

的激光作为检测光,而用 $0.633\mu\text{m}$ 的氦-氖激光作为参比光,以除去甲烷以外的干扰因素。将这两束激光平行化后向监测区发射,比较其光强的衰减量,便可得知激光所穿过的大气中甲烷的浓度。目前发明者还在进行应用试验,对液化天然气管道的泄漏作安全性监测,有效范围 200m。

4. 电子连续截断法和“负性过滤”¹⁾

目前国内生产的红外气体分析仪,都有一个由小电机带动的机械式斩波器(截断器)将红外光源发出的光束调制成交变信号。这不仅增加了仪器的功耗,而且因有电机给防爆带来一定的困难。笔者查看了美国拉哥公司生产的 LI-6050 二氧化碳分析器,内部没有机械式斩波器,而是用电子连续截断法来替代,笔者认为这一技术值得借鉴。“负性过滤”如图 6 所示。当初级丝极通电后,其辐射首先通过基准气体,再通过样本气体,直到探测器内。基准气体是二氧化碳气体,能在数个波带吸收初级丝极的辐射,这种过滤辐射的新方法称为“负性过滤”。

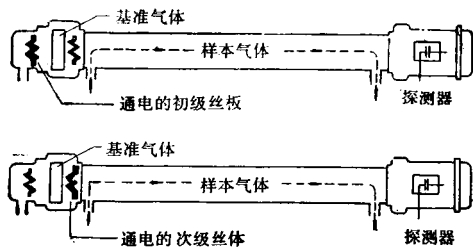


图 6 LI-6050 二氧化碳分析器原理图¹⁾

当初级丝极通电后,辐射首先通过样本气体,之后到达探测器,初级和次级辐射穿过相同的气体样本,故样本内的任何杂物与尘埃均可视为共模,当计算初级和次级辐射能量比例时,便可略去。

当初级丝极辐射经过二氧化碳基准气体时,二氧化碳会吸收对其有反应的波带能量,因此辐射穿过样本气体后,探测器对样本气体内的二氧化碳的浓度反应相对地极少,至于次级丝极辐射能量的减少,则决定于样本气体内二氧化碳的浓度。初级丝极辐射由置于终端的探测器所探测。人们将初级与次级所测得的能量相比,就可计算样本气体内二氧化碳浓度。

随着科学技术的进步,物理学原理将会在气体检测技术中得到更有效的应用。物理学工作者应当义不容辞地与工程技术人员、农业科技人员进行密切的合作,在这一领域进行更多的探索与研究,以使这一技术领域为我国的经济建设发挥更大的作用。

- [1] 张维新等编,半导体传感器,天津大学出版社,(1990),250—270.
- [2] 康昌鹤等编著,气、湿敏传感器件及其应用,科学出版社,(1988),5—28.
- [3] 王省身编,矿井灾害防治理论与技术,中国矿业大学出版社,(1986),88—98.
- [4] 朱绍龙等,分析仪器, No. 1(1990),27.
- [5] 东方晓,仪器与未来, No. 8(1991),20.

1) 美国拉哥公司,LI-6050 二氧化碳分析器技术说明书。

激光聚变实验测量和诊断技术的新进展

——激光间接驱动干净辐射场的建立和诊断

李文洪 丁永坤 蒋小华 李三伟 梅启庸 赵雪薇

成金秀 祁兰英 唐道源 郑志坚 江文勉

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所,成都 610003)

介绍了我们在激光惯性约束聚变(ICF)实验测量和诊断技术方面取得的新进展。着重介绍了激光聚变黑洞靶辐射场干净性的实验测量及其诊断技术。采用改进后的带视场限制系统的散射光探测器和

改进型法拉第杯分别测量了内爆区散射激光和快离子特性。巧妙设计腔靶结构,利用高能针孔相机和 FF 谱仪测量硬 X 射线空间分布及能量变化,定出了进入内爆区中的超热电子量。

