



·激光前沿交叉科学·

## 压缩感知技术在激光惯性约束聚变研究中的应用

王 峰<sup>1</sup>, 理玉龙<sup>1</sup>, 关赞洋<sup>1</sup>, 张 兴<sup>1</sup>, 李 晋<sup>1</sup>, 黄运保<sup>2</sup>, 甘华权<sup>2</sup>, 车兴森<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 广东工业大学 精密电子制造技术与装备国家重点实验室, 广州 510006)

**摘 要:** 激光驱动惯性约束聚变(ICF)研究是当前国际前沿科学中一个具有挑战性的研究领域,它以高能激光作为驱动源,在极短的时间内将大量能量注入靶丸中使聚变材料达到高温高密度的状态从而在靶丸中心形成热斑并引燃整个燃料层,最终实现可控核聚变。由于内爆热斑直径为 50~100  $\mu\text{m}$ ,其持续时间为 100~200 ps,离子温度达到 5 keV,压力可达  $4.0 \times 10^{16}$  Pa。因此,发展极端瞬态条件下的诊断技术具有重要意义。介绍了两种基于压缩感知技术的诊断方法,第一种是基于数字微镜阵列(DMD)进行编码的反射式可见光压缩感知技术,这种技术将现有的一维任意反射面速度干涉仪(VISAR)与压缩超快成像(CUP)系统相结合,有望实现一种全新的具有高时间分辨的二维 VISAR 诊断技术,将诊断维度从一维扩展至二维,同时它克服了现有的二维 VISAR 单幅成像的缺点,有望实现对内爆压缩过程流体力学不稳定性演化过程的连续诊断。由于基于 DMD 进行编码的反射式可见光压缩感知技术只能用于可见光波段,无法用于紫外与 X 光波段,为此还发展了一种透射式压缩感知技术。这种透射式压缩感知技术采用一种新颖的透射式元件实现对待测信号的编码,可以实现对紫外和 X 光波段信号的二维超快探测,有望实现对内爆热斑超快时空演化过程进行精密诊断。此外,针对单通道 CUP 技术的高时间分辨的优势和低空间分辨的不足,还提出了多通道编码、分别扫描、解码、再合成的全新的高时空分辨诊断系统基本思路,有望实现高时间分辨的同时,实现高空间分辨的二维新型诊断技术。

**关键词:** 惯性约束聚变; 压缩感知技术; 诊断; CUP-VISAR; 透射编码

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210250

## Application of compressed sensing technology in laser inertial confinement fusion

Wang Feng<sup>1</sup>, Li Yulong<sup>1</sup>, Guan Zanyang<sup>1</sup>, Zhang Xing<sup>1</sup>, Li Jin<sup>1</sup>, Huang Yunbao<sup>2</sup>, Gan Huaquan<sup>2</sup>, Che Xingsen<sup>1</sup>

(1. Laser Fusion Research Center, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China;

2. State Key Laboratory of Precision Electronics Manufacturing Technology and Equipment, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Laser driven inertial confinement fusion is a challenging research field in the current international frontier science, which uses high-energy laser as the driving source. A large amount of energy is injected into the target pellet to make the fusion material reach the state of high temperature and high density in a very short time, thus forming a hot spot in the center of the target pellet and igniting the whole fuel layer, and finally achieving controlled nuclear fusion. As the diameter of the implosion hot spot is about 50–100  $\mu\text{m}$ , and its duration is 100–200 ps, the ion temperature reaches 5 keV, and the pressure can reach  $4.0 \times 10^{16}$  Pa. Therefore, it is of great significance to develop diagnostic techniques under extreme transient conditions. In this paper we introduce two kinds of diagnosis method based on compressed sensing. The first one combines the one-dimensional line Velocity interferometer system for any reflectors (VISAR) with the Compressed Ultrafast Photography (CPU) system, which is expected to achieve a new 2D-VISAR diagnostic technique with high time resolution. At the same time, it overcomes the shortcomings of the existing two-dimensional VISAR that can only capture single image and is expected to realize continuous diagnosis of the evolution of hydrodynamic instability. Because the existing CUP technology encoded by digital micromirror device can only be used in the visible light band, and cannot be used in the ultraviolet and X-ray band, a transmission compressed sensing technology is also developed. The transmission compressed sensing technology uses a novel

\* 收稿日期:2021-06-26; 修订日期:2021-12-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0403300); 国家自然科学基金项目(11805184, 11805178, 11805185); 中国工程物理研究院院长基金项目(YZJLX2019011); 科学挑战专题(TZ2016001); 中物院激光聚变研究中心青年人才基金项目(RCFPD4-2020-1)

联系方式:王 峰, lfrc\_wangfeng@163.com。

transmission element to encode the measured signal, which can realize the two-dimensional ultrafast detection of ultraviolet and X-ray signals, and is expected to realize the precise diagnosis of the ultra-fast space-time evolution process of the hot spots in the explosion. In addition, in view of the advantages of single-channel CUP technology with high time resolution and the shortcomings of low spatial resolution, a new high spatial resolution diagnosis system with multi-channel coding, separate scanning, decoding and re-synthesis is proposed, which is expected to achieve high time resolution and high spatial resolution of the two-dimensional new diagnostic technology.

