + x(\sin \theta_o - \sin \theta_r) + (\delta_o - \delta_r)]\} \cdot \exp iK (x \sin \theta_1 + \delta_1)$$

$$U_2 = b_m \exp \{imK [x(\sin \theta_o - \sin \theta_r) + (\delta_o - \delta_r)]\} \cdot \exp iK (x \sin \theta_2 + \delta_2)$$

θ_1 、 θ_2 分别为两束光相对于 S 面法线方向的夹角， δ_1 、 δ_2 为两束光的光程(包括波象差)。在 S 面处的光强为：



图2 用于全息图再现的光学系统

$$\begin{aligned}
 I_3 &= |U_1 + U_2|^2 \\
 &= 2b_m^2 + 2b_m^2 \cos K\{m\varphi(x, y) \\
 &\quad + x(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) + (\delta_1 - \delta_2)\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

如果使得上述两干涉光均在垂直于 H_2 的方向上, 则上式中的角度项消失。于是:

$$\begin{aligned}
 I_3 &= 2b_m^2\{1 + \cos k[m\varphi(x, y) \\
 &\quad + (\delta_1 - \delta_2)]\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

可见物体位相被放大了 m 倍, 而波象差没有放大。

2. 再放大

如图 2, 调节 M_1, BS_2 使得经 H_1 衍射的第 m 级波与经 H_2 衍射的第 m 级波不是在同一方向, 彼此错开一个小的角度。用空间滤波器把此两波选出来, 在滤波器后面两波重合处放置第三张干板 H_3 , 于是 H_3 记录的是由 (5) 式所表示的光波, 只是 θ_1, θ_2 有了一个小的变化, 设为 θ'_1, θ'_2 。假定记录也是非线性的, 那么全息图 H_3 的振幅透射率为:

$$\begin{aligned}
 T_3 &= \sum_n b_n \exp inK\{m\varphi(x, y) \\
 &\quad + x(\sin\theta'_1 - \sin\theta'_2) + (\delta_1 - \delta_2)\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

显然, H_3 是对应于一张二次曝光全息图。然后, 在记录 H_3 的位置处放置第四张干板 H_4 , 并把 H_1, H_2 从干涉仪中撤去, 同时也把作为滤波系统用的透镜 L 和滤波器 F 移掉。同 H_2 的拍摄一样, H_4 经非线性处理后, 可得振幅透射率为:

$$\begin{aligned}
 T_4 &= \sum_n b_n \exp in'K\{x(\sin\theta'_1 \\
 &\quad - \sin\theta'_2) + (\delta_1 - \delta_2)\} \quad (8)
 \end{aligned}$$

H_3, H_4 处理好以后, 其再现步骤与直接放大时的再现完全一样。设滤波器选出的是 H_3 , H_4 的第 n 阶衍射波, 那么最后可得到的光强为:

$$\begin{aligned}
 I_e &= 2b_n^2[1 + \cos K\{mn\varphi(x, y) \\
 &\quad + (\delta'_1 - \delta'_2)\}] \quad (9)
 \end{aligned}$$

可见物体的位相差被放大了 mn 倍。与文献 [1] 的结果相比, 已把 $(mn-1)$ 倍的系统波象差消除。

三、实验装置与结果

实验装置如图 3 所示。虚线所表示的是再现光路, 光源是 He-Ne 激光器, L_1, F_1 是为了改善光束质量而引入的空间滤波系统, ST 是扩束望远镜, M, M_1, M_2 为全反射镜, 分束器 BS_1, BS_2 的分束比约为 1:1。当 $\gamma > 2$ 时, 全息图的记录就是非线性的。

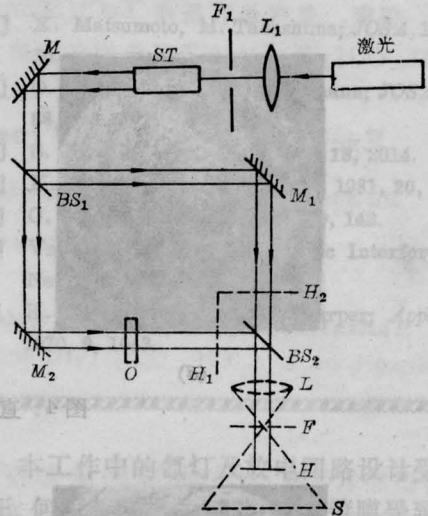
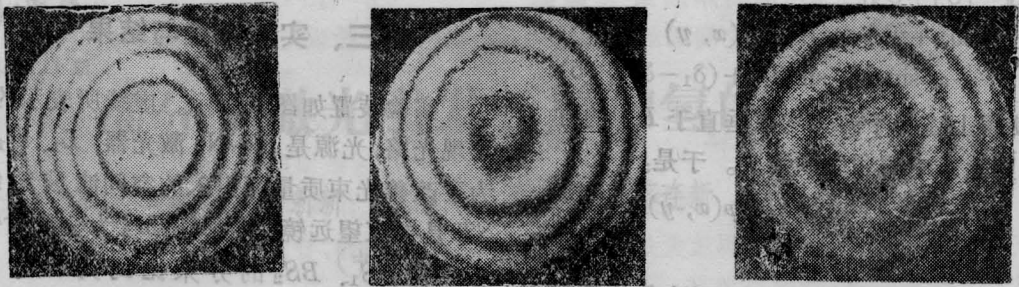