激光惯性约束聚变 (ICF) 的研究是当代重大而又难度大的国际高科技研究课题之一。它已成为不同于磁约束聚变的另一条最有希望实现受控热核聚变的主要途径。其基本原理是:利用驱动器输出的高功率激光脉冲,通过内爆压缩途径使聚变靶丸内的氘氚 (DT) 混合物达到高密度和热核点火温度,在惯性约束状态下发生自持热核反应,当释放的能量大于输入能量时就获得了能量增益。ICF 的远期目标是在 21 世纪实现理想的经济的和干净的聚变能源;其近中期目标则以军事应用为重点,为核武器的实验室研究提供一种新的手段。

众所周知,辐射驱动(或称间接驱动)是实现 ICF 的重要技术途径之一^[1]。它将大大减缓直接驱动(激光直接辐射靶丸)对光学均匀性的要求和简化了激光装置结构。该驱动方式的基本物理思路是:将强激光注入具有一定结构的黑腔内转换为强 X 射线辐射场,这些射线光被约束在“空腔”中,X 射线具有流动性好的特点,易形成一个较理想的高温、均匀辐射场,利用 X 射线烧蚀产生的烧蚀压,驱使含 DT 靶丸聚爆。

ICF 的长远目标是高增益。要实现高增益的先决条件是高压压缩。对辐射驱动来说,高压压缩首先要解决的问题是创造一个理想、干净的高温辐射场,为此在靶丸周围提供一个具有一定“干净”度(指进入内爆区的散射激光、快离子、超热电子份额尽量少)的良好辐射场,是实现辐射驱动内爆高压压缩重要的基本条件。

短波长激光(如钕玻璃激光的三倍频激光)打靶能改善吸收品质,抑制有害的超热电子的产生,有利于实现内爆辐射场的干净性,在目前国际激光核聚变中已被普遍采用^[2]。由于条件限制,我国目前主要以钕玻璃激光的基频光打靶,各种非线性过程、超热电子及快离子都相当严重^[3]。为缩短我国辐射驱动激光聚变工作和发达国家的差距,我们必须研究基频光驱动下

内爆辐射场的干净性,以掌握黑洞物理规律及其诊断技术,用以设计合适的黑洞内爆靶构形,以便在现有器件条件下获得一个足够干净、均匀的高温内爆辐射场,为辐射驱动内爆聚变研究创造良好环境。

一、物理思路

我们准备从三个方面着手来创造干净的内爆辐射场:(1)减少内爆区中的散射激光量;(2)降低进入内爆区中的快离子速度及总量;(3)抑制进入内爆区中的超热电子总量。

对散射激光和快离子,采用有机隔离膜加以阻挡。有机膜质量密度小,原子序数较低,对 X 射线透明度高,是目前我们在黑腔靶中用来阻挡散射激光、快离子,而对 X 射线具有较好透过率的滤膜。通过膜厚的变化来观察内爆区中散射激光量和快离子的特性,同时监测内爆区中 X 射线量的变化,在保证 X 射线畅通条件下确定内爆中子靶的有机隔离膜厚度。对超热电子的抑制,采用一定尺寸结构的转换屏蔽体来实现。

二、靶结构及实验条件和布局

实验在中国科学院、中国工程物理研究院高功率激光物理联合实验室的“神光”I 号装置上进行。其单路激光输出能量 E_l 可达 700J 左右,脉冲宽度 $\tau_l = 0.8\text{ns}$ 左右,激光焦斑直径 $\varphi \approx 60\mu\text{m}$,信噪比 $S/N > 10^6$; ASE $< 80\mu\text{J}$,靶场损耗 $< 15\%$ 。靶场瞄准精度:对 $\varphi 250\mu\text{m}$ 小孔, $E_l \approx 600\text{J}$ 时,激光注入率 $\eta > 90\%$ 。打靶透镜相对孔径 $f/1.7$ 。

