

# 靶结构对激光等离子体动量耦合系数的影响<sup>\*</sup>

郑志远<sup>1)</sup> 张 杰<sup>1)†</sup> 郝作强<sup>1)</sup> 远晓辉<sup>1)2)</sup> 张 1) 鲁 欣<sup>1)</sup> 王兆华<sup>1)</sup> 魏志义<sup>1)</sup>

1) 中国科学院物理研究所光物理重点实验室 北京 100080)

2) 中国科学院西安光机所瞬态光学国家重点实验室 西安 710068)

(2005 年 3 月 9 日收到, 2005 年 4 月 5 日收到修改稿)

强激光与靶相互作用产生的等离子体可以作为一种新型的推进源. 就强激光与靶相互作用过程中, 靶结构对激光等离子体动量耦合系数的影响进行了研究. 结果表明, 相对于无约束的平面靶, 坑靶将动量耦合系数提高了 5 倍, 而约束的平面靶将动量耦合系数提高了 10 倍以上. 分析发现, 对等离子体的有效约束是提高动量耦合系数的主要原因.

关键词: 激光等离子体, 推进, 动量耦合系数

PACC: 5250J, 5225

## 1. 引 言

激光等离子体推进是一个新颖的概念, 当激光与靶相互作用时, 随着激光能量的吸收, 在靶表面产生喷射的激光等离子体. 由于动量守恒, 在等离子体喷射的反方向会产生一个作用力, 这个力可以作为一个动力源对被作用物(靶)产生推进. 这就是激光等离子体推进的基本原理. 与目前的化学燃料推进相比, 激光等离子体推进因具有低的发射费用, 高的有效载荷比, 安全性好, 污染小等特点而日益受到人们的关注<sup>[1]</sup>. 自从上世纪 70 年代 Kantrowitz 提出激光等离子体推进的概念以来<sup>[2]</sup>, 人们进行了大量的实验研究<sup>[3-8]</sup>, 其中一个主要实验目的就是提高激光与靶之间的动量耦合系数. 目前人们对影响动量耦合系数的很多因素进行了研究. 如激光能量、激光脉宽、靶的材料等, 而对于靶的结构对动量耦合系数的影响研究较少. Azechi 等人采用一个封闭的靶结构, 通过约束激光等离子体的膨胀来提高激光与靶之间的动量耦合系数<sup>[9]</sup>. Fabbro 等人通过在靶前加入约束层, 使激光在靶面上产生的压力提高 10 倍以上<sup>[10]</sup>. 这些实验表明, 激光与靶之间的动量耦合系数是与靶的结构密切相关的, 通过靶结构的合理设计, 可以大幅度提高动量耦合系数. 本文通过激光与

平面靶、坑靶和约束平面靶的相互作用, 详细研究了靶的结构对激光等离子体动量耦合系数的影响. 并通过测量激光等离子体的荧光寿命, 定性地分析了动量耦合系数提高的原因. 分析认为, 特殊设计的靶结构可以充分约束等离子体的膨胀, 延长了等离子体与靶作用的时间, 从而提高了等离子体的动量耦合系数.

## 2. 实验方法

采用一个简单的单摆结构的装置完成了对靶动量的测量, 如图 1(a)所示. 驱动激光通过聚焦镜垂直入射到靶面上, 激光的脉宽为 7 ns, 波长为 532 nm, 重复频率为 10 Hz, 到达靶面的激光能量为 850 mJ. 为了监视靶的摆动, 一束 He-Ne 激光从靶的一侧沿靶面聚焦到另一侧的光电二极管上, 并用示波器来记录二极管的信号. 利用靶的厚度和示波器记录到的靶摆过 He-Ne 光的时间就可以获得靶受到烧蚀之后的速度, 并通过靶的质量进一步获得靶的动量. 实验中靶的材料为铝, 结构分为三种: 第一种为平面靶, 脉冲激光直接与靶面作用; 第二种为坑靶, 即在平面靶的靶面上有一个一定尺寸的坑, 脉冲激光聚焦到坑的底部; 第三种是约束的平面靶, 即在平面靶的靶前放置一层透明的玻璃作为约束层, 玻璃层的

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10390160, 10374116)和国家高技术项目联合资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jzhang@iphy.aphy.ac.cn

厚度为 2 mm, 并且是固定的, 靶面与玻璃层轻轻地靠在一起. 在激光烧蚀后, 由于玻璃层是固定的, 所以玻璃层并不随靶一起摆动. 图 1(b) 给出了激光与坑靶和约束平面靶相互作用的示意图. 为了减少约束玻璃层的损伤对实验结果的影响, 采用单发打靶模式, 每打完一发之后都更换新的靶面和新的玻璃面作为约束层.

