

# 背光阴影成像表征降温速率对 ICF 冷冻冰层均化的影响\*

王凯 林伟 刘元琼 谢端 黎军 马坤全 唐永建 雷海乐<sup>†</sup>

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011 年 11 月 3 日收到; 2012 年 1 月 30 日收到修改稿)

利用背光阴影成像技术研究了降温速率对惯性约束聚变 (ICF) 球形氘氘冷冻靶中燃料冰层均化的影响. 实验中, 首先对 ICF 冷冻靶温度场进行标定以确定靶丸处的温度, 然后利用背光阴影成像系统对降温过程中靶丸内燃料冰层的空间变化进行实时原位测量, 得到了不同降温条件下冷冻靶背光阴影成像图像中亮环的功率谱. 实验结果表明: 相比快速降温, 台阶式缓慢降温有利于形成均匀的燃料冰层; 同时验证了背光阴影成像技术表征 ICF 冷冻靶内冷冻冰层均化的有效性.

**关键词:** 惯性约束聚变, 冰层均化, 降温速率, 背光阴影成像

**PACS:** 52.57.-z, 07.20.Mc, 47.27.er, 68.35.Ct

## 1 引言

在惯性约束聚变 (ICF) 实验的冷冻靶研究中<sup>[1-6]</sup>, 需要将聚变燃料如氘氘 (DD)、氘氚 (DT) 等气体在靶丸中进行冷却并在靶丸内表面形成均匀的燃料冰层. 为满足物理实验要求, DD 或 DT 必须在 ICF 靶丸的内壁形成一高度均匀、光滑 (表面粗糙度小于  $1\ \mu\text{m}$ )、中心对称 (球心度大于 99%) 的固态冰层, 其面密度达到  $300\ \text{mg}/\text{cm}^2$ <sup>[7,8]</sup>. 但是在冷冻靶制备过程中, 由于液体向固体转化过程中的重力作用、液体表面张力、靶周围不等温环境、靶丸自身内表面粗糙度与缺陷, 结晶过程中的各向异性等, 很难使氘氘等核燃料在靶丸内壁形成高度均匀、光滑的固态燃料冰层. 目前主要有快速等温冷冻技术、温度梯度、降温过程控制、红外线加热、微波等离子体加热等方法<sup>[9-16]</sup>. 在均化过程中, 靶丸外部环境的温度场分布直接决定燃料晶体生长过程, 如冰层生长速率、冰层表面形貌、冰层内部缺陷等, 因此温度场精确控制对均化过程至关重要. 温度场控制主要包含: 降温过程控制、降温

速率控制与温度稳定性控制等. 国外很早就开展了温度场控制对均化过程中 DD/DT 固体生长影响的研究. 对靶丸内燃料冰层的表征目前一般采用 X 射线相衬成像<sup>[17,18]</sup> 和背光阴影成像<sup>[19]</sup> 等方法. 对于透明靶丸, 相比 X 射线相衬成像, 背光阴影成像是测量冰层表面粗糙度的标准方法, 具有结构简单、无电离辐射、成像速度快等优点, 更适合冷冻靶均化过程的在线实时监测. 本文采用背光阴影成像技术实时原位表征了不同降温速率下氘氘冷冻冰层均化过程的影响. 实验结果表明: 相比快速降温, 台阶式缓慢降温更有利于 DD 冷冻冰层的均化.