**Key words:** inertial confinement fusion, compressed sensing technique, diagnostic, CUP-VISAR, transmission coding

激光驱动惯性约束聚变研究是当前国际前沿科学中一个具有挑战性的研究领域,然而目前国际上的激光 ICF 研究陷入了困境,用 1.8 MJ 的激光能量只观察到了  $10^{16}$  的中子产额,仅仅是观察到了粒子自加热,这距离实现最终的可控聚变需要的  $10^{18}$  的中子产额还有很大的距离<sup>[1-2]</sup>。目前的分析认为,内爆压缩的不对称性是导致聚变失败的重要原因。在内爆压缩的前期,由于腔型结构和注入激光强度分布以及激光等离子体相互作用,使得靶丸处于天然的驱动不对称性环境。这个 X 射线驱动的不对称性是造成后期压缩不对称性的源头之一。在内爆压缩后期,由于靶丸壳层自身加工、材料分布不均等带来的流体力学不稳定性的种子,在内爆收缩比超过 20~25 以后,都会很剧烈的增长起来,最终造成壳层破裂,烧蚀层的材料喷入热斑区,造成辐射漏失增加,热斑温度降低到无法达到核反应所需的温度,从而使聚变失败<sup>[3]</sup>。

为了解决目前激光惯性约束聚变遇到的难题,主要采用两种方法。第一种是进一步完善物理模型,将各种低阶和高阶的过程都考虑进去,从而将模拟程序从一维、二维上升到全三维,然后将各阶段的程序与各阶段的实验数据比较进而修正,而后得到较高置信度的三维程序,从而“预测”各种影响以及三维条件下的“点火悬崖”,从而在实际实验中改善或者规避各类问题。另一种方法是发展极端瞬态条件下的诊断技术,用更加先进的诊断技术去研究更极端条件下的压力、温度、时间、空间尺度以及其他问题,为更精细的研究物理问题提供强有力的技术支持,进而推动物理认识的进步。同时,所有的物理模型都需要精确的实验数据进行校验完善,因此发展高精度的诊断技术就更为重要。根据文献 [4],内爆后期热斑直径为 50~100  $\mu\text{m}$ ,持续时间为 100~200 ps,离子温度达到 5 keV,压力可达  $4.0 \times 10^{16}$  Pa。因此,要实现对内爆后期热斑进行精确的诊断,诊断系统的空间分辨应达到 5  $\mu\text{m}$ ,时间分辨应达到 10 ps 以内,幅数达到 30 幅以上。

目前对 ICF 过程中内爆对称性的诊断主要分为内爆前期和内爆后期两个阶段的诊断技术。前期的主要手段是利用 Bi 球再发射等方式完成驱动初始阶段 2 ns 左右的驱动对称性的研究<sup>[5]</sup>,该技术的记录设备是分幅相机,需要结合 Bi 球靶来研究。该技术应用比较广泛。对内爆后期的诊断主要有以下几种:第一种是内爆流线诊断<sup>[6-7]</sup>,它主要使用弯晶配合条纹相机的方式,用条纹相机的狭缝去卡一个内爆靶丸的弦,也就是用狭缝去切内爆球在条纹相机狭缝上的投影,通过时间扫描的过程把靶丸压缩的时间过程高时间分辨地记录下来,但是该技术只有一维空间分辨功能,不能获得二维空间分布图像。第二种是利用 KB 显微镜搭配分幅相机进行记录,KB 显微镜空间分辨可以达到 5  $\mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>,分幅相机的成像幅数最多可以达到 20 幅,但是其时间分辨只能达到 70 ps,因此无法满足要求。在 2012 年至 2015 年期间,美国提出并研发了一种脉冲展宽型分幅相机(DIXI)<sup>[9-12]</sup>。它可以将时间分辨提高至 10 ps,但是由于其成像信噪比低、系统体积庞大、边缘图像空间分辨差等缺点,该技术未能继续发展。为了解决 DIXI 的缺点,国际上又研发了一种将脉冲展宽和 hCMOS 结合的单视线超快分幅技术(SLOS)<sup>[13-14]</sup>,这种技术采用的 hCMOS 相机自身具有 4 分幅功能,4 幅图来自同一视场,单幅图像的时间分辨约为 1~2 ns,配合漂移管技术后时间分辨可以达到 20 ps 左右,经过对目标信号的进一步放大,时间分辨应可以达到 10 ps。优化磁场强度后,空间分辨达到了 37  $\mu\text{m}$ 。该技术可以实现对等离子体的近靶点探测。这种技术图像幅数目前最多也只能做到 4 幅,发展曝光时间更短、幅数更多的 hCMOS 相机技术难度很大,投入的经济成本也将十分巨大。因此,目前缺乏有效的高时空分辨诊断技术来对内爆后期的演化过程进行精确有效的诊断,寻求与发展新型高时空分辨二维内爆热斑诊断技术非常迫切。

近年来发展起来的压缩感知(CS)<sup>[15]</sup>是一种全新的信息获取与处理的技术,该理论指出对于可压缩信号,可以在低于奈奎斯特采样率的条件下对信号进行采样,同时实现了对信号的压缩过程,利用合适的还原算法可以将原始信号从压缩数据中重构出来,实现信号的压缩还原。目前该技术已经在多个领域有了广泛的应用。其中,将压缩感知与超快成像结合实现的单通道超快压缩成像技术(CUP)<sup>[16]</sup>可以实现对二维图像的超快成像,该技术的最大

优势是可以通过单次成像获取动态场景的三位信息  $(x, y, t)$ ，并且它的时间分辨由条纹相机的扫描速度决定，可达到 2 ps，成像幅数可达到  $10^{11}$  幅/s，并且具有  $100 \mu\text{m}$  的空间分辨。前期的 CUP 主要针对可见光波段记录，目前该技术还在不断发展。文献 [17] 已经报道了将该技术推向紫外光 UV 波段的数据，显示了该技术在更短波长波段具有很好的可拓展性。目前单通道 CUP 技术最主要的问题是空间分辨不够。由于其天然的取样编码、解码方式，在实现高时间分辨的同时，很难兼顾高空间分辨。近年来，基于计算成像思想的超分辨技术已经在各个领域得到很好的应用。其基本思想是对同一物体进行多幅图像的欠采样，获得多幅低分辨率的图像。而后对多幅低分辨率图像结合先验知识，在完成图像配准校正后，用特定的时域或频域算法，去合成一幅高分辨的图像<sup>[18-19]</sup>。这为我们提高基于单通道 CUP 技术的高分辨合成思想提供了新的研究思路。利用 CUP 技术，我们发展了两种新型诊断技术：可见光压缩感知技术和透射式压缩感知技术，有望实现对内爆过程高时空分辨的二维连续诊断。