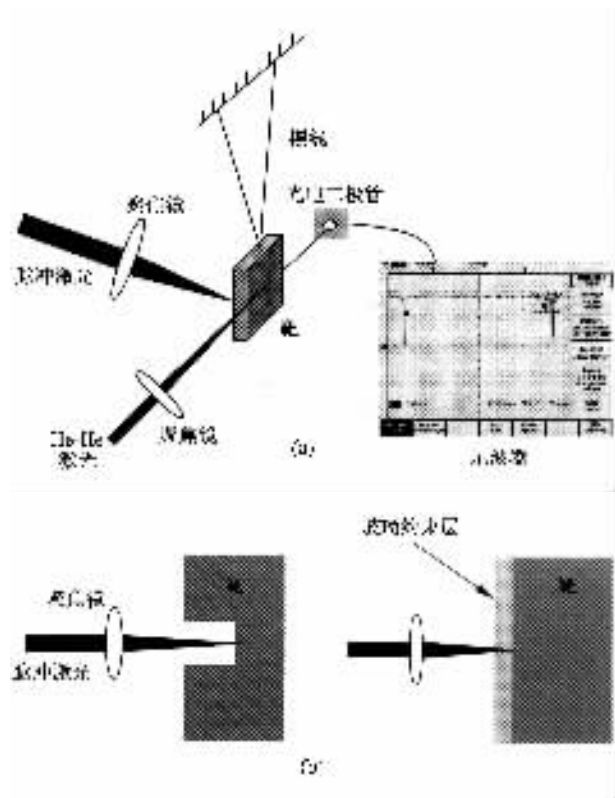


图 1 实验装置示意图 (a) 实验装置的整体布局 (b) 激光与坑靶和约束平面靶作用的示意图

在测量等离子体荧光寿命的实验中, 将等离子体的荧光通过直径为 1 mm、长度为 3 mm 的小孔收集到光电二极管上, 并将信号输出到示波器上. 为了测量坑靶内不同深度处的荧光, 在坑的侧壁留有宽度为 1 mm 的狭缝. 将收集小孔沿着狭缝移动, 便可以测得坑内不同位置处的荧光信号.

### 3. 实验结果

激光与靶在大气中相互作用时, 除了激光等离子体喷射的作用外, 靶动量的传输主要是由伴随等离子体产生的爆炸波完成的. 这使得大气中的动量耦合系数明显地高于真空中的动量耦合系数, 所以我们的实验是在大气状态下进行的. 图 2 为激光烧

蚀平面靶、坑靶和约束平面靶的动量耦合系数与激光能量的关系, 其中坑靶中坑的直径为 1 mm, 深度为 2 mm. 从图 2 中可以看出, 通过改变靶的结构可以明显地提高动量耦合系数. 相对于平面靶, 坑靶将动量耦合系数提高了 5 倍左右, 而约束的平面靶将动量耦合系数提高了 10 倍以上, 达到了 14.4 dyne·s/J.

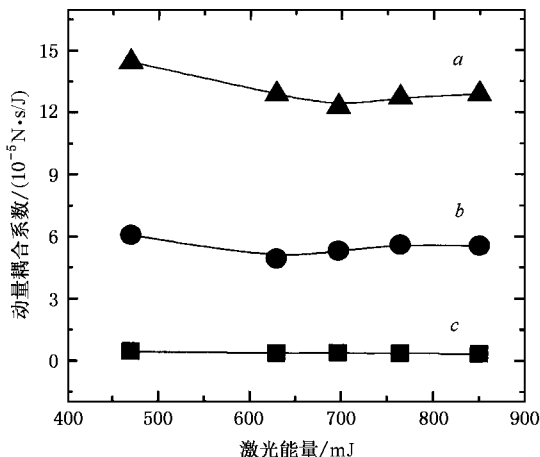


图 2 激光烧蚀约束平面靶(a)、坑靶(b)和平面靶(c)的动量耦合系数的比较(在(b)中坑的直径和深度分别为 1 mm、2 mm, 而在(c)中约束层是厚度为 2 mm 的透明玻璃)