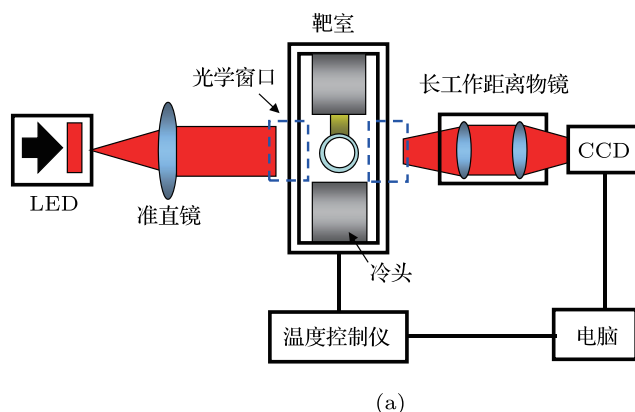
## 2 实验装置及原理

氘氘冷冻靶的均化实验系统如图 1(a) 所示, 主要包括低温制冷部分和背光阴影成像部分<sup>[20,21]</sup>. 低温制冷部分由 GM 制冷机、真空泵、真空罩、温度传感器、温度控制仪组成. 其中温度传感器和加热电阻丝置于冷头处, 通过温度控制仪调节制冷机的制冷功率和电阻丝的加热功率来控制冷头的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51006093) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: hailelei@caep.ac.cn

温度. 背光阴影成像单元由 835 nm 红外 LED、长工作距离显微镜、CCD 和图像采集卡组成. LED 发出的光准直经过光学窗口进入靶室, 透射过靶丸后经过长工作距离显微镜成像在 CCD 上, 最后由



图像采集卡采集显示在电脑上进行分析处理. 常温下充有 40 MPa 氩气 (标准状态下, DD 的三相点温度为 18.71 K), 直径为 200  $\mu\text{m}$  的玻璃靶丸通过高导无氧铜靶杆固定在冷头上.

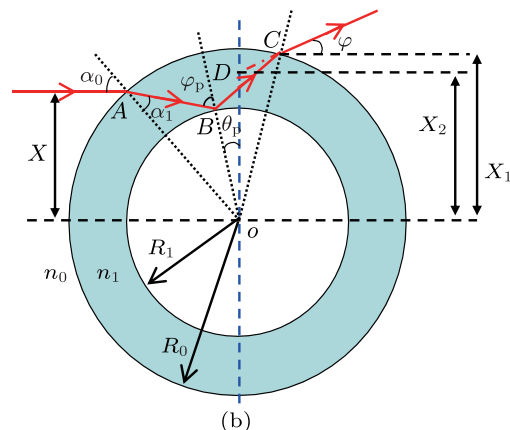


图 1 (a) 氩气冷冻靶均化实验系统图; (b) 背光阴影成像光线轨迹图

实验中, 在真空条件下 (真空度达到  $10^{-4}$  Pa), 通过温度控制仪控制系统的降温速率, CCD 实时监控玻璃靶丸中 DD 的冷冻过程. 当玻璃靶丸中的 DD 在低温下发生相变时, 在 DD 固体 (或者液体) 与气体交界面处由于折射率的不同而使得一部分入射光线发生全反射, 最终在 CCD 采集的图像中出现亮环. 亮环形成如图 1(b) 所示, 对于单层靶丸, 假定 DD 冰层均匀分布于靶丸内壁,  $n_0, n_1, n_2$  是相应层的折射率, 其中  $n_0 = n_2 = 1$ , DD 冰层的折射率  $n_1 = 1.14$ .  $R_0$  和  $R_1$  分别是相应层半径, 设归一化半径  $R_0 = 1$ ,  $\Delta R = R_0 - R_1$  是 DD 冰层的厚度. 入射光线以  $\alpha_0$  入射到靶丸上, 对应的入射位置坐标为  $X$ , 在 A 点发生折射, 接着在 B 点发生全反射, 最终以  $\varphi$  角从 C 点出射. 假定观察平面垂直于光轴, 位于 OD 平面, 出射光线投射到观察平面上的位置坐标为  $X_2$ . 当入射光线满足全反射条件时, 根据折射定律和几何光学推导, 可以得到

$$X_2 = R_0 \sin(\alpha_0 + \varphi) - R_0 \cos(\alpha_0 + \varphi) \tan \varphi, \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \varphi = & \pi - 2\alpha_0 + 2 \arcsin(n_0 X/n_1) \\ & - 2 \arcsin(n_0 X/n_1 R_1), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\alpha_0 = \arcsin(X/R_0). \quad (3)$$