## 1 可见光压缩感知技术

### 1.1 CUP 系统原理

如图 1 为 CUP 系统的光路示意图，相比于文献 [16] 中的直线型光路，我们采用的“V 型”光路在减少信号损失的同时，能够避免同轴光路中剩余反射形成的“鬼影”干扰，进而提高总体成像质量。图中 IP1 为前序诊断系统的像面位置，通过第一组 4f 系统将待测二维图像成像到数字微镜阵列 (DMD) 上，结合生成的编码图像，在 DMD 上对待测图像进行编码，然后通过第二组 4f 光路将编码后的图像成像在条纹相机狭缝位置。由于需要记录物点的二维信息，条纹相机狭缝为完全打开的状态 ( $\sim 5 \text{ mm}$ )，条纹相机将不同时刻的二维图像沿时间方向进行扫描，并由 CCD 记录下来动态，完成编码图像的移位压缩和记录。最后利用解码算法，结合编码矩阵从测得的压缩图像中还原重构出时变的各幅二维图像。

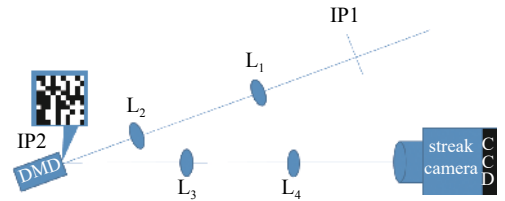


Fig. 1 Schematic diagram of CUP system

图 1 CUP 系统光路示意图

整个系统的运行分为两部分：图像获取和图像重构。我们把 IP1 处的动态图像记为  $I(x, y, t)$ ，经过 DMD 的随机编码操作  $C$  和条纹相机时间方向的剪切操作  $S$  之后得到

$$I_2(x_2, y_2, t) = S C I(x, y, t) \quad (1)$$

在经过 CCD 记录之后最终得到

$$E(m, n) = T I_2(x_2, y_2, t) \quad (2)$$

这里的  $T$  指的是时空整合操作， $E(m, n)$  指的是 CCD 记录得到的最终图像。

将方程 (1) 和 (2) 联立得到

$$E(m, n) = O I(x, y, t) \quad (3)$$

其中， $O = T S C$ 。

图像重构过程即是方程 (3) 反向求解，根据 CCD 记录图像重构出原始图像，用方程表示如下

$$\begin{cases} \min \|I\|_0 \\ E = OI \end{cases} \quad (4)$$

由于未知数个数远远多于方程个数，这是一个病态方程的求解问题，通常化为目标函数  $f(x)$  的优化求解问题<sup>[16]</sup>

$$f(x) = \operatorname{argmin} \left\{ \frac{1}{2} \|E - OI\|_2^2 + \beta \Phi(I) \right\} \quad (5)$$

其中，前一项为误差项，后一项为稀疏项， $\beta$  为正则参数，作用是平衡两项比重，因此正则参数需要设置一个合适的值。 $\Phi(I)$  为正则函数，保证信号的稀疏性。我们采用全变分函数 (TV) 作为  $\Phi(I)$  来求解上述方程，其中

$$\Phi(I)_{\text{TV}} = \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{i=1}^{N_x \times N_y} \sqrt{(\Delta_i^h I_k)^2 + (\Delta_i^v I_k)^2} + \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_x \times N_y} \sqrt{(\Delta_i^h I_m)^2 + (\Delta_i^v I_m)^2} + \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_x \times N_y} \sqrt{(\Delta_i^h I_n)^2 + (\Delta_i^v I_n)^2} \quad (6)$$

这里我们假定  $I$  的维度为  $N_x \times N_y \times N_t$ ， $I_m$ ， $I_n$ ， $I_k$  则分别指的是  $m$ ， $n$ ， $k$  方向上的二维矩阵， $\Delta_i^h$  和  $\Delta_i^v$  表示二维平面上水平方向和竖直方向上的一阶差分算子。

目前已经有很多的优化算法用于求解方程(5),其中应用较为广泛的是迭代收缩阈值算法<sup>[20]</sup>(IST),它具有较好的鲁棒性而且所需的参数较少。只要确定了初始值,迭代步长和去噪算子,就可以进行迭代求解。但是考虑到它的收敛速度较慢。在此基础上又发展出了两步迭代收缩阈值算法<sup>[21]</sup>(TwIST)。TwIST不仅继承了IST的优点,并且大大提高了收敛速度。他们最大的区别是TwIST使用前两步的迭代值来计算当前值,而IST的当前值只与前一步的迭代值相关。考虑到这些优点,我们最终采用TwIST算法来进行实验中的压缩图像重构求解。TwIST算法的迭代优化过程可以表示为

$$\begin{aligned} x_1 &= \Gamma(x_0) \\ x_t &= (1-\alpha)x_{t-2} + (\alpha-\beta)x_{t-1} + \beta\Gamma(x_{t-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

这里 $t \geq 2$ ,  $x_0$ 表示的是迭代初始值,  $\Gamma(x)$ 为降噪函数,  $\alpha$ 和 $\beta$ 由下式决定

$$\alpha = 1 + \rho^2, \quad \beta = 2\alpha/(\lambda_1 + \lambda_m) \quad (8)$$

这里的 $\rho = \frac{(1 - \sqrt{u})}{(1 + \sqrt{u})}$ ,  $u = \frac{\lambda_1}{\lambda_m}$ 通常取 $\lambda_1 = 10^{-4}$ ,  $\lambda_m = 1$ 。