为实现辐射驱动内爆,需研制一个合适的特殊结构黑洞靶,要求这种靶构形和尺度最大限度地适合激光能量转换为 X 射线能量,并高效地输运至内爆区域,靶设计要求尽可能防止

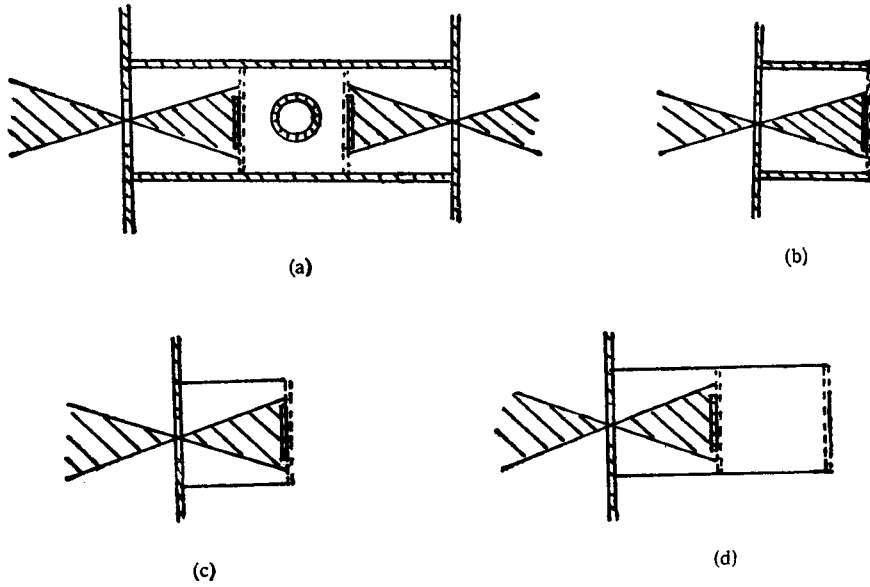


图1 实验用靶示意图

(a) 标准黑洞靶; (b) 源区靶; (c) 薄壁源区靶 (YQ-3); (d) 薄壁源区加内爆区 (YQ-4)

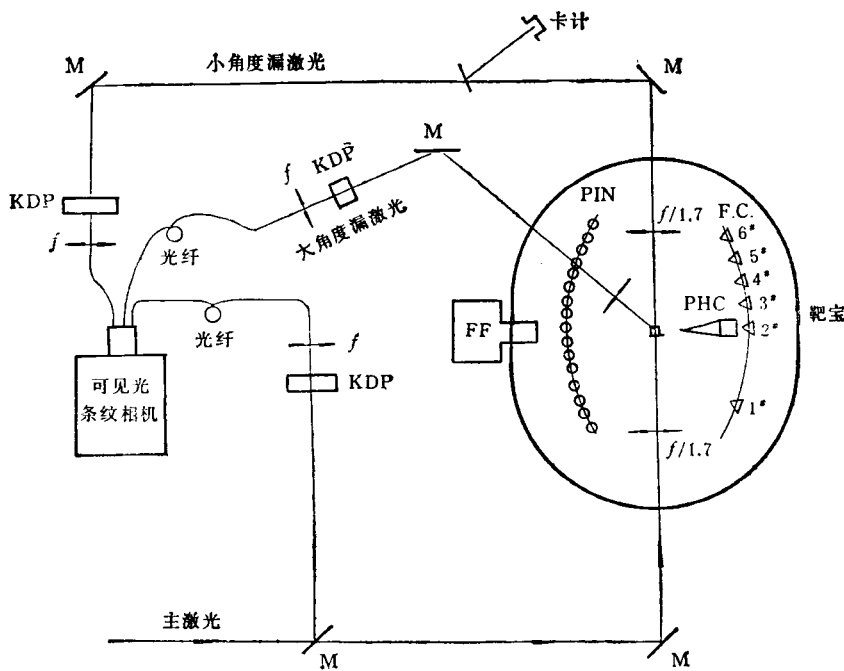


图2 总体实验布局图

PIN 为散射光探头; F.C. 为改型法拉第杯; PHC 为针孔相机

激光、快离子直接打击置于内爆区中的靶丸(并对内爆区超热电子具有抑制作用),以控制改善二维效应。通过“星光”和“神光”装置多次的分解和总体实验,我们选定的较好的辐射驱动靶