从 (2) 式和 (3) 式可以看出, 光线的出射位置与入射

位置有关. 观察平面上点  $X_2$  处的光强度为

$$I(X_2) = I_0(X_2) \left| \frac{dX}{dX_2} \right| \cos \varphi, \quad (4)$$

其中  $I_0(X_2)$  是光线离开靶丸时的光强. 根据 (1)—(3) 式, 可以得到出射光线位置坐标  $X_2$  与入射光线位置坐标  $X$  的关系式  $X_2 = X_2(X)$ . 图 2(a) 所示为不同  $R_1$  条件下的计算结果,  $X$  取值在形成亮环的上下边界值之间. 图 2(a) 中所有曲线都有一极小值, 这就意味着  $X_2$  关于  $X$  函数的一阶导数  $dX_2/dX$  在该位置为 0. 此时 (4) 式中的  $\left| \frac{dX}{dX_2} \right|$  为一断点, 其值趋于无穷大, 出现类似于光学系统中透镜的特性, 对应的光强度在该点有一极大值 [22], 最终在背光阴影图像中形成亮环. 由于折射的影响, 背光阴影图像中观察到的亮环厚度并不是实际 DD 冰层的厚度, 与 DD 冰层的折射率有关 [23]. 根据 (1)—(4) 式, 可以得到亮环厚度与实际 DD 冰层厚度的关系, 如图 2(b) 所示. 从图 2(b) 可以看出, 实际 DD 冰层厚度总是大于背光阴影图像中观察到的亮环厚度. 因此, 只需得到背光阴影图像中亮环位置轮廓的数据, 通过亮环厚度和 DD 冰层厚度的对应关系, 可以得到垂直于光轴的大圆平面内 DD 冰层的厚度. 另一方面, 亮环位置数据是随径向方向变化的, 对其进行傅里叶变换可以得到垂直于光轴的大圆平面内 DD 冰层的模数 - 功率谱特征参数, 从而得到冰层的表面粗糙度 [24]. 亮环位置的一维傅里

叶变为

$$R(\theta) = a_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)] (\mu\text{m}), \quad (5)$$

模数  $n$  对应的功率谱  $P_n$  为  $p_n = a_n^2 + b_n^2 (\mu\text{m}^2)$ , 则模数从  $n_1$  到  $n_2$  的功率谱与冰层的均方根粗糙度  $\sigma_{\text{rms}}$  的关系为

$$\sigma_{\text{rms}(n_1 \rightarrow n_2)}^2 = \sum_{n=n_1}^{n_2} P_n (\mu\text{m}^2). \quad (6)$$

从 (5)—(6) 式可以看出, 只需得到亮环位置数据, 通过傅里叶变换就能得到 DD 冰层的表面粗糙度信息.

