

文章编号: 1001—4322(2001)02—0191—04

液晶散射法产生部分相干光实验*

谢永杰, 赵学庆, 王立君, 刘晶儒, 袁孝

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 对无阶梯诱导空间非相干技术中前级光源太弱的问题进行了分析, 开展了前级部分相干源的研究工作。利用向列液晶的电光特性, 选用两种液晶盒作为散射体, 完成了液晶散射法产生部分相干源的原理性实验, 得出液晶散射光能量透过率、均匀性及相干性与外加电场的关系。实验表明通过改变外加电场, 可以提高液晶散射光的强度和均匀性, 同时降低其空间相干性。

关键词: 惯性约束聚变; 辐照均匀性; 无阶梯诱导空间非相干; 部分相干光; 向列液晶

中图分类号: O 753 **文献标识码:** A

激光驱动惯性约束聚变(ICF)是实现受控热核聚变、完成实验室核爆模拟的重要技术手段之一。为了可靠地实现对聚变靶丸的压缩和点火, ICF 中对入射到靶面的光束, 要求是一种平顶、陡边、无旁瓣的且具有数十至数百微米口径的平滑光束。然而, 驱动器的末级输出口径通常是数百毫米, 并且实际运行的激光驱动器工作在大能流密度下, 受诸如激活介质不均匀、增益饱和等效应的影响, 输出光束将发生畸变, 造成激光远场分布的不均匀。这就要求必须按照 ICF 物理实验的要求, 对打靶光束进行平滑处理, 改善其不均匀性。为此, 近年来针对不同的激光驱动器, 不少国家的实验室做了许多工作和努力, 发展了多种技术手段^[1~10]。其中, 对于宽带气体准分子激光系统, 无阶梯诱导空间非相干(Echelon-Free Induced Spatial Incoherence—EFISI)技术是目前比较成功的一个方案^[10]。美国海军实验室在其世界最大的激光驱动器NIKE系统上正是采用的这种方案。

EFISI技术是一种投影成像技术, 它利用非相干光将前级的均匀光强分布通过激光系统传输放大并聚焦成像于靶面上。此技术的关键是利用非相干光束将物孔处的均匀光强分布投影成像于靶上, 其前提必须保证采用适当的方法在物孔处得到强度分布均匀、相干性差的光源。为得到这种光源, 美国海军实验室采用散射板法, 即利用Teflon板对入射激光进行散射, 之后再用小孔取一部分散射光的方法。由于Teflon板对入射光束 4π 方向散射, 因此这样获得的前级光源能量很小, 仅为nJ量级, 需经多级放大才能达到打靶要求。根据我们的实际情况, 不可能采用那么多级的激光器放大系统。因此本课题的目的在于探索均匀性好、转换效率较高的部分相干光源以作为实用化前端。

1 方案设计

针对这种前级光源, 我们进行了较深入的研究。结果发现, 从理论上可构造一种光源, 其空间相干性差、方向性好, 并且与特定激光具有相同的远场分布。具体实现上, 可以利用散射体、可变密度吸收片等对一特定激光束进行幅度和相干性变换来构造这种光源。下面具体介绍利用液晶作为散射体进行前级光源研究的实验工作。

1.1 基本原理

向列液晶的分子阵列是排列有序的^[11,12], 它的介电常数具有各向异性, 在外加电场的作用下, 液晶分子可产生极化, 分子取向努力垂直于外电场方向, 当外加电场大到一定程度后, 产生不规则形变, 分子沿圆周运动。由于外电场诱发液晶中分子产生了运动和取向波动, 造成对入射光束的动态散射, 破坏了入射光束的相干性。通过改变外加电压, 可控制液晶内部分子相干区尺寸的大小, 从而达到控制入射激

* 收稿日期: 2001-01-12; 修订日期: 2001-03-06

基金项目: 国家863惯性约束聚变领域资助课题(863-416-6-4)

