

文章编号: 1001-3806(2005)06-0617-03

微粒场全息术中记录介质的选择和处理研究

李作友, 刘振清, 叶 雁, 钟 杰, 郑贤旭, 罗振雄, 李泽仁

(中国工程物理研究院 流体物理研究所 冲击波物理与爆轰波物理实验室, 绵阳 621900)

摘要: 针对微粒场全息记录的特点, 讨论了记录介质的分辨率和记录介质大小的选择; 分析了全息记录介质的感光成像原理, 对激光能量的高斯分布和曝光量对微粒场记录的影响进行了研究, 给出了光束位置和曝光量对实验的影响结果, 并对选用的 3 种记录介质在给定的处理工艺下的特性曲线进行了对比测试; 选定的 SY-2 型记录介质, 记录微粒场时适宜的曝光量为 $180 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。

关键词: 信息光学; 记录介质; 高斯光束; 曝光量; 微粒场全息

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

Study on the effects of selection and process of the holography film for in-line particles holography

LI Zuoyou, LIU Zhenqing, YE Yan, ZHONG Jie, ZHENG Xianxu, LUO Zhenxiong, LI Zeren

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research Institute of Fluid Physics CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract In the view of the particles holography, the resolution and the size of holography film is discussed. The image principle of sensitization about holography film is analyzed. The effect of Gaussian beam distribution and the exposure amount on the recording and reconstruction is studied and the experimental results are obtained. The characteristic curves of three kinds of selected holography film are measured in the same process flow of bath film. The most suitable exposure of SY-2 film is $180 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ for in-line particles holography.

Key words information optics; recording media film; Gaussian beam; exposure; particles holography

引 言

采用同轴激光全息技术进行物理测试时具有非接触测量、抗电磁干扰、图像直观、信息量大、实验布置简单等优点, 因而受到人们的广泛关注。在同轴 Fraunhofer 激光全息技术中, 采用超短脉冲激光作为记录光源可以在瞬间将被测目标“冻结”, 从而达到测量材料冲击加载下物质喷射粒子的大小、形状、分布及速度等信息^[1,2]。在形成一张高质量的全息图过程中, 激光器的性能固然很重要^[3], 然而记录介质的选择和处理工艺的研究在整个激光全息测量技术中是一个关键环节, 它关系到物场能否真实、清晰地再现, 对实验结果起着决定性的作用。LLNL 在进行 Holog 次临界试验时曾因散射光使记录介质严重过曝而未能测量出粒子大小, 在 1998 年 6 月的试验中解决了过曝问题而得到了试验数据^[4]。

1 记录介质的选择

作者简介: 李作友 (1962-), 男, 副研究员, 现从事瞬态全息测试技术的研究。

Email: lizy901@sohu.com

收稿日期: 2004-09-02; 收到修改稿日期: 2004-11-30

1.1 记录介质的光谱灵敏度

光谱灵敏度是指记录介质在接受光的作用后, 其响应的灵敏程度。因为记录过程是一种光化学作用过程, 光子的能量与波长有关, 波长愈长光子的能量愈小, 通常每一种记录介质都有它的红限, 波长大于红限的光不能起光化学作用。每一种记录介质都有它的吸收带, 在吸收带内的波长才能起光化学作用。光谱灵敏度的大小直接表示了记录介质的需要的曝光量。实验中选用的全息记录介质的性能参数见表 1。

Table 1 The characteristic parameters of films in the experiment

type	emulsion thickness/mm	wavelength /nm	exposure sensitivity /($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)	resolving ability / (line pair/mm)
SY-1	7~8	400~560	30	>2000
SY-2	5	480~540	100	>3000
SY-3	12	440~550	25	>3000

1.2 记录介质的分辨力

对同轴全息, 全息实像的复振幅分布可表示为^[5]:

$$U_r(\mu', \nu') = k t_0^* (\mu', \nu') * h(\mu', \nu') \quad (1)$$

式中, $t_0^* (\mu', \nu')$ 是物体复振幅透射函数, $h(\mu', \nu')$ 为介质点扩展函数, k 包括全息实像复振幅分布的常因

子和常位相因子, (μ', ν') 为全息实像平面。对该式的两边作傅里叶变换得:

$$\tilde{U}_r(\alpha', \beta') = KT_0^*(\alpha', \beta')H(\alpha', \beta') \quad (2)$$