迭代的终止条件由目标函数来决定

$$C(x_t, x_{t-1}) = \frac{|f(x_t) - f(x_{t-1})|}{f(x_{t-1})} \quad (9)$$

终止值设为 $\varepsilon$ ,当终止函数 $C(x_t, x_{t-1}) < \varepsilon$ ,终止迭代,得到最终的重构结果。

## 1.2 实验光路排布

传统的一维线VISAR通过光学成像系统向待测界面输入一束探针光,由于多普勒效应,探针光反射后会产生多普勒频移,携带多普勒频移信息的探针光分别进入M-Z干涉仪的两臂,由于其中一臂设置了标准具从而引入延迟时间,最终,两束携带不同时刻(时间间隔为)多普勒信息的探针光发生干涉并形成干涉条纹。当待测面的速度发生变化时,条纹的相位会对应改变,VISAR系统通过光学条纹相机和CCD记录条纹的相位变化信息,从而获得待测面的速度历程信息。由于条纹相机扫描成像的原理限制,如果相机狭缝完全打开,不同时刻的图像会沿时间扫描方向相互重叠导致最终的条纹信息无法解读。因此相机狭缝只能打开百微米左右,导致传统的线VISAR只能获得波阵面一维方向的速度信息。CUP技术的最大特点是利用DMD对动态场景进行编码,根据这些编码数据并借助合适的还原算法可以将叠加的二维图像进行重构还原。因此,将一维VISAR与CUP结合得到的CUP-VISAR系统可以解决一维VISAR条纹相机狭缝不能完全打开的问题,对二维场景进行诊断。

图2为目前的实验室光路排布图,实验中采用短脉冲激光器作为光源,经过长距离多模光纤展宽后脉宽约为60 ps,激光经过准直镜准直后进入干涉模块,通过精细调节在图中物面处形成干涉图像。然后分别通过两组4f成像系统依次成像在DMD和条纹相机狭缝处。实验中,利用DMD结合生成的编码图像对待测干涉图进行编码,最后在狭缝完全打开的条纹相机中完成编码图的扫描和压缩记录。由于短脉冲光源经过多模光纤调制后会形成散斑结构,在物面处各空间位置的强度会出现散斑状分布并随着时间发生变化。因此本实验针对干涉图像各空间位置的时变强度分布进行高时间分辨的测量。

## 1.3 实验结果分析

图3(a)为实验中直接测得的编码压缩图(记为A),结合DMD上预制的编码图像,采用TwIST算法进行迭代优化,最终解出60幅干涉图像的时变过程。实验中,高速条纹相机的扫描速度设置为1 ps/pixel,结合压缩感知理论,解出的时变干涉图演化过程的时间分辨为1 ps,也即是通过该实验,获得了干涉图样光强分布60 ps时间内的超快演化过程。

上述实验中,干涉图样的重构过程即为函数优化迭代过程,为了验证上述重构结果的可靠性,我们将重构结果进行了正向编码和移位压缩,获得了模拟压缩图(记为B),为了验证重构结果的准确性,我们采用图像相关系数来进行相关性评估。图像相关系数用于描述两幅图像之间的相似程度,其定义如下

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2\right) \left(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2\right)}} \quad (10)$$