结构,如图1(a)所示。该靶形结构能够在内爆区创造一个较干净、温度较高及较均匀的辐射环境。

为了研究内爆区辐射环境物理规律,我们

对上述总体靶进行了分解,制作了图 1(b), (c), (d) 所示的源区靶和薄壁源区靶。源区靶是黑洞物理研究使用的主要靶型之一,该靶型与内含 DT 靶丸的总体靶比较,源区靶仅有激光吸收区和 X 射线转换区,靶外壳由 Au 制作,在运输口上贴有不同厚度的有机膜,可测量膜后泄漏激光量和快离子量。超热电子的观测是,通过测量超热电子与冷 Au 壁作用产生的韧致辐射——超热 X 射线来反映黑洞靶内超热电子特性的。为此,特别制作了壁厚 $\delta = 5\mu\text{m}$ 的薄壁源区靶[如图 1(c), (d) 所示],以利于超热 X 射线的观测。总体实验布局如图 2 所示。

三、诊断技术

有关的散射激光、快离子及超热电子测量探头布局均已在图 2 中示出。

1. 散射激光测量

散射光探头布局如图 2 所示。大角度散射激光量由布置在膜后的九只散射光探头测量,由角分布积分给出大角度散射激光量;打靶透镜收集的小角度散射激光量由大口径激光能量卡计进行测量;两者相加即是膜后散射激光总量。为了测准大角度散射激光量,对原散射光探头进行了重要的技术改进。在原探头前附加了严格的视场限制系统,有效地抑制了靶室内壁严重的漫反射本底信号^[4]。改进后的散射光探头结构如图 3 所示。

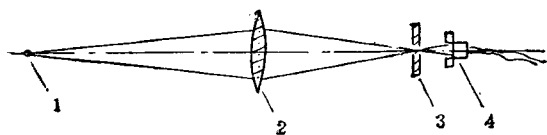


图 3 改进后的散射光探头示意图
1.靶; 2.透镜; 3.光阑; 4.硅光二极管

膜后散射激光时间特性采用 C979 可见光条纹相机进行测量,选择与主激光入射方向成 45° 角的方向表示大角度散射光,用一焦距合适的透镜收光,从靶室法兰口引出,与小角度(靶镜收集)散射光相同,经倍频后引入条纹相

物理

机,与入射激光时间关联,光路中加有干涉滤光片,消除杂散光影响。

2. 快离子测量

以往的实验表明^[5],快离子主要在源区内形成,它会通过运输口进入内爆辐射场,直接轰击 DT 靶丸,因此必须抑制进入内爆区的快离子。为了满足快离子诊断的特殊需要,对老式法拉第杯作了改进^[6],改进型法拉第杯的结构如图 4 所示。它由磁过滤器、栅网和收集杯组成,磁过滤器可使速度在 $1.12 \times 10^9 \text{cm/s}$ 以下的电子和离子实现充分分离,在收集杯上由于离子轰击而发射的二次电子几乎不可能逃出收集器的细管。改进后的法拉第杯能充分抑制收集杯的二次电子发射,并在腔发射快离子速度范围内实现电子、离子彻底分离,从而使实验测量到的信号成为单纯的离子信号,为数据的定量处理提供了较准确的实验数据。六只法拉第杯安排已在图 2 中示出,1# 测量从源区靶入口外喷的离子,2#—6# 测量膜后快离子飞行时间谱及角分布。