作者简介: 谢永杰(1973-), 男, 硕士, 助研, 现从事高功率激光技术的研究工作; csun@nint.ac.cn, 西安69-13信箱。

光相干性的目的。当散射中心的相干区尺寸远小于整个入射光束的尺寸时, 散射光可被视为一个扩展的非相干源。

1.2 原件设计

实验中设计并加工了两类液晶盒, 由于盒中注入液晶材料不同, 造成二者特性不同, 详见表 1。其中, 开关比可以通过制备条件的不同(包括选择合适的液晶畴尺寸, 增大液晶层厚度及选用折射率各向异性值较大的液晶材料等。)控制在 1 到 200 之间。液晶盒 A 常态为透明(OFF 态), 散射能力随外加电压升高增强; 液晶盒 B 常态为散射(ON 态), 散射能力随外加电压升高变弱。两类液晶盒内的微粒尺寸为 0.5~2.0 μm, 液晶盒厚 2.2 cm, 液晶层厚 10 μm。透明态时光的透过率为 70% 左右, 散射态时透射光强在很大程度上依赖于收集角的大小。

表 1 液晶盒参数

Table 1 The Parameter of liquid crystal

liquid crystal	working voltage	working temperature	without voltage	with voltage	transmittivity
A	0~25V	0~50	OFF	ON	5:1
B	0~50V	0~50	ON	OFF	100:1

2 实验及参数测量处理

2.1 实验工作

用氦氖光源进行了液晶散射法的原理性实验。实验系统的光学原理如图 1 所示。散射光束的特性决定于入射光斑大小、散射角和外加电压。我们重点做了外加电压对液晶散射能力的影响和出射光束随散射角的变化实验。实验中测量得到了大量的数据, 下面对这些数据进行分析处理。

2.2 数据测量处理

建立了包括反转剪切干涉仪和光束质量分析仪在内的光学诊断系统。反转剪切干涉仪用于产生表征光源空间相干性的干涉条纹, 光束质量分析仪配有高灵敏度的 CCD 探头和 12bit 的数采系统, 可以进行光强度分布的测量。

本实验研究的对象可以用三个参数加以评价: 光源能量转换率、光强分布均匀性和光束空间相干性。其中光强分布均匀性用强度均方差衡量; 光束空间相干性利用反转剪切干涉仪产生的干涉条纹强度分布计算得到^[13, 14]。

反转剪切干涉仪对液晶散射光所产生干涉条纹的强度分布为

$$g(x) = a(x) + c | \mathcal{Y}(x) | \cos[2\pi f_0 x + \mathcal{Q}(x)] \tag{1}$$

其中, $a(x) = I_1 + I_2$, $c = 2(I_1 I_2)^{1/2}$, x 为剪切距离, I_1 、 I_2 分别为两路光束的光强; $|\mathcal{Y}(x)|$ 为相干度的模; f_0 是条纹的空间调制频率, 由两光束相交的倾角决定。对(1)式进行傅利叶变换, 得到空间干涉条纹的频谱分布为

$$G(f) = A(f) + B(f - f_0) + B^*(f + f_0) \tag{2}$$

其中:

$$A(f) = F(a(x)), \quad B(f) = F(c\mathcal{Y}(x)) \tag{3}$$

F 表示傅利叶变换。通过实验控制, 选取适当的空间调制频率 f_0 , 使 $A(x)$ 和 $\mathcal{Y}(x)$ 对应的谱成分 $A(f)$ 、 $B(f - f_0)$ 在频谱空间分开。选择 $B(f)$ 部分对其进行傅利叶逆变换, 再结合测得的两束光强 I_1 、 I_2 , 就可以计算出相干度的模。另外, 此方法还可以消除激光不均匀引入的影响。

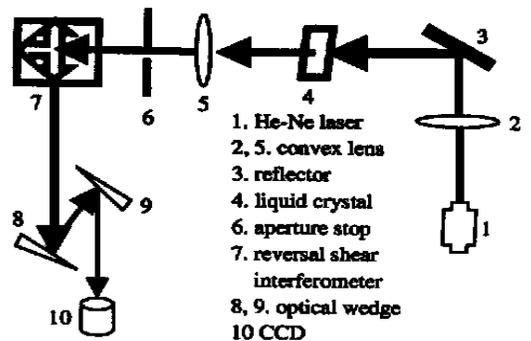


Fig 1 The layout of experimental system

图 1 实验布局图

实验中 CCD 所测量的干涉条纹强度分布, 可以利用数据采集卡进行数字化处理, 我们具体编制了频谱变换程序, 对数字化的强度分布进行频谱变换, 从而计算光束的空间相干性。

3 结果及分析

通过计算处理, 得出两类液晶盒散射光的特性曲线。其中, 液晶盒 A 散射光特性随外加电压和入射角度的变化不大, 这是由于它散射能力弱造成的。下面重点分析液晶盒 B 散射光性质。

