

# 激光束波面畸变的全息诊断与补偿

余文炎 王桂英 王士森\* 李亚\*

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文报导一种补偿激光波面畸变的新方法。我们以象散光束为例,根据轴向全息图能够给出该光束补偿系统的状态。而且,利用双狭缝滤波和“交叉滤波”技术能够提取出具有位相调制或者是具有振幅起伏的近场波面。从而为在高功率激光系统中应用主动补偿象差技术提供了可能性。

## Diagnosis and compensation of wavefront distortion of laser beams

*Yu Wenyan, Wang Guiying, Wang Shisen, Li Ya*

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

**Abstract:** This paper reports a new method to compensate the wavefront distortion. Taking a laser beam of astigmatic aberration as an example, the state of the laser beam compensating system can be given by the axial hologram of the laser beam. And the techniques of double-slit filter and “cross-filter” can be used to extract the near field wavefront of the laser beam with phase modulation and amplitude fluctuation. It is possible to use the active compensating technique of laser beam in a high power Nd-glass laser system.

激光核聚变研究的一个重要问题是如何提高靶面的照度,而靶面照度的提高取决于器件输出光束的亮度。为此,必须对光束的空间特性做出精确的诊断,并在这个基础上对光束采取相应的整形和补偿措施。在文献[1]中,我们提出了一种激光波面的全息诊断法,由于采用全息再现的方法提取信息,而不必对条纹宽度作精密测量,因此它比一般干涉仪的精度高。本文利用这种全息图作为诊断工具,给出了纯象散激光束的补偿条件。实验表明这种方法简便可行,而且补偿精度高。

为了进一步探讨具有任意波象畸变光束

的主动补偿技术,我们打算将瞬态的1.06微米激光所得到的全息图以连续可见的He-Ne激光再现,通过“双狭缝滤波”和“交叉滤波”技术,使原光束近场的位相和振幅呈现在三维空间中。这样就有可能采用自适应的可变形反射镜<sup>[2]</sup>对畸变的激光束进行波面修正。

毫无疑问,一个能够补偿全息再现波面的光学系统,对原光束波面的补偿是有效的。要注意的是如果再现光束的波长与原光束波长不相同,必须加入一个波长修正因子。

文献[3]中已经详细地介绍了纯象散光

收稿日期:1982年6月25日。

\* 长春光机学院应届毕业生。

束补偿的概念和方法。本工作则是利用全息图提供的信息更加直观和准确地确定补偿透镜的状态。而且通过对象散波面补偿的研究,可以得到具有其它初级象差的波面补偿的一般规律。

## 一、利用全息图来确定补偿透镜的状态

我们在文献 [1] 中报导的全息诊断装置的结构如图 1 所示。分光板  $C$  把被测光束分为两束,使反射光经过望远镜扩束  $M$  倍作为参考光,而透射光则缩束  $M$  倍作为被测光束。两束光经历相当的光程之后在  $C$  板射出,形成一幅轴向全息干涉图。根据高功率激光束的特点,适当地选择  $M$  值,可使参考光束的波面曲率半径接近千米,即可近似认为是平行光束。把该全息图垂直地置于扩束为平行光的 He-Ne 激光中,即可再现出与被测光源共轭的实象。通过测量实象到全息图的距离  $R_{全}$ ,可以推算出原激光束波面半径:

$$R = (M^2 - M^{-2}) \frac{\lambda_{再现}}{\lambda_{测}} R_{全} \quad (1)$$

式中  $\lambda_{再现}$  和  $\lambda_{测}$  分别为再现光和被测光的波长。当再现光束与被测光束为同一波长时,波长修正因子  $\lambda_{再现}/\lambda_{测} = 1$ 。

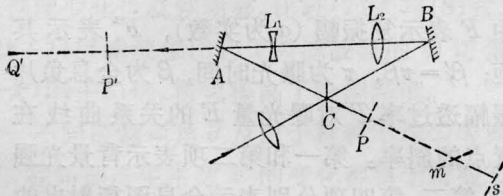


图1 全息诊断装置结构示意图

$A$ 、 $B$ 、 $C$  为三平板干涉仪;  $L_1$ 、 $L_2$ —透镜;  $P$ —拍摄全息图的位置;  $s$ 、 $m$ —缩束波面的象散焦点; 在  $P'$  和  $Q'$  处也可得到缩束波面的象散焦点