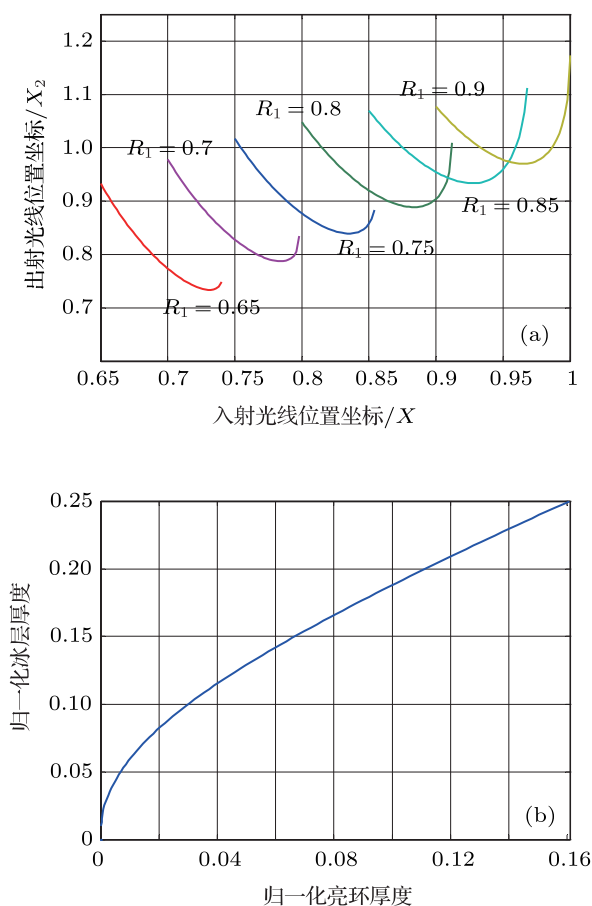


图 2 (a) 不同  $R_1$  条件下, 入射光线位置坐标  $X$  与出射光线位置坐标  $X_2$  的对应关系; (b) 观察到的亮环厚度与实际 DD 冰层厚度的关系

### 3 实验结果与分析

由于温度传感器固定在冷头上, 显示的温度并不是靶丸处的温度, 因此首先需要进行温度标定. 根据 DD 的三相点温度为 18.71 K, 我们采取的温度标定步骤如下: 首先快速降温到 DD 的三相点以

下 (18.4 K 时) 使靶丸内的 DD 形成固体, 然后通过温控仪以 10 mK 的步长缓慢升温, 在每个温度点都等待 30 min 直至燃料处于稳态, 同时利用 CCD 采集图像. 当观察到 CCD 图像上固体消失时, 控温仪的设定温度就对应靶丸内 DD 的三相点温度, 其过程如图 3 所示.

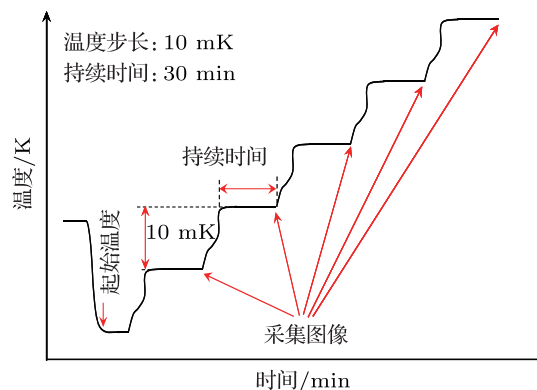


图 3 温度标定过程示意图

当靶丸内 DD 固体消失时候, 温控仪的设定温度为 18.52 K 左右, 因此靶丸处的温度比冷头处的温度高 0.2 K. 为了分析不同降温速率对 DD 固体分布的影响, 我们得到了两种不同降温速率 (快冷和慢冷) 下的靶丸的背光阴影图像. 图 4 对应的降温速率为 6 K/min, 图中所示温度为标定后的温度. 可以看出当温度在 DD 的三相点以下时, 靶丸内出现了 DD 固体, 聚集在高导无氧铜与靶丸的连接处. 由于降温速率很快, 整个靶丸的温度分布不均匀, 靶杆与靶丸的连接处更早降到氘的三相点温度以下, 使氘首先在此处由液相向固相转变, 最终在靶杆与靶丸的连接处形成团状固体.

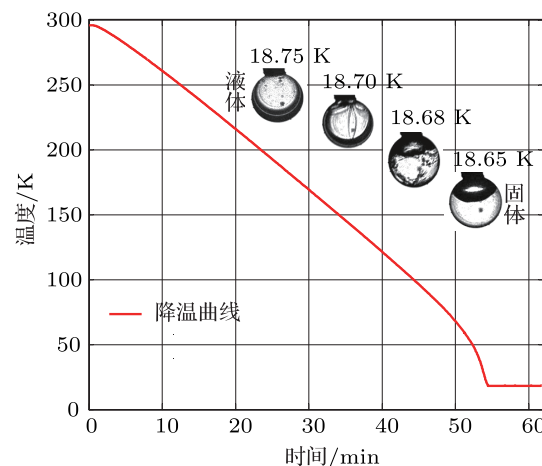


图 4 快速降温时靶丸的背光阴影图像

图 5 所示为台阶式缓慢降温过程, 图中所示温度为标定后的温度. 从 18.75 K 开始, 以 0.01 K 的速度缓慢降温, 同时, 在每个温度点持续一个小时左右, 使整个靶丸的温度分布相对均匀, 有利于固体氘冰的均匀分布, 避免了多晶的形成. 从图 5 可以看出, DD 固体不聚集在靶杆和靶丸的连接处, 在图像中可以观察到不连续的亮环. 通过对背光阴影图像中亮环进行功率谱分析, 可以得到冰层的表面粗糙度. 由于此时靶丸内 DD 冰层主要分布在左侧, 没有形成完整的、连续的亮环, 因此只选取其中一段弧形的亮环进行功率谱分析.