图 3 消象差非线性位相差放大的实验装置

记录全息图时, 在满足空间载波频率大于信号空间频宽的条件下, 使两光束的夹角尽可能小, 以便尽可能避免干板乳胶处理时出现的横向收缩, 以及使两相干涉的光相对于干板法线对称入射, 避免厚度收缩。所用的是 10E75 全息干板, 并进行了漂白处理, 最后用无水乙醇浸泡。

在记录第一张全息图 H_1 时, 在干涉仪一臂中的物体是一块大曲率半径的光学玻璃, H_2 是无物体时记录的全息图。图 4(a)~(e) 是按图 3 虚线所示再现光路得到的直接放大干涉图, 得到 5 倍的放大。

图 5(a)~(d) 是用 H_3, H_4 代替 H_1, H_2 , 再现得到的再放大干涉图, 其中 (a)~(c) 分别为原物体位相的 6 倍、9 倍和 12 倍放大; (d) 为 15 倍, 但由于噪音已不能辨认。



(a)

(b)

(c)



(d)



(e)

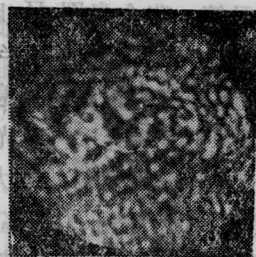
图4 直接放大得到的干涉图



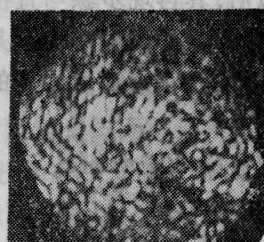
(a)



(b)



(c)



(d)

图5 再放大得到的干涉图

从图 5(c)可得到所测物体的最大偏离量为 0.07λ , 读数准确至条纹间隔的 $1/4$ 。

四、讨 论

使用本文所介绍的方法, 若还想得到高的放大倍数, 那么只要重复再放大过程就行, 而且放大倍数越高, 精度也越高。

另外, 要获得高的放大倍数, 必须继续减小干板乳胶的收缩和散射噪声^[7]。

从(9)式可以看出, 由于光学系统引起的误差为:

$$\epsilon_s = \delta'_1 - \delta'_2$$

对于位相差放大 mn 倍的干涉图, 假定读数可准确至条纹间隔的 $\frac{1}{e}$, 于是读数误差为:

$$\epsilon_r = \lambda/mne$$

总误差为:

$$\epsilon = \epsilon_s + \epsilon_r = (\delta'_1 - \delta'_2) + \lambda/mne$$

要使得读数误差大于系统误差, 应满足

$$\delta'_1 - \delta'_2 < \lambda/mne$$

这一条件比文献[1]给出的条件宽容得多。若 $e=4$, 则读数误差为 $\lambda/48$ 。

本工作曾得到北京工业学院于美文教授的通信指导, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] K. Matsumoto, M. Takashima; *JOSA*, 1970, **60**, 30.
- [2] O. Bryngdahl, A. W. Lohmann; *JOSA*, 1968, **58**, 141.
- [3] S. Toyooka; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, 2014.
- [4] K. Matsuda *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, 2763.
- [5] O. Bryngdahl; *JOSA*, 1969, **59**, 142.
- [6] Vest, Chakles M.; *Holographic Interferometry*. New York, Milley, 295(1979).
- [7] K. S. Pennington, J. S. Harper; *Appl. Opt.*, 1970, **9**, 1643.

(上接第 709 页)

三、论 结

从我们得到的阈值、输出能量及调谐范围的结果来看, $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 晶体激光器已达到实际应用的水平。但和国外相比还有一定的差距。我们从 [2] 中的实验结果计算得知, 他们的泵浦参数 K 达到 6.45×10^{-3} , L 值为 0.08。因此, 要进一步降低阈值及提高输内能量, 降低腔内损耗 L 值是我们今后的主要工作。

本工作中的氙灯及放电回路设计受到林文正、何明芳同志的帮助, 宽带镀膜受到杜世高同志的支持; 清华大学实习学生谭国陞、张英博参加了部分实验工作, 一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] W. Koecher; "Solid State Laser Engineering", Springer New York Heidelberg Berlin, 1976, p. 86, 254.
- [2] J. C. Walling *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980, **QE-16**, No. 12, 1932.