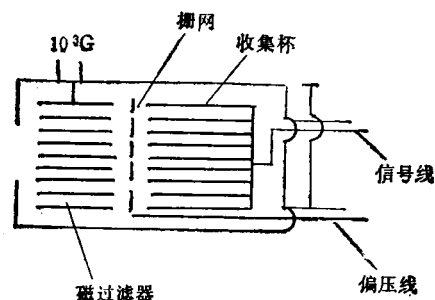


图 4 改进型法拉第杯

3. 超热电子测量

激光束-靶相互作用产生的等离子体具有较强的静电场,经静电场作用后逃逸出来的电子不能真实反映等离子体内电子的特性,通常都通过测量超热电子与腔壁冷物质相互作用产生的韧致辐射谱来间接地推断超热电子的行为。由于靶构形及实验条件限制,我们只能测量上述韧致辐射产生的 X 射线穿透腔壁后形成的腔外 X 射线谱。对通常黑洞靶 $25\mu\text{m}$ 厚的 Au 壁,不同能区的硬 X 射线穿透率差异较大^[7],为

了减少腔内外硬 X 射线谱的差异, 特意制作了壁厚仅 $5\mu\text{m}$ 的薄壁腔靶, 如图 1(c),(d) 所示. YQ-4 型靶比 YQ-3 型靶多一个内爆区, 因此如果超热电子通过输运口进入了内爆区, 它将和内爆腔腔壁作用也会发射硬 X 射线谱, 则 YQ-4 型靶硬 X 射线能量将增加, 我们试图通过实验来验证这一点.

实验中采用十道滤波荧光谱仪^[8](简称 FF 谱仪)对 1.5—300keV 连续谱进行分光测量. 该谱仪由碘化钠晶体和光电倍增管组成, 用 16 路电荷积分仪记录由不同滤片和荧光片组成的各道的“单能 X 射线”强度, 数据处理采用迭代法回推能谱^[9]. FF 谱仪在实验中的布局如图 2 所示.

此外, 我们还安排了高能针孔相机 ($\geq 10\text{keV}$) 对薄壁源区靶腔体硬 X 射线发射区域进行成像测量, 定性比较源区和内爆区硬 X 射线强弱, 从而推断出内爆区超热电子分布.

四、主要物理结果及讨论

1. 膜后散射激光

散射激光测量典型结果列于下表 1 中.

表 1 膜厚与散射激光能量关系典型测量结果

编号	膜厚 (μm)	能量 $E_{\text{入射}}$ (J)	漏激光能量 $E_{\text{漏}}$ (J)	漏失率 $E_{\text{漏}}/E_{\text{入射}}$
921029003	0	399.0	76.0	19%
921111028	0.3	622.9	12.5	2%
921105015	0.6	391.2	2.7	0.7%
921104014	1.2	478.0	5.3	1.1%
921105016	20 (Au)	429.0	4.8	1.1%

扣除本底, 膜厚为 $0.3\mu\text{m}$ 时, 进入内爆区中的散射激光不大于入射激光的 1%, 当膜厚达 $0.6\mu\text{m}$ 以上时, 膜后散射激光量与用 Au ($20\mu\text{m}$) 封底的半靶的散射激光量相近, 此时散射激光探头测量值为靶室内壁漫反射本底待号. 因此, 当膜厚大于 $0.6\mu\text{m}$ 时, 进入内爆区的散射激光为零.

内爆区散射激光时间特性典型结果如图 5 所示. 无膜时, 泄漏激光在入射光的前沿处产

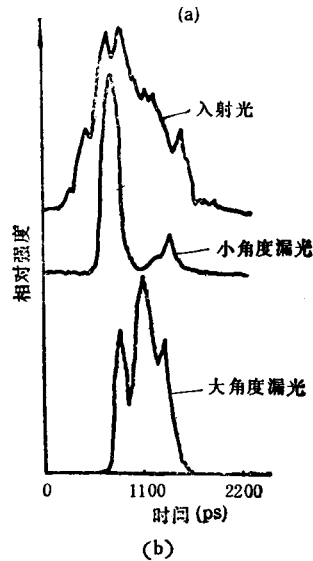
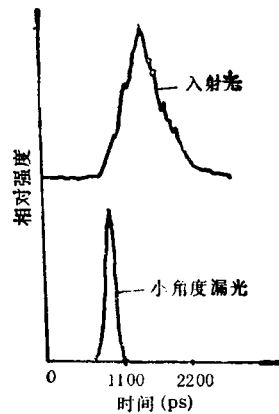