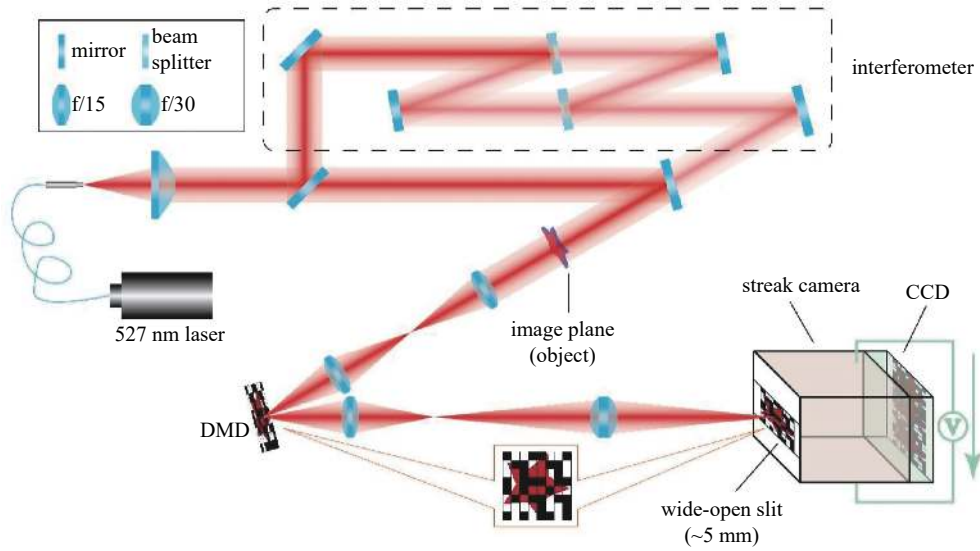


Fig. 2 Schematic diagram of experimental light path

图 2 实验光路排布图

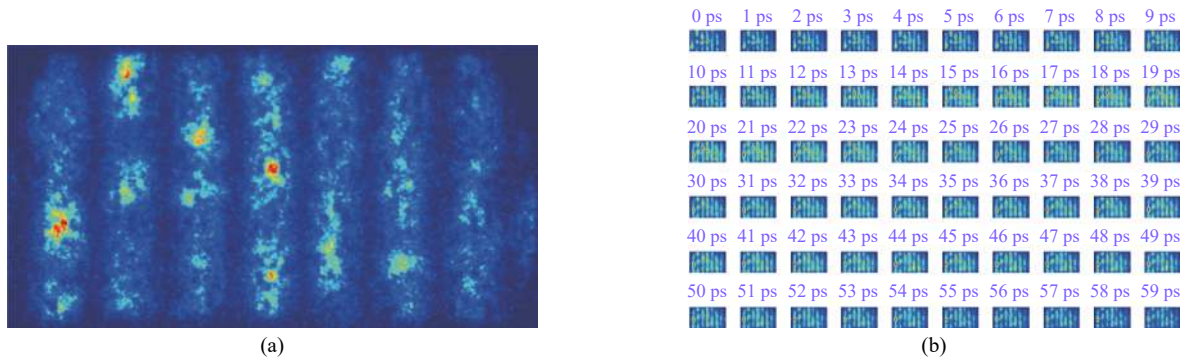


Fig. 3 The measured result in experiment and the reconstruction result

图 3 实验中实测编码压缩图和解码重构结果

其中  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$  分别为两个图像矩阵元素,  $\bar{A}$  和  $\bar{B}$  分别为矩阵元素的平均值, 容易知道, 相关系数越接近 1 表明两幅图像的相关性越强, 因此我们可以用图像相关系数来计算重构图像的还原质量。

我们利用式(10)对模拟压缩图( $B$ )和实测压缩图( $A$ )进行了相关性比较, 获得了较高的相关系数: 96.8%。该相关系数值一定程度上表征了解码结果的准确性。理论上, 如果信息得到了理想重构, 相关系数为 1。但实际实验中, 由于散斑噪声的影响, 给图像的解码重构带来了一定困难, 因而相关系数有一定程度的下降。

通过本次实验, 我们利用压缩感知技术在可见光波段, 完成了干涉图样强度变化过程的超快时间分辨探测, 验证了技术的可行性, 将该技术与现有 ICF 光学诊断技术相结合, 能够孕育出更为精细的诊断能力。比如应用在传统 VISAR 中, 有望获得冲击波二维速度场的超快演化过程, 进而为材料压缩特性以及流体力学不稳定性等研究提供精细数据; 应用在背向散射光诊断中, 能够获得散射光的时空演化过程, 为黑腔内等离子体状态以及定向流动等细致研究提供条件。

## 2 透射式压缩感知技术

### 2.1 透射式压缩编码模块

从前面的介绍可以看出, DMD 是 CUP 技术的关键部件, 它通过反射式微镜阵列对二维图像进行编码, 从而实现后续的压缩重构过程。但对于紫外和 X 光来说, DMD 不再适用, 无法实现编码, 所以要实现紫外光和 X 光压缩感知技术, 首要问题是解决对紫外光和 X 光信号的编码问题。为了解决这个问题, 针对紫外波段和 X 光波段设计了编码图形, 并分别结合紫外和 X 光的传输特性设计了透射式的编码模块, 入射紫外或 X 光信号先经过编码模块进行编码, 然后再进入条纹相机, 由条纹相机进行偏转记录。对紫外波段的编码模块进行了制作, 同时开展了验证实验, 获得了二维重建图像, 验证了透射式压缩感知技术的可行性。

针对紫外光的特性,设计了透射式一体化的编码模块,将该结构替换条纹相机的光阴极,即可实现对入射紫外光的编码,同时又可实现阴极电子的正常发射,其结构如图4所示。该编码模块阴极采用透紫外光的石英作为支撑基底,其上采用300 nm厚后的铬制作编码图形,图形镀铬位置对紫外光有阻碍作用,紫外光无法通过,其他位置紫外光可以正常通过,从而实现对入射紫外光的随机“0,1”编码,再在铬层上制作20 nm至30 nm厚的金层作为阴极电子发射体,即可实现阴极电子的发射。由于当前所用的条纹相机空间分辨约为100 μm,因此设计的编码孔尺寸为100 μm。

对于X光的编码,采用分离的编码板结合常规透射式X光条纹相机阴极实现,如图5所示。结合能够实现编码图形制作的微纳加工工艺以及X光的传输特性,针对能量大于4 keV的X射线设计的X光编码板结构示意图如图5所示,该结构由硅基层层、聚酰亚胺连接层、薄金连接层和厚金编码图形层组成。其中硅基层层实现对整个结构的支撑,为保证X光的透过,采用刻蚀工艺将中心位置的硅基底去除。而聚酰亚胺连接层和薄金层是在编码板制作过程中有着不可或缺的作用,分别实现对厚金编码图形层的连接和支撑作用,为避免这两层结构对入射X射线造成衰减,两者的厚度分别为几微米和几十纳米,可保证能量大于4 keV的X射线正常透过。厚金编码图形层厚度大于5 μm,实现对入射X射线的编码。入射X光首先通过该模块实现编码,而后再入射到X光条纹相机的常规透射式X光阴极发射电子,最终编码的图案由条纹相机扫描记录。