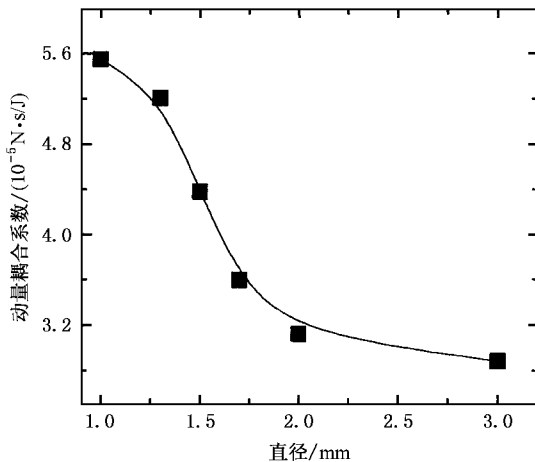


图 3 激光烧蚀坑靶时, 动量耦合系数与坑直径的关系, 其中坑的深度为 2 mm

坑靶与平面靶的不同之处在于坑靶可以约束等离子体的侧向膨胀. 通过测量不同靶坑直径下的动量耦合系数, 可以更为直接地理解坑靶对动量耦合系数的影响. 从图 3 可以看出, 对于深度确定的坑靶, 随着靶坑直径的增加, 动量耦合系数明显下降. 靶坑的直径为 1 mm 时, 动量耦合系数为 5.5 dyne·s/J;

当直径增加到 2 mm 时,动量耦合系数降为 3.1 dyne $\cdot$ s/J.随着靶坑直径的进一步增大,动量耦合系数趋于激光烧蚀平面靶.从这一点可以看出,对等离子体的侧向约束越强,动量耦合系数越高.

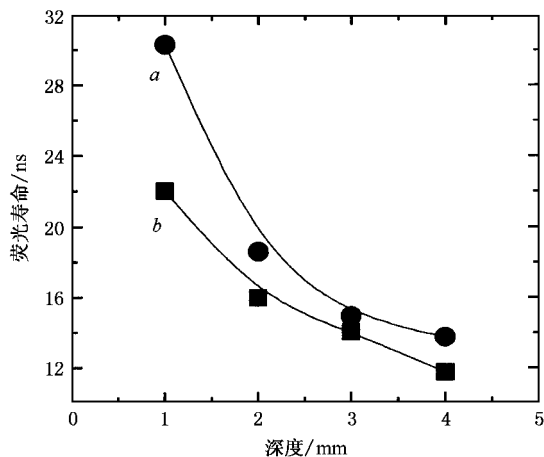


图 4 激光烧蚀坑靶中,等离子体的荧光寿命随靶坑深度的变化  
(a)坑的深度和直径分别为 4 mm, 2 mm;(b)坑的深度和直径分别为 4 mm, 3 mm(图中横坐标的 0 mm 对应于坑的底部)

和 3 mm.可以看出,直径为 2 mm 靶坑内的等离子体荧光寿命均大于直径为 3 mm 的靶坑内的荧光寿命,这与图 3 中得到的动量耦合系数随靶坑直径的增大而降低的结果是一致的.这表明,随着等离子体膨胀约束的增强,等离子体与靶相互作用的时间被延长了.同时,靶坑中不同深度处等离子体荧光的寿命也不同,其中坑底部的等离子体荧光寿命最长,达到 30 ns,而靶面处只有 13 ns.

坑靶可以实现对等离子体的侧向约束,而约束的平面靶实现了对等离子体的前向约束.从图 5 可以看出在激光烧蚀约束的平面靶时,随着约束层与靶面之间间隙的增大,等离子体的动量耦合系数呈现指数衰减.当间隙超过 2 mm 时,动量耦合系数趋于激光烧蚀平面靶.相应的等离子体荧光寿命测量结果也呈现出与动量耦合系数类似的衰减趋势,如图 6 所示.这充分证实了动量耦合系数被提高的原因之一是等离子体与靶作用的时间被延长了.与坑靶相比较,约束的平面靶更能有效地提高动量耦合系数.