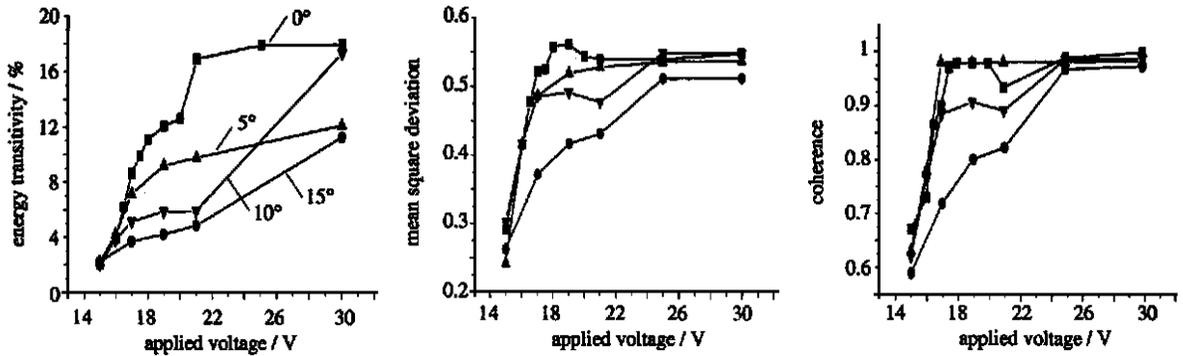


Fig 2 The energy transmittivity, coherence and mean square deviation of intensities under different applied voltage and input angles

图 2 散射光能量转换率、光强均匀性和光束相干性随外加电压和散射角变化的关系曲线

图 2 为 B 液晶盒散射光能量转换率、光强均匀性和光束相干性随外加电压和散射角变化的关系曲线。综合这些曲线可看出, 随驱动电压降低、入射角度增大, 液晶散射能力加强, 此时散射光能量降低, 均匀性提高且相干性下降。因此为提高散射光均匀性是要以牺牲能量为代价的, 下面分析一下实验结果。

(1)、本实验条件下, 对液晶盒 B, 取 1mm 收集孔, 在开关比为 50 : 1 时, 均匀性由均方差 0.56 提高到 0.2, 且能量保证大于前端总能量的 2.1% ;

(2)、由于衰减光楔无法对光进行连续衰减调节, 同时 CCD 的探测存在一定范围, 造成外加电压低于 15V 时, 散射光较弱无法测量。因此对电压取 15~ 30V 范围内 (对应最大开关比约 5 : 1) 进行了实验。不过从上面规律曲线可看出: 随电压的进一步减小, 均匀性提高和相干性变差的幅度变大, 而能量损失的幅度相对较小, 因此在更强的散射下, 可以得到性能更好的光源;

(3)、实验中入射光束 1mm, 收集孔也为 1mm, 增大入射光斑, 保持收集孔不变, 可进一步提高散射光均匀性, 降低相干性, 同时略微增加转换效率;

(4)、实验中由于干涉仪中两束光强 I_1 、 I_2 不易测量, 因此计算中对 $B(f)$ 傅利叶逆变换后, 未除以光强 I_1 、 I_2 。故此相干性曲线是规律曲线, 而不是相干带真实宽度;

(5)、由于实验中光源的波动, 造成规律曲线中数值点的波动, 应被剔除。

本实验得到的关系曲线仅表明散射光性质随外加条件不同而变化的一种规律。具体应用时, 可根据激光系统的要求, 实际确定散射光源能量转换率、光束相干性和均匀性的取值。

4 结论

实验证明液晶是一种较理想的散射体。液晶散射是基于分子阵列的散射, 散射微粒小, 具有散射均匀、光能量透过率大、易于控制等优点, 因此液晶散射法是一种制备部分相干源较理想的方法。对比液晶盒 A 和 B 实验结果, 应选用散射能力随外加电压变化显著的一类液晶盒; 根据实验情况, 选取开关比大于 50 : 1 的液晶盒。散射光均匀性和相干性随入射角度变化的幅度不如电压引起的显著, 同时角度增加能量损失反而增大, 因此入射角不易大于 10° 。

在原理性实验中, 光源为 He-Ne 激光, 得出的参数可能与其它波长的激光有所不同, 主要表现在对液晶散射微粒的尺寸大小要求不同, 另外对于不同波长激光还需考虑液晶分子对它的吸收问题。通过本次实验摸索了一定的实验条件, 并建立了一套数据测量和处理方法, 它们可用于下一步实验工作中。