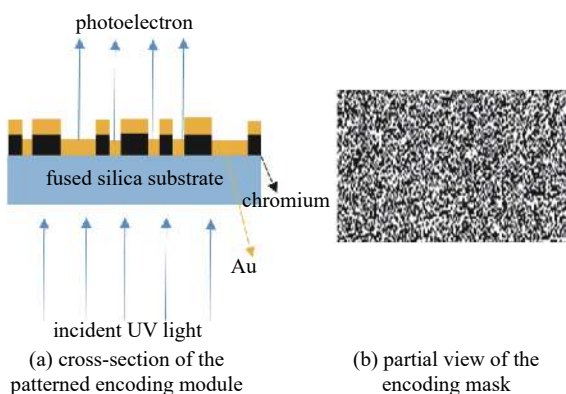


Fig. 4 Configuration of the UV transmission encoding module

图4 紫外透射编码模块结构示意图

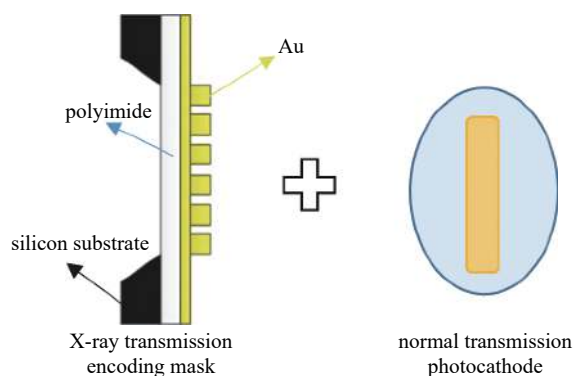


Fig. 5 The encoding method of X-ray

图5 X光编码示意图

## 2.2 实验排布

为验证透射式编码技术的可行性,制作了紫外透射编码板,并开展了验证实验。实验排布如图6所示,采用8 ps紫外激光光源作为入射紫外光,波长为263 nm,在入射光路中加入标准具,产生多个时间间隔相等强度逐渐衰减的脉冲串,然后脉冲串经过一个图形板后进入条纹相机,这样即可得到多个时间间隔相等的携带图形空间信息的紫外光脉冲。相机的触发信号由8 ps紫外激光器产生,其经过DG535后,输入条纹相机,通过调节DG535的延时值,可实现触发信号与入射紫外光的同步。条纹相机的阴极由制作的一体化紫外透射编码板替换,经过图形板后,携带图形空间信息的紫外光进入条纹相机,并由紫外透射编码板对紫外光进行编码压缩后与金层相互作用发射电子,电子由条纹相机聚焦偏转后由CCD记录,最后经过对CCD图像的解码得到入射紫外光的二维时空演化图像。实验中所用的条纹相机扫描速度为2 ps/pixel。

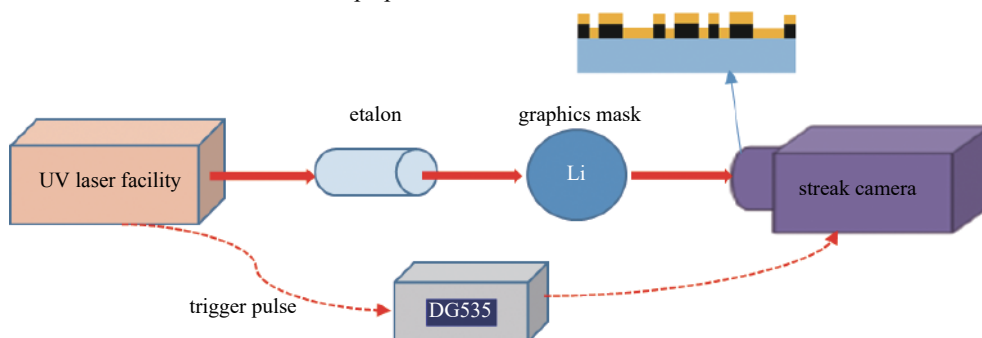


Fig. 6 Schematic of experimental setup

图6 实验排布图

### 2.3 实验结果与分析

在对待测信号进行动态扫描测试前,采用静态紫外光源辐照紫外透射编码板,对编码图案和图形板图案进行了测试,这将作为动态扫描图像解码的输入条件。如图 7 所示,为得到的静态编码和前置图形板后的编码图像,图像清晰,为动态扫描图像解码奠定了重要基础。

动态扫描实验结果如图 8 所示,左图为测试的扫描图像,横轴为空间方向,纵轴为条纹相机时间扫描方向。可以看出一共记录了 6 个脉冲经过图像板后的扫描图像,并且不同时间的二维图像在时间方向发生了重叠压缩,图像强度也在发生变化。利用 TwIST 算法对图像进行了还原,结果如图 8(b) 所示,还原得到了 6 个脉冲的二维图像,初步获得了入射紫外光随时间变化的演化过程。通过该实验,实现了对紫外光图像的编码,验证了透射式压缩感知技术的可行性,为后续发展高时空分辨及多幅数成像的超快 X 光诊断技术奠定了基础。

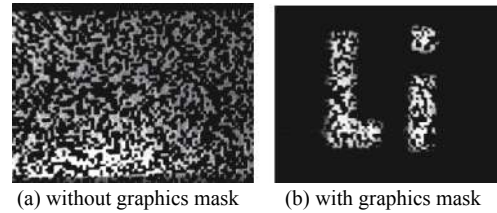


Fig. 7 Static image of the encoding pattern with and without graphics mask of Li (a) without graphics mask (b) with graphics mask