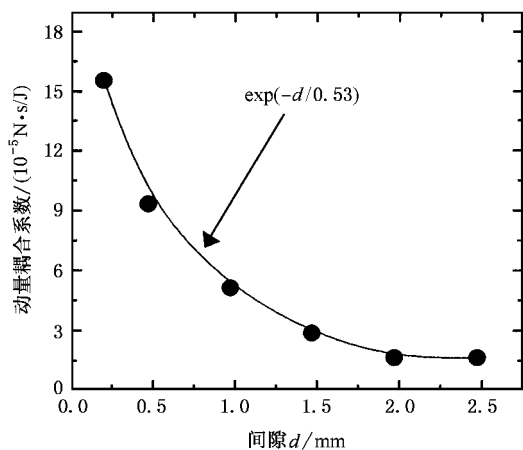


图 5 激光烧蚀约束平面靶时,动量耦合系数随约束层与靶面之间距离  $d$  的变化

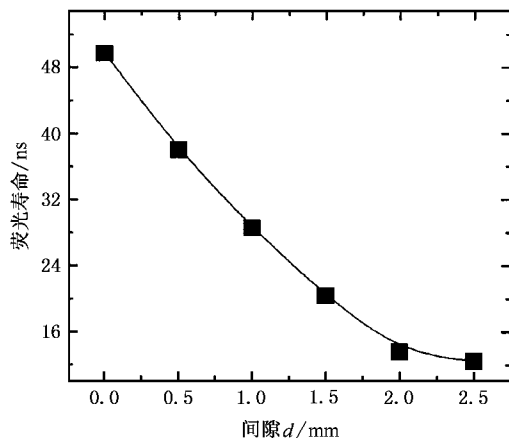


图 6 激光烧蚀约束平面靶时,等离子体的荧光寿命随约束层与靶面之间距离  $d$  的变化

一般来说,动量耦合系数的提高归结为两方面的原因:一是等离子体产生压力的增大,二是等离子体与靶作用时间的延长. Fabbro 等人已经证明了约束烧蚀可以大幅度提高等离子体产生的压力<sup>[10]</sup>.为了证实约束烧蚀中等离子体与靶相互作用时间的延长,我们测量了激光与坑靶作用过程中等离子体荧光的寿命.图 4 为激光烧蚀靶坑时坑内不同深度处的等离子体的荧光寿命(即等离子体荧光信号的半高全宽),其中靶坑的深度为 4 mm,直径分别为 2 mm

## 4. 讨 论

在激光烧蚀平面靶时,靶表面产生的等离子体可以向外自由膨胀.当激光与坑靶相互作用时,等离子体的侧向膨胀受到限制,这使得等离子体密度高于自由膨胀时的状态.由于激光脉冲的宽度较宽,脉冲的后沿与较高密度的等离子体作用,通过逆韧致吸收过程,有更多的激光能量转化为等离子体的动能.另外,靶坑内的反射光可以被坑的侧壁重新吸

收.在这种情况下,靶坑起到一定程度上的“黑体”作用,提高了激光能量的吸收.随着靶坑直径的增大,等离子体的侧向约束减弱,同时靶坑内的平均等离子体密度也随之降低,这些因素最终导致动量耦合系数的降低.当坑的直径远大于激光的焦斑尺寸时,坑靶对等离子体的约束就可以忽略,这时坑靶的约束效果相当于无约束的平面靶.

在激光烧蚀约束的平面靶中,等离子体的膨胀被固定的玻璃层所约束.等离子体的寿命在纳秒量级,而靶的摆动是一种机械运动,在毫秒量级或更长的时间内,所以当靶与约束层明显分离时,等离子体与靶的作用过程已经结束.这表明,等离子体与靶的相互作用是在一个非常狭小的空间内完成的,以至于等离子体的平均密度和温度相对较高.通过逆韧致吸收机理,更多的激光能量转化为等离子体的动能,从而产生更高的动量耦合系数.另一方面,等离子体本身在膨胀过程中遵循动量守恒,但由于约束玻璃层是固定的,所以有更多的等离子体动量转化为靶的动量.只从这一点上来说,在理想情况下,约束平面靶的动量耦合系数相对于平面靶烧蚀至少可以提高 1 倍.另外,玻璃层与靶面之间膨胀的空气进一步促进了动量耦合系数的提高.