根据这种轴向全息图能够再现光源象点的特性,我们研究了两种利用全息图提供的信息来确定补偿透镜状态的方法。这两种方法的基本思想是一致的,即利用倾斜放置的

薄透镜,产生一个人工的像散,使它与全息图记录的象散量相等,但方向相互正交。两者对光束的共同作用是使光束波面接近球面波。

方法 I: 对全息图进行全息再现时,将象散光束的全息图以某一角度斜放,使再现的子午焦线与弧矢焦线重合为一点,由这全息图的状态给出补偿透镜的焦距和倾斜角。

假设全息图所记录的象散是由某一透镜的倾斜引起的。其子午线  $l_m$ 、弧矢线  $l_s$ 、透镜焦距  $F$  和倾角  $\varphi$  应满足关系式:

$$\frac{1}{l_m} - \frac{1}{l_s} = \frac{f(\varphi)}{F}$$

$$f(\varphi) = \text{tg}^2 \varphi (\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} - \cos \varphi) / (n - 1) \quad (2)$$

式中  $n$  为透镜的折射率。当用一束理想的平行光去再现该全息图时将得到两条焦线,它们到全息图的距离分别为  $a$  和  $b$ 。根据 (1) 式和 (2) 式可以推算出全息图的焦距与上述薄透镜倾斜角的关系为:

$$\frac{1}{a(M^2 - M^{-2})} - \frac{1}{b(M^2 - M^{-2})} = \frac{f(\varphi)}{F}$$

若取:  $F = b(M^2 - M^{-2})$

则得到:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{f(\varphi)}{b} \quad (3)$$

点光源的全息图实际上是费涅尔透镜。改变象散光束全息图与光轴的倾角,可以使得两条焦线变短,而且较远的焦线逐渐接近较近的焦线的位置。在两者重合时,焦线已变为焦点。以该位置为起点回转该全息图为  $\theta$  角时,将恢复原象散量。全息图的两焦线与转角  $\theta$  的关系为:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{f(\theta)}{b} \quad (4)$$

该式与 (3) 式相比较可以得到:

$$\theta = \varphi \quad (5)$$

这说明全息图相当于一个焦距为所测光束的波面曲率半径的透镜。既然用它可以测量出产生象散光束的透镜的倾斜角度,也可

以用它预测出用同一焦距的透镜来补偿此象散量时所需要的倾斜角度。这个角实际上就是  $\theta$ 。该补偿透镜应放在相当于拍摄全息图的位置上, 而且它的倾斜方向应与产生此象散光束的透镜方向正交, 即与全息图所确定的方向一致。附录列出了补偿透镜的倾斜角度与透镜焦距及象散量的理论计算数据。而利用全息图确定补偿透镜焦距和倾角的实验与此数据一致。

方法 II: 根据全息再现现象的质量确定补偿透镜的状态

考虑到上述全息图记录的是缩束  $M$  倍后的被测波面, 为确定未缩束前补偿透镜应取的状态, 必须把全息图置于缩束光路中加以再现。我们选一块任意焦距的补偿透镜, 其焦距最好是接近原波面半径, 把它置于未经缩束的再现光路上, 而把记录到的有象散的全息图置于缩束的光路中, 如图 2 所示。

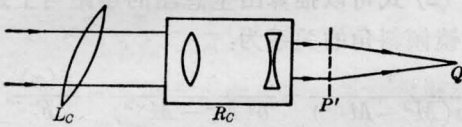
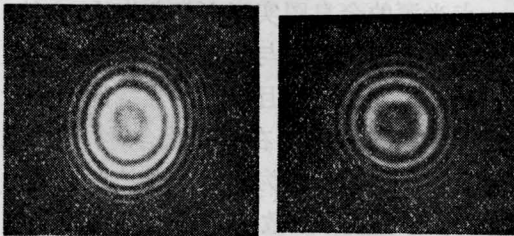
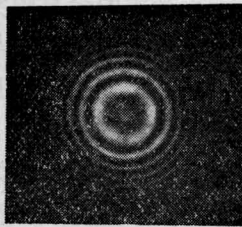


图 2 以全息图作为诊断工具来确定补偿透镜状态的光路图

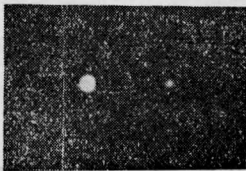
$L_c$ —补偿透镜;  $P'$ —全息图;  $R_c$ —缩束望远镜  $Q$ —全息再现象



(a) 象散光束全息图



(b) 补偿好的波面全息图



(c) 曲率半径相当理想的波面和补偿好的波面的焦点

图 3

倾斜补偿透镜, 同样可以看到全息图的再现现象被补偿为接近理想光束的焦点。实验同样表明这样确定的补偿透镜的状态与附录中的数据一致, 即它的焦距与倾角的约束关系完全取决于(2)式和(4)式。图 3 示出利用该方案补偿口径为 80 毫米, 曲率半径为 105 米的波面结果。