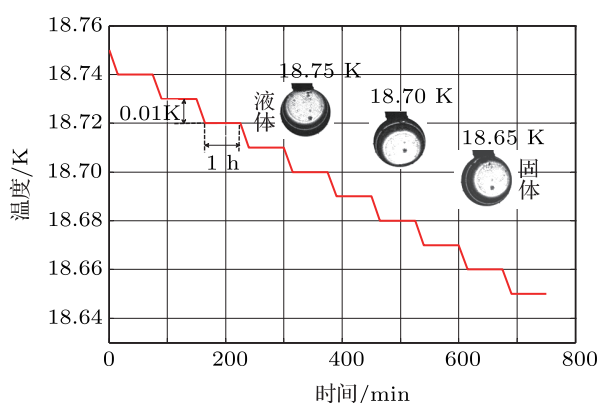


图 5 台阶式缓慢降温时靶丸的背光阴影图像

图 6 为台阶式缓慢降温时对应 18.65 K 温度时的背光阴影图像. 其中深色的圆是靶丸外边缘的拟合圆, 我们选取了如图所示的约 120° 的扇形亮环部分进行模数 - 功率谱分析.

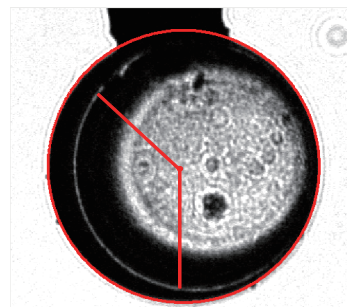


图 6 台阶式缓慢降温时候对应 18.65 K 温度时的背光阴影图像

首先通过靶丸外边缘点最小二乘拟合得到圆心位置, 把原始图像在极坐标中展开, 如图 7(a) 所示. 为了将像素坐标转换为长度坐标, 需要知道图像中每个像素对应的实际长度. 实验前使用测量显微镜测得靶丸的外径为 200.2  $\mu\text{m}$ , 然后通过三次样条函数拟合得到靶丸外轮廓对应的像素数为 515.4, 因此每个像素对应的实际长度为 0.194  $\mu\text{m}$ . 图 7(b) 为用高斯函数拟合得到的亮环位置随径向角度变化曲线. 最终通过 (5) 式和 (6) 式得到冰层的功率谱特征曲线, 如图 7(c) 所示.