全息像的质量与分辨力受到介质传递函数 $H(\alpha', \beta')$ 的限制。

在一维情况下,用矩形函数代替传递函数,设物体是单一空间频率 α'_0 的正弦光栅, α'_c 为记录介质的空间截止频率, ϕ_r 是参考光与物光的夹角,则当 $\alpha'_0 + \sin\phi_r / \lambda > \alpha'_c$ 时,物体振幅分布不能准确再现。可见记录介质的有限传递函数对全息像的分辨力是很有影响的,如果物体包含的空间频率 α'_0 具有某个范围,则可知物体可被记录的分辨率的最高频率为: $\alpha'_{\alpha_{max}} = \alpha'_c - \sin\phi_r / \lambda$ 对大于 $\alpha'_{\alpha_{max}}$ 的物体空间频率,全息记录介质记录不到,因为记录介质的有限截止频率而丢失了 α'_c 中高于 $\alpha'_{\alpha_{max}}$ 的物体的空间频率信息,全息像只能反映具有 $\alpha'_{\alpha_{max}}$ 以下的空间频率的物体。

圆形粒子要求的记录介质分辨力为:

$$\nu'_{min} = \alpha' \beta' \frac{m+1}{\pi} \times \frac{1}{2d} \quad (3)$$

式中, α' 是考虑到采样定理要求而取的松弛因子, β' 表示记录介质对不同空间频率的条纹调制度的记录能力, d 为微粒的直径,在 $m+1/\pi \approx 1+m$ 的近似下通常取 $\alpha' \geq 2, \beta' \geq 2, m$ 为记录的衍射图形的次瓣的数目,简化为:

$$\nu'_{min} = 2 \times 2(m+1) \times \frac{1}{2d} = \frac{2(m+1)}{2} \quad (4)$$

如果取直径 $5\mu\text{m}$ 的粒子,则记录 3 个次瓣的最小的分辨力要求为 1600 line pair/mm。

1.3 记录介质的尺寸

当记录介质无限大时,对全息实像的复振幅求积分后可以看到:全息实像是理想的,它就是共轭物光波的再现,只不过是放大和位移了,而物体的任何细节都可分辨。

但是记录介质的尺寸是有限的,在满足远场条件 $z = \frac{Nd^2}{\lambda}$ 的情况下,一个直径为 d 的微粒(微粒物点很小时可视为理想物点)在像面上的衍射光斑的半径为:

$$R = (1+m)Nd \quad (5)$$

z 为远场距离, N 为远场数。对于微粒场区域 d_0 的空间范围内要求的记录介质的尺寸为:

$$D \geq 2(1+m)Nd + d_0 \quad (6)$$

针对直径为 $50\mu\text{m}$ 的粒子,取远场数为上限值 $60^{[6]}$,微粒场的空间范围为 1cm^3 ,则要求记录介质大于 34mm ,就可较为清晰地记录。

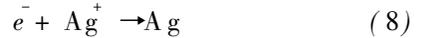
2 记录介质的处理

2.1 全息记录介质的感光成像原理

全息记录介质乳胶层吸收相应波长的光,然后将光能传递给邻近的卤化银颗粒,溴离子通过吸收光子而将能量供给自由电子,即:



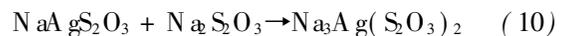
自由电子可以穿过晶格运动,在晶体不完整的某个位置上,自由电子被俘虏并吸引一个格内的银离子,即:



而在曝光过程中,这种循环本身要重复若干次,这样析出的金属银以微粒的形式出现散布在乳胶中,在一定范围内银粒子的数量随曝光量增加而增加,形成一种潜像^[7]。全息记录介质记录的潜像是通过显影过程变为可见的。曝光过程中析出的银粒子密度是很小的,人眼观察不到其对光的吸收作用。显影液将明胶浸湿并且经和卤化银晶体接触而发生作用,通过显影过程使含有上述析出银的地方成为还原中心,在它的催化作用下,大量的溴化银被还原成为金属银。该过程生成的 Ag 粒子又可以催化周围的溴化银还原成银,上述潜像的放大作用,在一定范围内随着显影时间的加长,感光区生成的银粒子的密度越来越大,最终形成人眼可见的影像。定影是将乳化剂层中未曝光部分的卤化银和曝光部分残留的卤化银清除掉。定影液中的卤化银溶剂(如硫代硫酸钠 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)溶解卤化银,反应生成不溶于水的硫代硫酸银钠,反应式为:



生成的 NaAgS_2O_3 与 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 连续反应,生成溶于水的硫代硫酸一银三钠,反应式为:



至此,未曝光部分的卤化银及曝光部分残留的未反应的卤化银均被除去,只留下曝光部分经显影以后生成的银粒子,产生可再现的物体影像。

2.2 高斯光束对全息照相的影响

在处理记录介质时不但要采用线性处理工艺^[8],还要考虑到激光是高斯光束,其光强(黑密度 D)分布如图 1 所示,因而研究高斯光束与平面波照射下的

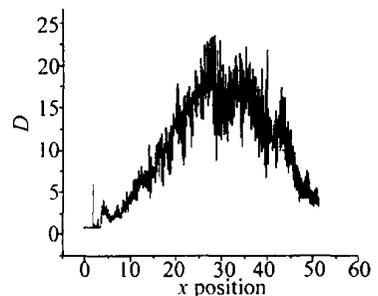


Fig 1 The scanning density of film

Fraunhofer衍射公式的差别,对用平面波近似高斯光束所进行的推导过程有很大的参考意义。在洗像的过程

中,由于只能照顾到高斯光束的中心部分的接近于平面波的分布。图 2 是考虑到高斯光束的影响后的条纹对比度 V 的变化的计算结果,表明在光强变化比较大的区域对比度较好。然而,由于光束束腰部分的黑密度比中心部分的要低,从而影响到条纹对比度的记录和粒子的再现。

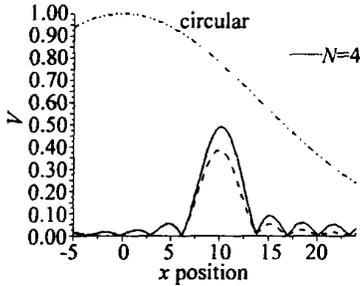


Fig 2 The fringes contrast at beam waist

在实验中观察到,距离中心不同距离处的粒子的再现平面上的灰度分布,如图 3 所示。以高斯光束的中心为 $y = 0$ 位置,在远离中心的区域,粒子的高频条纹的损失就越多,粒子的再现像的模糊程度就越大。因而对光束的要求就是中心可利用部分要尽量大,使照相的物场及散射光尽量处于中心区域,以减少高频的损失。