事实上, 对于其他的一般象差, 原则上可以采用图 4 所示的主动反射镜补偿系统。

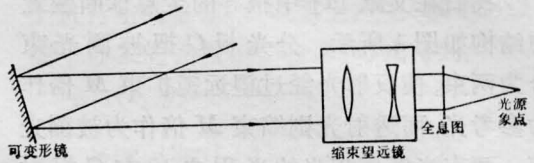


图 4 利用全息图作为诊断工具的主动补偿系统

## 二、激光束近场的全息记录与再现

为了探讨具有任意波象畸变的光束补偿的可能性, 我们以 He-Ne 激光为例, 研究了从轴向全息图再现光束近场的方法。因为在上述全息图复原时, 虚象、实象和参考光混淆在一起, 不可能自然分开。再现光辐照在全息图上的振幅透过率可表示为<sup>[4]</sup>:

$$T = T_0 - \beta' |F|^2 - \beta' a F - \beta' a F^* \quad (6)$$

式中  $F$  表示复振幅 ( $a$  为实数),  $F^*$  表示其共轭;  $\beta' = \tau\beta$ ,  $\tau$  为曝光时间,  $\beta$  为全息负片的振幅透过率  $T$  对曝光量  $E$  的关系曲线在偏置点的斜率。第一和第二项表示背景光强分布; 第三、第四项分别表示全息图衍射出的发散的波面和会聚的波面。它们分别形成被测波面光源的再现虚象和再现实象。为了提取出信号光束的波面, 我们必须在实象处加滤波措施, 以便把除(6)式中第四项之外的其它光滤掉。但是激光系统输出的光束, 总是对应一个有畸变的光源, 一般不仅有位相畸变而且还有振幅调制。为此, 必须根据光源

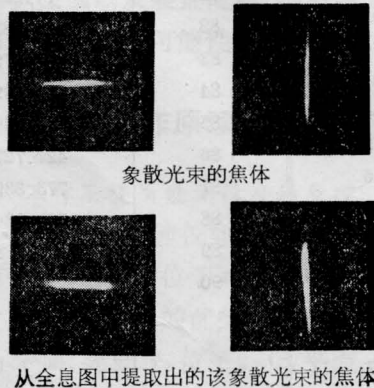
实象的形态,采用各种形式的光阑滤波。并且对全息图中内环透射光采取了一些措施,例如可以挑选中间为黑内环的正片或负片进行再现;或者采用软边化的小光屏(大小合适的超高斯光斑的底片)来阻挡投向象点的部分参考光。这些措施对再现现象的质量稍有影响。但在损失少量内环衍射光的情况下,在光源实象处获得了一个较暗的背景。这些掩模措施与一般傅氏平面上的滤波措施相配合,我们称之为“交叉滤波”。

为了考核上述方法提取近场的精度,选用理想光束或具有特定象差的光束较为方便。于是我们用 He-Ne 激光为例,先后选择了具有位相畸变的象散光束和具有振幅调制的规则光束拍摄全息图,并提取近场。

#### 1. 利用双狭缝滤波提取象散光束的近场

我们使用焦距为 60 米的薄透镜,使它与口径为 60 毫米的近理想光束成 24 度的倾角。从而产生一束纯象散光束。假如全息干涉仪中不放相机,则在 3 米左右的距离上得到缩束光的两条焦线  $s$  和  $m$ 。它们相距 0.96 米,象散量为  $2.1\lambda$ 。

把全息图置于折射率匹配盒中,用可见的 He-Ne 平行光垂直地照射它。在 3 米附近再现出两条焦线。在这两条焦线处分别放置两个正交的狭缝,调节其宽度,直到出射光没有干扰为止。



象散光束的焦体

从全息图中提取出的该象散光束的焦体

图 5

为了检验提取出的波面,在光路中放置一块 5 米透镜,对全息图再现焦线成 1:1 的象(图 5)。测得该象两条焦线的距离为 0.93 米,象散量为  $2.0\lambda$ ,与原光束象散量一致。