参考文献:

- [1] 邓锡铭, 梁向春, 陈泽尊, 等. 用透镜阵列实现大焦斑面的均匀辐照[J]. 中国激光, 1984, **12**(5): 257-260
[Deng X M, Liang X C, Chen Z Z, et al. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Chinese Journal of Lasers*, 1984, **12**(5): 257-260](in Chinese)
- [2] 丘悦, 邓锡铭. 阵列均匀照明系统的优化设计[J]. 强激光与粒子束, 1997, **9**(4): 507-510
[Qiu Y, Deng X M. Optimization design of the optical array uniform illumination systems. *High power laser and particle beams*, 1997, **9**(4): 507-510](in Chinese)
- [3] 刘增水, 王润文, 路敦武, 等. 无规位相板在实现靶面均匀辐照方面的性能分析[J]. 光学学报, 1998, **18**(7): 943-949
[Liu Z S, Wang R W, Lu D W, et al. Analysis on performances of random phase plate in realization of uniform irradiation on target plane. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(7): 943-949](in Chinese)
- [4] Matsushima I, Owadano Y, Matsumoto Y, et al. Beam smoothing by broadband random-phase irradiation[J]. *Opt Commun*, 1991, **84**(3): 175-178
- [5] Stevenson R M, Norman M J, Bett T H, et al. Binary-phase zone plate arrays for the generation of uniform focal profiles[J]. *Optics letters*, 1994, **19**(6): 363-365
- [6] Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H, et al. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate using a polarization control plate[J]. *Opt Commun*, 1992, **91**(1): 9-12
- [7] 谭峭峰, 严瑛白, 金国藩, 等. 实现 ICF 束匀滑的二元光学器件设计与制作[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(4): 445-449
[Tan Q F, Yan Y B, Jin G F, et al. Study and fabrication of binary optical element for ICF target uniform illumination. *High power laser and particle beams*, 1999, **11**(4): 445-449](in Chinese)
- [8] Lehmburg R H, Obenschain S P. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets[J]. *Opt Commun*, 1983, **46**(1): 27-36
- [9] Schmitt A J, Gardner J H. Illumination uniformity of laser fusion pellets using induced spatial incoherence[J]. *J Appl Phys*, 1986, **60**(1): 6-13
- [10] Lehmburg R H, Goldhar J. Use of incoherence to produce smooth and controllable irradiation profiles with KrF fusion lasers[J]. *Fusion Technology*, 1987, **11**(5): 532-541
- [11] Carter W H, Bertolotti M. An analysis of the far-field coherence and radiant intensity of light scattered from liquid crystals[J]. *J Opt Soc Am*, 1978, **68**(3): 329-333
- [12] 任洪文, 黄锡珉, 王宗凯, 等. 聚合物分散液晶光栅的衍射特性的研究[J]. 光学学报, 1998, **18**(5): 631-634
[Ren H W, Huang X M, Wang Z K, et al. Diffraction properties of a polymer dispersed liquid crystal grating. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(5): 631-634](in Chinese)
- [13] Bertolotti M, Carnevale M, Muzii L, et al. Reversing-front interferometer for phase-correlation measurements in the turbulent atmosphere[J]. *Appl Opt*, 1970, **9**(2): 510-514
- [14] Omatsu T, Kuroda K, Takse T. Time-resolved measurement of spatial coherence of a copper vapor laser beam using a reversal shear interferometer[J]. *Opt Commun*, 1992, **87**: 278-286

The experimental study of partially coherence light source produced by liquid crystal

XIE Yong-jie, ZHAO Xue-qing, WANG Lir-jun, LIU Jing-ru, YUAN Xiaojiao

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China)

Abstract The characteristics of front-end light, a key problem in EFISI (Echelon-Free Induced Spatial Incoherence), is analyzed in this paper, and a new partial coherence light source is researched here. According to electrooptical properties of nematic liquid crystal, two types of liquid crystal are used as scattering materials to carry out the experimental study of the partial coherence light source designed for EFISI. The relationships between applied voltage and energy transmissivity, uniformity, coherence of scattering light are obtained. Results show that both intensities and uniformity of scattering light can be improved, at the same time coherence can be decreased through changing the applied electrical field. So the partial coherence light source can be approached.

Key words: ICF; illumination uniformity; echelon-free induced space incoherence; partial coherent light; nematic liquid crystal