图 5 泄漏激光时间波形

(a) 无膜; (b) 有膜 ($0.36\mu\text{m}$)

生, 随膜厚增加泄漏激光出现时间推迟, 漏光时间波形都较窄, 并在有膜情况下出现多峰现象, 由此推测腔内等离子体在输运口存在着“聚芯—疏散—再聚芯—再疏散”的运动图像^[4]. 这一切为分析腔内等离子体运动图像提供了直观的依据.

2. 快离子测量

由于靶室内探头布局限制, 在膜后只布置了五只法拉第杯. 快离子测量结果表明, 源区靶膜后快离子角分布较锐, 大角度 ($70^\circ, 90^\circ$) 方位法拉第杯通常无信号输出, 因而膜后方向快离子信号角分布只有三个点, 不足以作角分布处理. 所有发次结果表明, 40° 方位探测器信号最强. 我们就以 40° 方向离子信号作为膜后快

表 2 膜后快离子数据典型测量结果

编号	膜厚 (μm)	膜厚 40° 方向快离子信号峰值点速度 $v_i(\text{cm/s})$	最大速度 $v_{\text{max}}(\text{cm/s})$	快离子能量份额 R_i
921029002	0	1.1×10^8	1.3×10^8	1
921103009	0.3	7.7×10^7	9×10^7	0.21
921104011	0.6	4×10^7	5×10^7	0.08
921104014	1.2	3.3×10^7	4.5×10^7	0.10
921105016	Au片(20)	4×10^6	8.8×10^6	0

离子信号的代表进行相对比较,了解有机膜对快离子的阻挡能力。对 40° 方向离子飞行时间谱积分,得该发次该法拉第杯收集的快离子能量 E_i , 将其与当发次总等离子体能量 E_p 相比,得因子 $R_i = E_i/E_p$ 。为了比较方便,将各发次的 R_i 以无膜时的 R_i (记为 R_0) 为 1 进行归一化, $R_i = R_i/R_0$ 。 R_i 值能直观反映出有机膜厚度对进入内爆区快离子能量的衰减度。实验所得的典型结果见表 2。统计实验结果见图 6。

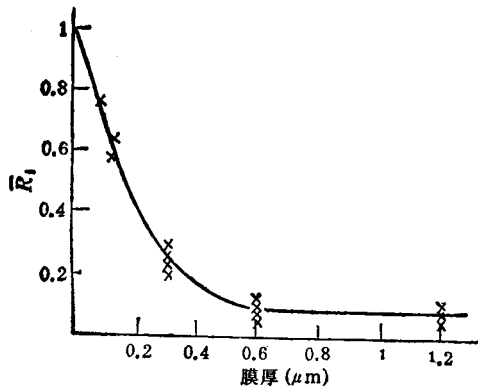


图 6 膜后快离子能量衰减度 R 与膜厚关系

实验结果表明,有机膜对进入内爆区的快离子有显著的阻挡作用。当有机膜厚度大于 $0.3 \mu\text{m}$ 时,膜后不再有速度为 10^8cm/s 以上的快离子,可将进入内爆区的快离子能量衰减至不加膜时的 20% 以下;当有机膜厚度为 $0.6 \mu\text{m}$ 时,膜后快离子平均速度降低至 $4 \times 10^7 \text{cm/s}$,总能量只有不加膜时的 10% 左右。