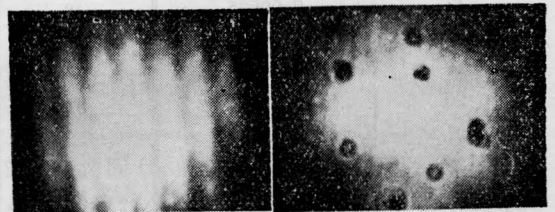
#### 2. 具有空间振幅调制的近场波面的提取

为了得到不同调制频率的激光束,我们在扩束为 60 米的波面曲率半径、60 毫米口径的 He-Ne 激光光路中,放置一块平行平板,使光束形成剪切干涉条纹。改变其剪切量,可得到不同空间频率的振幅调制。把这种具有振幅起伏的光束投射在全息干涉仪上。分别在望远镜缩束的光路里拍摄近场和在  $P$  处拍摄全息干涉图,以便从全息图中提取出近场之后可与其比较。

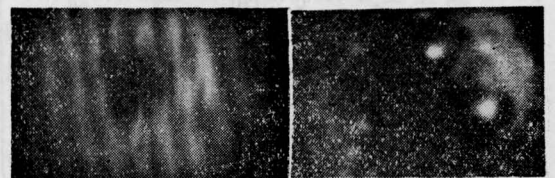
在用平行光再现光源的近场波面时,我们采用“交叉滤波”法。因为具有振幅调制的光束,其焦斑是分散开的。它的总体半径可能比理想光束的焦斑半径大十几倍。相应的滤波小孔也要扩大。若不采取“交叉滤波”方法,全息图内环透过的大量的参考光在再现象点处形成较亮的背景。在再现象平面上,最佳滤波孔径由下式决定<sup>[5]</sup>:

$$D = \frac{\nu \lambda r}{\pi} \quad (7)$$

式中  $D$  为圆孔孔径;  $\nu$  为光波的调制频率;  $\lambda$



具有振幅调制光束波面的近场强度分布



从全息图中提取出的近场强度分布

图 6

表1 具有振幅调制波面的滤波小孔孔径最佳值

条纹数	$x$	3	5	8	10	20
频率(厘米 <sup>-1</sup> )	$\nu$	2.8	4.6	7.4	9.2	18.5
最佳孔径(毫米)	$D$	0.37	0.62	0.99	1.24	2.48

为再现光的波长;  $r$  为全息图再现波面的曲率半径。表1列出了对应不同调制频率的滤波小孔的最佳尺寸。图6示出了振幅调制光束束束后的近场与全息再现光束的近场。

范滇元同志参加了部分工作, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 余文炎, 王桂英; 《光学学报》, 1982, 2, No. 4, 349.
- [2] J. E. Pearson; *Laser Focus*, 1981, 17, No. 9.
- [3] 范滇元, 余文炎; 《激光》, 1982, 9, No. 4, 212.
- [4] M. 弗朗松; “光学——像的形成和处理”。
- [5] 王桂英, 范滇元等; 《激光》, 1981, 8, No. 9, 57.

附录: 象散补偿透镜倾角  $\varphi$ 、焦距  $F$  (或全息图焦距) 与象散量的关系

$\varphi$ (度)	$f(\varphi)$	$\varphi$ (度)	$f(\varphi)$	$\varphi$ (度)	$f(\varphi)$
1	0.00030	32	0.43339	63	5.78606
2	0.00122	33	0.47123	64	6.39661
3	0.00275	34	0.51186	65	7.08993
4	0.00490	35	0.55553	66	7.88074
5	0.00767	36	0.60248	67	8.78712
6	0.01109	37	0.65299	68	9.83146
7	0.01515	38	0.70738	69	11.04170
8	0.01988	39	0.76596	70	12.45311
9	0.02529	40	0.82914	71	14.11067
10	0.03141	41	0.89733	72	16.07244
11	0.03825	42	0.97098	73	18.41435
12	0.04584	43	1.05064	74	21.23723
13	0.05422	44	1.13687	75	24.67716
14	0.06341	45	1.23033	76	28.92129
15	0.07345	46	1.33174	77	34.23250
16	0.08438	47	1.44194	78	40.98920
17	0.09625	48	1.56185	79	49.75161
18	0.10910	49	1.69252	80	61.37701
19	0.12298	50	1.83512	81	77.22982
20	0.13796	51	1.99102	82	99.58725
21	0.15409	52	2.16174	83	132.47945
22	0.17146	53	2.34904	84	183.58958
23	0.19012	54	2.55494	85	269.06611
24	0.21017	55	2.78175	86	427.72765
25	0.23170	56	3.03216	87	773.33926
26	0.25480	57	3.30926	88	1768.93431
27	0.27959	58	3.61668	89	7190.53888
28	0.30618	59	3.95864	90	
29	0.33471	60	4.34011		
30	0.36531	61	4.76697		
31	0.39815	62	5.24617		

折射率  $n=1.50624$