我们认为对等离子体的约束程度决定了动量耦合系数的大小.随着约束程度的增加,激光与靶作用

的空间尺度随之变小,等离子体的平均密度和温度相应升高,这使得等离子体对激光脉冲的吸收效率大幅度提高.在靶面产生更大压力的同时,延长了等离子体与靶的作用时间.从图 4 和图 6 中测得的等离子体荧光的寿命,便可以定性地说明确等离子体与靶作用时间的延长.此外,因为等离子体的膨胀主要集中在靶法线方向很小的空间内,所以相对于坑靶的侧向约束,约束平面靶的前向约束更能有效地提高动量耦合系数.

## 5. 结 论

本文对激光与平面靶、坑靶和约束平面靶相互作用中,靶结构对动量耦合系数的影响进行了研究.实验结果表明,靶结构是影响动量耦合系数的一个重要因素,通过靶结构的合理设计,可以大幅度提高动量耦合系数.特别是在靶的前向加入一层固定的约束层,可以将动量耦合系数提高 10 多倍.其主要原因是由于合理的靶结构充分约束了等离子体的膨胀,延长等离子体与靶相互作用的时间,通过逆韧致吸收过程,等离子体吸收了更多的激光能量,从而提高了动量耦合系数.而且约束程度越高,获得的动量耦合系数也越大.

- [ 1 ] Zheng Z Y , Lu X , Zhang J 2003 *Wuli ( Physics )* **32** 533 ( in Chinese ) [ 郑志远、鲁欣、张杰 2003 物理 **32** 533 ]
- [ 2 ] Kantrowitz A 1972 *Astronautica and Aeronautica* **10** 74
- [ 3 ] Pakhomov A V , Gregory D A 2000 *AIAA J.* **38** 725
- [ 4 ] Ni X W , Zou B , Chen J P *et al* 1998 *Chin. Phys.* **2** 143
- [ 5 ] Shi B R , Long Y X , Dong J Q *et al* 2003 *Chin. Phys.* **11** 1251
- [ 6 ] Lu X , Zhang J , Li Y J 2002 *Wuli ( Physics )* **31** 796 ( in Chinese ) [ 鲁欣、张杰、李英俊 2002 物理 **31** 796 ]

- [ 7 ] Yabe T , Phipps C , Yamaguchi M *et al* 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 4318
- [ 8 ] Zheng Z Y , Lu X , Zhang J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 259 ( in Chinese ) [ 郑志远、鲁欣、张杰等 2005 物理学报 **54** 259 ]
- [ 9 ] Azechi H , Miyaguchi N , Sakabe S *et al* 1981 *Jpn. J. Appl. Phys. Part.* **20** 1A77
- [ 10 ] Fabbro R , Fournier J , Ballard P *et al* 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 775

# Effects of target configuration on the laser plasma momentum-coupling coefficient<sup>\*</sup>

Zheng Zhi-Yuan<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1)†</sup> Hao Zuo-Qiang<sup>1)</sup> Yuan Xiao-Hui<sup>1)‡)</sup> Zhang Zhe<sup>1)</sup> Lu Xin<sup>1)</sup>  
Wang Zhao-Hua<sup>1)</sup> Wei Zhi-Yi<sup>1)</sup>

1) *Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

2) *State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China*

(Received 9 March 2005; revised manuscript received 5 April 2005)

## Abstract

The plasmas generated in the laser interacting with targets can be used as a new propulsive source. In this paper, the effects of the target configuration on the laser plasma momentum-coupling coefficient are investigated. Results show that, compared with planar targets, the momentum-coupling coefficient is enhanced five times by the cavity target, and over ten times for the confined planar target. It is found that effectively confined plasma expansion is the main reason for the enhancement of the momentum-coupling coefficient.

**Keywords** : laser plasma, propulsion, momentum-coupling coefficient

**PACC** : 5250J, 5225

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10390160, 10374116) and by the National High Technology.

<sup>†</sup> E-mail : jzhang@iphy.aphy.ac.cn