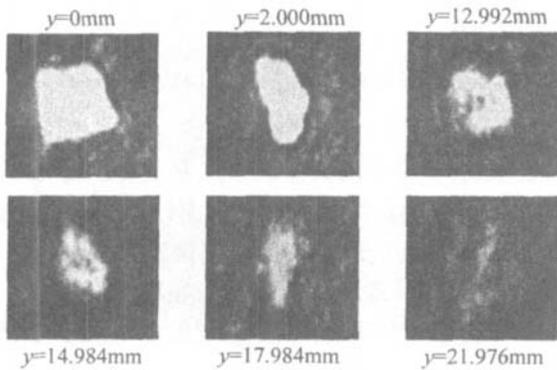


Fig 3 The reconstruction images at the different position of Gaussian beam

2.3 曝光量对再现像的影响

在全息记录介质的线性处理过程中影响因素较多,实验中发现不同的曝光量对粒子场的再现像影响较大,图 4 所示为不同曝光量、相同处理工艺下得到的

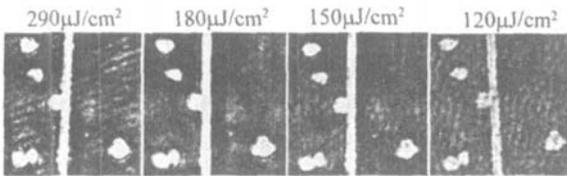


Fig 4 The reconstruction image of different exposure

粒子的再现像,可以看出在该种处理工艺下,曝光量为 $180 \mu J/cm^2$ 时再现像边缘的灰度对比度较好。

3 3种记录介质的线性范围测试结果

实验中购置了 SY-1 型、SY-2 型、SY-3 型全息记录

介质,采用相同的处理工艺对其进行了线性范围对比实验。实验结果见图 5~图 7,图中 H 为曝光量 ($\mu J/cm^2$)。

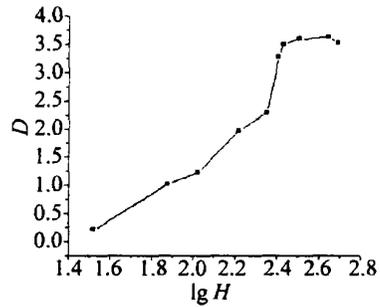


Fig 5 The lgH-D curve of SY-1 film

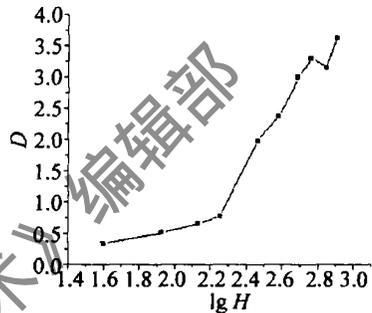


Fig 6 The lgH-D curve of SY-2 film

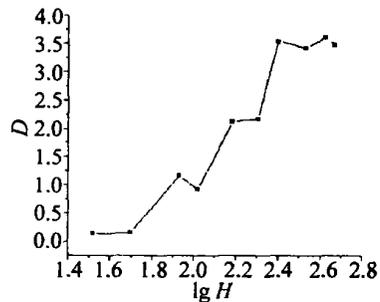


Fig 7 The lgH-D curve of SY-3 film

4 结论

在同轴微粒场全息记录中,要根据所选取激光器的输出波长确定记录介质的光谱范围,记录介质分辨力一般都能满足记录微粒场的要求;但是在选取记录介质的尺寸大小时就要考虑到所能记录的干涉条纹的高频信息,满足一定的远场数,从而便于微小粒子的信息提取。

对于记录介质的处理,在恒定的处理工艺条件下,实验表明,激光能量的高斯分布和记录介质的曝光量对粒子场的记录和再现的影响是比较大的,合理地选择通过微粒场的光束位置和适当的曝光量有利于微粒场高频信息的记录和再现。记录的粒子场应置于高斯光束的中心部位为宜,对于选定的记录介质适宜的曝光量为 $180 \mu J/cm^2$ 。

记录介质的 $lgH-D$ 曲线表明了记录介质的特性,
(下转第 638 页)

另外计算了 5 个脉冲。表 2 为各个脉冲的具体输出。

Table 2 Output every pulse parameters

	peak power/W	pulse energy/J	frequency/ kHz	pulse width/s
pulse 1	2.93774×10^4			2.77490×10^{-10}
pulse 2	2.93774×10^4	1.00338×10^{-5}	6.06877	2.77501×10^{-10}
pulse 3	2.93774×10^4	1.00437×10^{-5}	6.06877	2.76977×10^{-10}
pulse 4	2.93774×10^4	1.00368×10^{-5}	6.06877	2.77502×10^{-10}
pulse 5	2.93774×10^4	1.00404×10^{-5}	6.06877	2.77502×10^{-10}

从上表可以看出,从理论上讲,被动调 Q 微片激光器的输出是很稳定的。至于很多文献中所报道的输出不稳定,只能从实验条件的改进上加以研究解决。

从图 1 可以看到,仿真单脉冲输出和实验以及作者的预期基本一致。其中腔内光子数 n 正比于输出功率,正如实验中所观测到的,输出脉冲前沿较陡,后沿较缓。反转粒子数 N_g 在脉冲期间,迅速减少,降到最大值的 1/10 以下,与实验相符。饱和吸收体基态粒子数 N_a 在脉冲期间几乎耗尽。