3. 超热电子测量

在腔靶实验中,受激拉曼散射 (SRS) 被认为是超热电子产生的主要机制。将 FF 谱仪的测量结果结合 SRS 测量结果作综合统计,统计平均值结果列于表 3 中。表 3 中 E_{SRS} 是 SRS 总

表 3 YQ-3 和 YQ-4 型靶超热 X 射线能量测量结果

靶型	E_{SRS}/I	E_{hx}/I	$E_{\text{hx}}/E_{\text{SRS}}$
YQ-3	2.89×10^{-14}	5.44×10^{-17}	1.92×10^{-3}
YQ-4	2.93×10^{-14}	6.79×10^{-17}	2.38×10^{-3}
两靶型相差	1.4%	20%	19%

能量, E_{hx} 是硬 X 射线总能量, I 是入射激光功率密度,比值 $E_{\text{hx}}/E_{\text{SRS}}$ 表示每焦耳 SRS 光能量产生硬 X 射线能量值。

从表 3 可以看出, YQ-3 与 YQ-4 型靶的 E_{SRS} 值相差不大(仅差 1.4%),由此说明 SRS 过程发生在源区。据此,我们认为超热电子也产生在源区内,并且两种靶型源区内产生的超热电子能量是一样的。而表 3 中 YQ-4 型靶的 E_{hx}/I 或 $E_{\text{hx}}/E_{\text{SRS}}$ 值均比 YQ-3 型靶大 20%, YQ-4 型比 YQ-3 型靶多一个内爆腔,说明有小部分超热电子从源区逃逸进入了内爆区与腔壁作用发射硬 X 射线谱,才导致了上述结果。表 3 说明进入内爆区中的超热电子能量占超热电子总能量的 20% 左右,大部分(约 80%)的超热电子被静电场和转换体约束在源区内。

高能针孔相机也获得了 YQ-4 型靶腔壁发射的硬 X 射线照片,由照片可见内爆腔发射的硬 X 射线谱比源区弱得多(几乎看不出内爆腔壁的发射,这里就不提供照片了),由于底片没有用高能 X 射线源标定,还无法给出源区和内爆区硬 X 射线能量的比值,只能定性看出内爆腔中的硬 X 射线能量比较小,这也说明腔靶中超热电子大部分被转换体约束在源区。

研究结果表明,在现有黑洞靶结构件下,使

用膜厚大于 $0.3\mu\text{m}$ 有机膜隔离源区和内爆区, 进入内爆区中的散射激光是个小量 ($< 10\text{J}$)。内爆区中的有害快离子得到了有效的抑制, 其速度被降至 10^8cm/s 以下, 快离子总量降至不加膜时的 20%。统计结果也表明, 80% 以上的超热电子被转换体和等离子体的静电场抑制在源区。XRD 测量结果表明, 膜厚小于 $0.6\mu\text{m}$ 时, X 射线由源区向内爆区的输运没有受到明显的影响^[1]。因此, 为增加快离子抑制效果, 可将膜厚增至 $0.6\mu\text{m}$, 此时, 进入内爆区的快离子速度被降到 $4 \times 10^7\text{cm/s}$, 快离子总能量降到不加膜时的 10% 以下。为此我们得出结论, 在长波长打靶条件下, 使用厚度适当的有机隔离膜和适当结构的转换体制作的内爆黑洞靶, 能创造一个基本干净的 X 射线辐射场。

在诊断技术方面, 正是由于对散射光探头和老式法拉第杯进行了技术改进, 才使我们较好地完成了对内爆区散射激光和快离子特性的测量。通过薄壁腔靶两种靶型的实验, 完成了