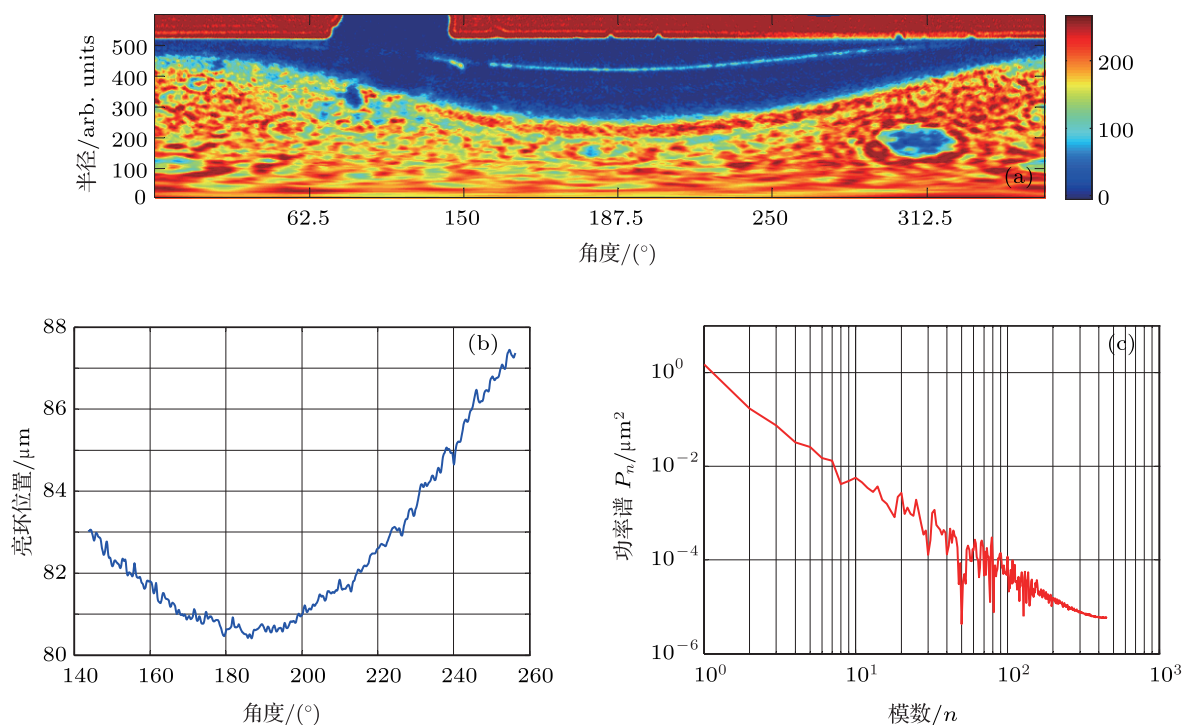


图 7 (a) 原始图像在极坐标中展开; (b) 亮环位置随角度变化曲线; (c) 亮环的功率谱分布曲线

在图 7(c) 所示的一维功率谱曲线中, 模数 1 对应的功率幅度为  $1.4819 \mu\text{m}^2$ ; 模数 2 对应的功率为  $0.1724 \mu\text{m}^2$ ; 模数 3 对应的功率为  $0.0041 \mu\text{m}^2$ , 小于  $10^{-2} \mu\text{m}^2$ . 我们可以计算出模数从 1 到 100 的功率谱之和对应的冰层均方根粗糙度为  $1.3694 \mu\text{m}$ , 主要由模数 1 和模数 2 引起, 模数大于 2 的均方根粗糙度小于  $0.47 \mu\text{m}$ . 分析结果表明: 台阶式缓慢降温时候, 高模数对应的功率幅度比例很小, 因此可以有效减小高模数的扰动对冰层表面均方根粗糙度的影响.

## 4 结论

本文通过背光阴影成像技术对不同降温速率下 ICF 冷冻靶冷冻冰层的均化效应进行了初步研究. 通过温度标定方法, 首先确定了冷头处和靶丸处的温差, 最后对台阶式缓慢降温条件下得到的固体冰层进行了功率谱分析. 台阶式缓慢降温能够有效减小高模数的扰动对冰层表面均方根粗糙度的影响. 因此, 通过在 DD 的三相点附近缓慢阶梯降温, 再结合温度梯度的方法有望实现 ICF 冷冻靶的均化.