图 7 静态编码图像

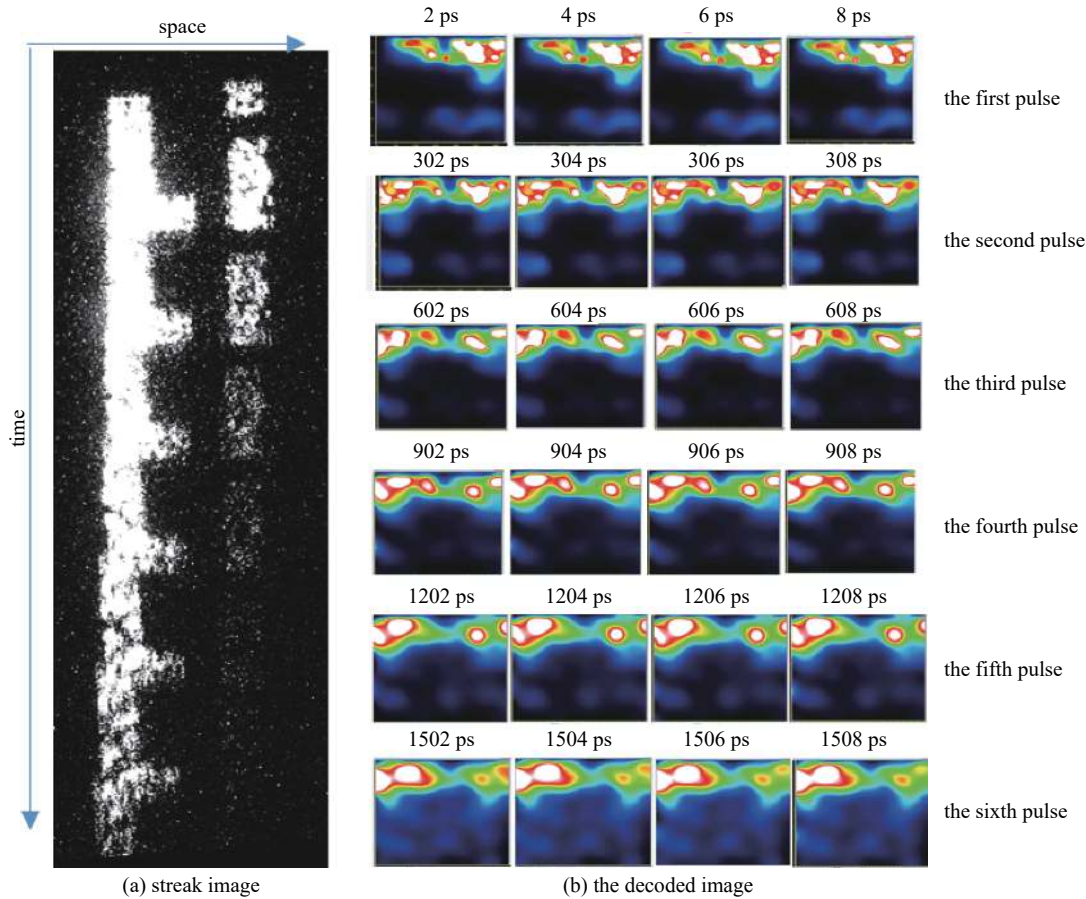


Fig. 8 Images of the dynamic experiment

图 8 动态实验结果图像

### 2.4 多通道透射式 CUP 技术展望

目前单通道透射式 CUP 技术最主要的问题是空间分辨不够。由于其天然的取样编码、解码方式,在实现高时间分辨的同时,很难兼顾高空间分辨。近年来,基于计算成像思想的超分辨技术已经在各个领域得到很好的应用。其基本思想是对同一物体进行多幅图像的欠采样,获得多幅低分辨率的图像。而后对多幅低分辨率图像结合先验知识,在完成图像配准校正后,用特定的时域或频域算法,去合成一幅高分辨的图像<sup>[18-19]</sup>。它的基本思路是通过多通道编码,分别扫描、解码、再合成从而实现高时空分辨的诊断。其主要过程为,使用多通道 CUP 技术实现高时间分辨诊断,同时使用高分辨合成技术将由于压缩感知编码丢失的高分辨信息进行补偿,借助于插值和算法迭代,还原高分辨图像。从而实现多通道高时间、空间分辨的应用于紫外和 X 光诊断领域 CUP 技术。其基本技术过程如图 9 所示:(a)利用多通道成像系统(如 KB 显微镜)将物点图像成像到宽阴极条纹相机的阴极面的不同区域上;

(b)在宽阴极条纹相机阴极前的不同区域放置一种新颖的能够对图像进行互补编码同时又能够使编码图像透过的特殊元件,这样宽阴极条纹相机可以对编码后的多幅图像进行扫描记录;(c)再采用压缩感知技术的算法将物点图像的高速二维变化图像重建出来,而后将多幅复原得到的图像再进行多图像的超分辨率数据融合,从而获得物点高速、高空间分辨的变化过程数据。这种扫描分幅技术克服了单通道CUP技术空间分辨低的问题,充分发挥了该技术时间分辨高的优势,基于现有的高空间分辨成像系统如KB显微镜和X光条纹相机硬件系统即可开展。

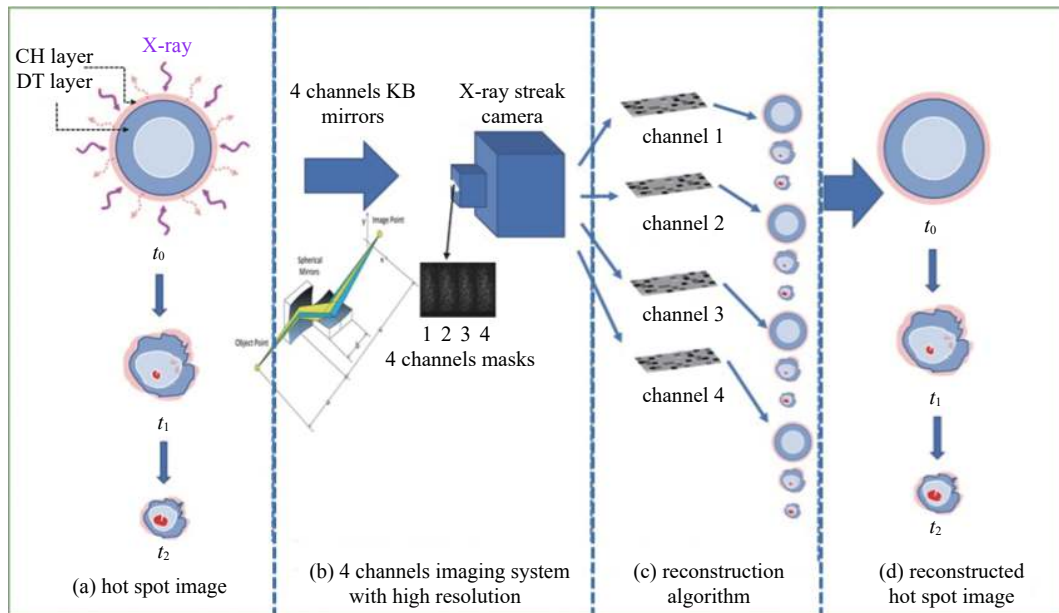


Fig. 9 Basic design of scanning framing system based on CUP technology and wide cathode X-ray fringe camera