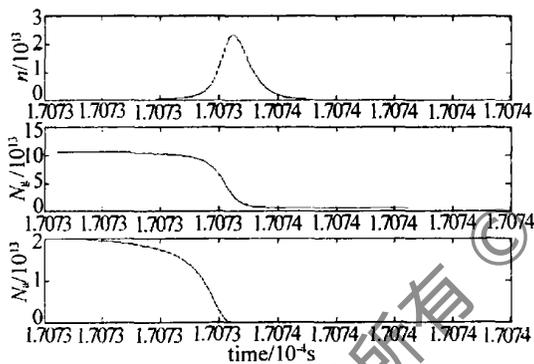


Fig 1 The single output pulse form

通过仿真得到当单程增益等于单程损耗时,输出

功率 $P = 7.16 \times 10^{-13} \text{ W}$, 非常小; 而可饱和吸收体浓度为 5.59×10^{24} , 与初始浓度相同, 即当单程增益等于单程损耗时可饱和吸收晶体吸收系数并未发生变化。从而证明了激光器开始起振以后吸收系数才显著减少, 而不是如有些资料所介绍的那样, 即先有“吸收系数显著减少”, 后有“单程增益等于单程损耗, 激光器开始起振”^[2]。

4 小 结

对 Siegnan 方程组进行了优化和改进, 得到的优化后的方程组可以很好地与实际实验结合起来。方程中加入的自发辐射项 $\frac{r_1 N_g}{\tau_g}$, 使激光器可以连续稳定的振荡, 而且可以取最简单的初值: $t = 0$ 时, $n = 0$, $N_g = 0$, $N_a = N_{a0}$, 并且通过仿真还可以连续计算几个脉冲。这样就克服了原 Siegnan 方程不能直接计算重频的缺点。在方程组第 2 个方程中加入反映抽运速率变化的一项: $-\frac{R_p N_g}{W_{p0}}$ 以后, 仿真输出结果与实验结果更接近, 尤其是重频, 这说明对方程的改进是可行的。

参 考 文 献

- [1] SEGMAN A E. Laser [M]. CA: University Science, Mill Valley 1986 1024~1026
- [2] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 *et al* 激光原理 [M]. 4 版, 北京: 国防工业出版社, 2000 225~225
- [3] 杨成伟, 陈千颂, 熊柯 *et al* Cr³⁺:YAG 被动调 Q 激光器进展 [J]. 激光与红外, 2003, 33(1): 21~24
- [4] 克希奈尔 W. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 1983 59
- [5] 巩马理, 翟刚, 时顺森 *et al* Cr³⁺:YAG 可饱和吸收特性测量 [J]. 光学学报, 1998, 18(1): 124~127.
- [6] ZAYHOWSKI J J, DILL C III. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers [J]. Opt Lett 1994, 19(18): 1427~1429

(上接第 619 页)

稳定的线性范围和适宜伽玛值 (特性曲线的斜率) 对记录介质尤其重要。SY-3 型全息记录介质在实验中的性能极不稳定, 而 SY-1 型、SY-2 型记录介质的特性相对稳定, 从 SY-2 型记录介质的特性曲线可见该介质的伽玛值较大, 有利于微粒场的高频信息和边缘的界定。

参 考 文 献

- [1] SORENSON D S, M INICH R W, ROMERO J L *et al* Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals [J]. JA P, 2002 92(10): 5830~5836.
- [2] 李作友, 王 锋, 李泽仁 *et al* 微射流粒子场的同轴 Fraunhofer 全

息测试 [J]. 激光技术, 2004, 28(1): 44~57

- [3] 彭愿洁, 吕百达. 激光束的分类 [J]. 激光技术, 2003, 27(5): 463~465
- [4] 余 泳. 美国次临界实验状况 [J]. 核武器与高技术, 2000(4): 28~38
- [5] 刘子超, 赵惠. 液雾及颗粒的激光测量原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1988 362~369
- [6] 李作友, 王 锋, 李泽仁 *et al* 微粒场全息术的最佳远场条件研究 [J]. 激光杂志, 2002 23(4): 41~42
- [7] 于美文. 光学全息及其应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996 237~239
- [8] 李作友, 叶 雁, 钟 杰 *et al* BB-520 型全息介质线性处理技术和工艺研究 [J]. 激光杂志, 2004, 25(1): 60~62