- [1] Hoffer J K, Foreman L R 1988 *Phys. Rev. Lett.* **60** 1310
- [2] Combs S K 1993 *Rev. Sci. Instrum.* **64** 1679
- [3] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [4] Sheliak J D, Hoffer J K, 1999 *Fusion Technol.* **35** 234
- [5] Dai W, Tang Y J, Wang C Y, Sun W G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7313 (in Chinese) [戴伟, 唐永建, 王朝阳, 孙卫国 2009 物理学报 **58** 7313]
- [6] Bi P, Liu Y Q, Tang Y J, Yang X D, Lei H L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7531 (in Chinese) [毕鹏, 刘元琼, 唐永建, 杨向东, 雷海乐 2010 物理学报 **59** 7531]
- [7] Haan S W, Callahan D A, Edwards M J, Hammel B A, Ho D D, O S Jones, Lindl J D, MacGowan B J, Marinak M M, Munro D H, Pollaine S M, Salmonson J D, Spears B K, Suter L J 2009 *Fusion Sci. Technol.* **55** 227
- [8] Koziolowski B J, Kucheyev S O, Lugten J B, Koch J A, Moody J D, Chernov A A, Mapoles E A, Hamza A V, Atherton L J 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 093512
- [9] Miller J R, Fries R J, Press W J 1979 *J. Nucl. Mater.* **85-86** 121
- [10] Mok L S, Kim K, Bernat T P 1985 *Phys. Fluids* **28** 1227
- [11] Kim K, Krahn D L 1987 *J. Appl. Phys.* **61** 2729
- [12] Collins G W, Bittner D N, Monsler E, Letts S, Mapoles E R, Bernat T P 1996 *J. Vac. Sci. Technol. A* **14** 2897
- [13] Bittner D N, Collins G W, Sater J D 2003 *Fusion Sci. Technol.* **44** 7492003
- [14] London R A, Koziolowski B J, Marinak M M, Kerbel G D 2006 *Fusion Sci. Technol.* **49** 608
- [15] Chen C M, Norimatsu T, Tsuda Y, Yamanaka T, Nakai S 1993 *J. Vac. Sci. Technol. A* **11** 509
- [16] Mapoles E R, Sater J, Pipes J, Monsler E, 1997 *Phys. Rev. E* **55** 3473
- [17] Koziolowski B J, Koch J A, Barty A, Martz H E, Lee W K, Fezzaa K 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 063103
- [18] Wang X F, Wang J Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **60** 025212 (in Chinese) [王晓方, 王晶宇 2011 物理学报 **60** 025212]
- [19] Nikitenko A I, Tolokonnikov S M 2007 *Fusion Sci. Technol.* **51** 705
- [20] Lei H L, Li J, Tang Y J, Liu Y Q 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 033103S
- [21] Lei H L, Li J, Tang Y J, Shi H L, Liu Y Q 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 0053 (in Chinese) [雷海乐, 黎军, 唐永建, 师洪丽, 刘元琼 2009 强激光与粒子束 **21** 0053]
- [22] Lamy F, Vosion Y, Diou A, Martin M, Jeannot L, Pascal G, Hermerel C 2005 *Fusion Sci. Technol.* **48** 1307
- [23] Gillot F, Choux A, Jeannot L, Pascal G, Baclet P 2006 *Fusion Sci. Technol.* **49** 626
- [24] Liu Y Q, Zhao X S, Lei H L, Xie D, Gao D Z 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 0012 (in Chinese) [刘元琼, 赵学森, 雷海乐, 谢端, 高党忠 2010 强激光与粒子束 **22** 0012]

# Effect of cooling rate on layering ICF cryogenic ice characterized by backlit shadowgraphy\*

Wang Kai Lin Wei Liu Yuan-Qiong Xie Duan Li Jun  
Ma Kun-Quan Tang Yong-Jian Lei Hai-Le<sup>†</sup>

(Research Centre of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 3 November 2011; revised manuscript received 30 January 2012)

## Abstract

The effect of cooling rate on layering the deuterium ice inside inertial confinement fusion (ICF) spherical cryotarget is studied by backlit shadowgraphy. Experimentally, the temperature of ice is first determined by the calibration of temperature field around ICF cryotarget. The solidification process of deuterium in the cryotarget is *in-situ* characterized by backlit shadowgraphy. The power-spectrum density of the bright ring in shadowgraphy at different cooling rates is obtained. Experimental results demonstrate that the step-gradient slow cooling is favorable for forming uniform fuel ice in comparison with the rapid cooling. Furthermore, the validity of characterizing the ICF cryotarget layering by the backlit shadowgraphy is also verified.

**Keywords:** inertial confinement fusion (ICF), layering, cooling rates, backlit shadowgraphy

**PACS:** 52.57.-z, 07.20.Mc, 47.27.er, 68.35.Ct

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51006093).

† E-mail: hailei@caep.ac.cn