超热电子在黑洞靶中定性的空间分布特性的诊断。这些诊断技术的建立和改进, 对我国的激光 ICF 研究具有重要意义。

致谢: 感谢本所 209 室制靶人员和“神光”装置运行人员的辛勤劳动。

参加本工作的还有刘永刚、张海英、张文海、王晓东等同志。

- [1] 于敏, 惯性约束聚变展望, 中国工程物理研究院 (CAEP-HL-001), (1989).
- [2] I. B. Foldes et al., *Appl Phys.*, **B43**(1987), 117.
- [3] 郑志坚等, 惯性约束聚变与强激光技术(第二辑), 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, (1992), 1-6.
- [4] 李文洪等, 强激光与粒子束, **6-3**(1994), 待发表.
- [5] 丁永坤等, 强激光与粒子束, **4-3**(1992), 455.
- [6] 丁永坤等, 强激光与粒子束, **6-1**(1992), 85.
- [7] 祁兰英等, 强激光与粒子束, **5-3**(1993), 415.
- [8] 祁兰英等, 惯性约束聚变与强激光技术(第一辑), 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, (1990), 102.
- [9] 刘成海等, 科技学报, **1989.5**, 12.

- 1) 王红斌等, 西南核物理与化学研究所内部报告, 1992 年.

(上接第 680 页)

- [1] H. Gleiter, *Prog. Mater. Sci.*, **33**(1989), 223.
- [2] R. Birringer et al., *Phys. Rev. Lett.*, **102-4**(1984), 365.
- [3] R.W. Siegel, *Current Trends in the Physics of Materials*, World Scientific, Singapore, (1987), 275.
- [4] 张立德等, 物理, **21-3**(1992), 167.
- [5] R. Kubo, *Jpn. J. Phys. Soc.*, **17**(1962), 975.
- [6] 何宇亮, 物理, **22-7**(1993), 413.
- [7] 何宇亮等, 中国科学(A辑), No. 9(1992), 995.
- [8] Yuliang He et al., *J. Appl. Phys.*, **76-2** (1994), 797.
- [9] 何宇亮等, 半导体学报, **13-11**(1992), 683.
- [10] 何宇亮等, 物理学报, **39-11**(1990), 1796.
- [11] S. Veprek et al., *Phys. Rev. B*, **6**(1987), 3344.

- [12] D. Beeman et al., *Phys. Rev. B*, **1**(1985), 874.
- [13] 何宇亮等, 半导体学报, **15-1**(1994), 99.
- [14] M. Konuma et al., *Phil. Mag. B*, **55-3** (1987), 377.
- [15] Z. Iqbal et al., *Solid State Commu.*, **37-10**(1986), 993.
- [16] Liu Xiangna et al., *Chin. Phys. Lett.*, **10-12** (1993), 752.
- [17] 刘湘娜等, 物理学报, **42-12**(1993), 1979.
- [18] Tang Wenguo et al., *Acta Phys. Sinica*, **2-10** (1993), 776.
- [19] 郑以兵等, 南京大学学报, **30-1**(1994), 48.
- [20] H. J. Ruskin et al., *J. Non-Cryst. Solid*, **127** (1991), 114.

欢迎订阅《物理》

《物理》是中国物理学会主办的物理学方面的综合性学术期刊。其宗旨是深入浅出地介绍现代物理学及其交叉学科、前沿领域的新知识、新进展和新动态, 介绍有应用开发前景的物理学研究最新成果和物理学方面的高新技术, 介绍物理学史、物理学家和国内外学术会议动态等。读者对象包括物理学及其交叉学科的科研和教学人员, 高新技术应用开发人员, 科研管理人员以及物理专业的大学生和研究生等。

《物理》荣获中国科学院优秀期刊奖。它在按引文

数列出的 100 名中文核心期刊中名列第 18 位, 这在物理类和通报类期刊中皆名列第二。它受到世界六大检索系统中的四个所检索。

《物理》为月刊, 全年订价 36 元。科学出版社出版, 国内外公开发行。国内邮发代号为 2-805, 国外邮发代号为 M51。欢迎各有关单位及时到当地邮局订阅。

本刊编辑部地址: 北京 603 信箱《物理》编辑部。
邮政编码: 100080。电话: 2553154。