图 9 基于超快压缩照相技术和宽阴极 X 射线条纹相机的扫描分幅系统基本设计

### 3 结 论

本文介绍了两种基于压缩感知的新型诊断技术,分别是可见光压缩感知技术和透射式压缩感知技术,利用 TwIST 算法我们实现了对压缩图像的解码重构。对于可见光压缩感知技术,我们结合现有的一维 VISAR 提出了全新的二维 CUP-VISAR 技术,在实验中获得 60 幅时间分辨 1 ps 的二维干涉图像演化过程,验证了其可行性。对于紫外和 X 光诊断技术,设计了透射式编码模块解决了对紫外和 X 光图像的编码问题,并设计了实验验证了该技术的可行性。最后我们基于计算成像,提出了多通道 CUP 技术,有望实现高时空分辨的超快紫外和 X 光诊断技术。

#### 参考文献:

- [1] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. Inertially confined fusion plasmas dominated by alpha-particle self-heating[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(8): 800-806.
- [2] Meezan N B, Edwards M J, Hurricane O A, et al. Indirect drive ignition at the National Ignition Facility[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2017, 59: 014021.
- [3] Kline J L, Batha S H, Benedetti L R, et al. Progress of indirect drive inertial confinement fusion in the United States[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 112018.
- [4] Clark D S, Weber C R, Milovich J L, et al. Three-dimensional modeling and hydrodynamic scaling of National Ignition Facility implosions[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 050601.
- [5] 陈伯伦, 蒋炜, 景龙飞, 等. 再发射技术测量 SG II 黑腔靶早期对称性[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(2): 385-388. (Chen Bolun, Jiang Wei, Jing Longfei, et al. Re-emission technique for early time, hohlraum radiation symmetry measurements on SG II facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(2): 385-388)
- [6] 黎航, 蒲昱东, 景龙飞, 等. 间接驱动的内爆不对称性随腔长和时间变化的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62: 225204. (Li Hang, Pu Yudong, Jing Longfei, et al. Variations of implosion asymmetry with hohlraum length and time in indirect-drive inertial confinement fusion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 225204)
- [7] 董建军, 曹柱荣, 杨正华, 等. 辐射驱动内爆流场实验测量[J]. *物理学报*, 2012, 61: 155208. (Dong Jianjun, Cao Zhurong, Yang Zhenghua, et al. Measurement of implosion trajectory for hohlraum-radiative-driven[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 155208)
- [8] Li Yaran, Dong Jianjun, Xie Qing, et al. Development of a polar-view Kirkpatrick-Baez X-ray microscope for implosion asymmetry studies[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8348-8360.



- [9] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation x-ray imager (invited)[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2014, 85: 11E504.
- [10] Hilsabeck T J, Nagel S R, Hares J D, et al. Picosecond imaging of inertial confinement fusion plasmas using electron pulse-dilation[C]//Proceedings of SPIE 10328, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics. Osaka: SPIE, 2017: 103280S.
- [11] Shiraga H. Review of concepts and applications of image sampling on high-speed streak cameras[C]//Proceedings of SPIE 10328, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics. Osaka: SPIE, 2017: 103280R.
- [12] Nagel S R, Bell P M, Bradley D K, et al. Fielding DIXI - a new x-ray framing camera for the NIF - at JLF[R]. LLNL-PRES-617852.
- [13] Engelhorn K, Hilsabeck T J, Kilkenny J, et al. Sub-nanosecond single line-of-sight (SLOS) x-ray imagers (invited)[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2018, 89: 10G123.
- [14] Theobald W, Sorce C, Bedzyk M, et al. The single-line-of-sight, time-resolved X-ray imager diagnostic on OMEGA[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2018, 89: 10G117.
- [15] Donoho D L. Compressed sensing[J]. [IEEE Transactions on Information Theory](#), 2006, 52(4): 1289-1306.
- [16] Gao Liang, Liang Jinyang, Li Chiye, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. [Nature](#), 2014, 516(7529): 74-77.
- [17] Lai Yingming, Xue Yujia, Côté C Y, et al. Single-shot ultraviolet compressed ultrafast photography[J]. [Laser & Photonics Reviews](#), 2020, 14: 2000122.
- [18] Dong Chao, Loy C C, He Kaiming, et al. Image super-resolution using deep convolutional networks[J]. [IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence](#), 2016, 38(2): 295-307.
- [19] Conkey D B, Caravaca-Aguirre A M, Dove J D, et al. Super-resolution photoacoustic imaging through a scattering wall[J]. [Nature Communications](#), 2015, 6: 7902.
- [20] Daubechies I, Defrise M, De Mol C. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint[J]. [Communications on Pure and Applied Mathematics](#), 2004, 57(11): 1413-1457.
- [21] Bioucas-Dias J M, Figueiredo M A T. A new twist: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration[J]. [IEEE Transactions on Image Processing](#), 2007, 16(12): 2992-3004.