

1.053 μm 激光打靶产生的二次谐波^{*}

白 波 郑 坚[†] 刘万东 俞昌旋

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230027)

蒋小华 刘慎业 郑志坚

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 919 信箱 986 分箱, 绵阳 621900)

(2000 年 8 月 23 日收到)

测量了基频激光打靶条件下不同角度的二次谐波光谱, 得到了谐波光强随发射角度的变化关系以及能量转换效率随激光强度变化的曲线. 实验现象可能与参量衰变级联造成的 Langmuir 湍流有关.

关键词: 二次谐波发射, 激光等离子体, 共振吸收, 离子声衰变不稳定性

PACC: 5225P, 5270, 5255

1 引 言

在激光与等离子体相互作用过程中, 测量二次谐波(2ω)是一种重要的诊断方法. 通过研究 2ω 散射光可以得到诸如共振吸收(RA)、离子声衰变不稳定性(IAD)以及临界面运动状态等物理信息, 了解和掌握这些信息对加深理解激光与固体靶相互作用具有参考价值.

发生在临界面附近的共振吸收和离子声衰变不稳定性产生的电子等离子体波, 通过互相耦合或与入射激光耦合, 产生出波长约为入射激光波长二分之一的散射光, 即二次谐波. 由于这两个物理过程的共同产物——电子等离子体波会通过 Landau 阻尼或波破碎产生对实现内爆不利的超热电子. 因此, 这两个物理过程在激光聚变领域得到了相当广泛的研究^[1-5]. 本文我们将仔细研究基频光打靶条件下二次谐波随发射角度的变化关系, 以及能量转换效率随激光强度变化的曲线.

2 实验装置

本实验是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的“星光 II”装置^[6]上进行的. 该激光器装置为单路钕玻璃激光器, 基频激光波长为 $\lambda_0 = 1.053$

μm , 激光器的最大输出能量为 220J, 脉宽为 700ps (半高全宽)左右. 激光由一块 F 数为 3 的透镜会聚到靶面上. 改变入射激光的能量和焦斑大小可以调节激光靶面功率密度. 实验中激光以 0° 或 45° 入射 Au 平面盘靶. 图 1 是多角度测量 2ω 散射光系统的实验安排示意图. 实验中我们使用 6 根光纤收集不同角度的散射光信号, 光纤的一端置于真空靶室内专门设计的卡座上, 收集角度分别为 $\theta = 90^\circ, 100^\circ, 110^\circ, 120^\circ, 130^\circ$ 和 140° (散射角 θ 为激光入射方向与散射方向的夹角). 光纤通过一个真空转接法兰后, 在另一端排成一条直线, 经过一个光学成像系统共同入射到一台焦长为 75 cm 的 Czerny-Turner 型光谱仪(SpectraPro-750, Acton Research)的入射狭缝上. 谱仪的入射狭缝宽度为 $10\mu\text{m}$, 光栅线数为

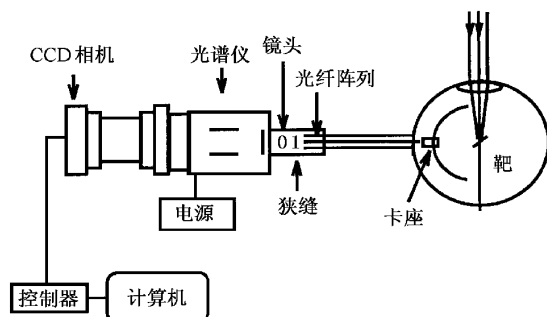


图 1 实验测量布局图

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 19735002), 国家高技术惯性约束聚变基金(批准号: 863-416-3-1.2)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: jzheng@ustc.edu.cn

12001 mm⁻¹ ,光谱信号采用电荷耦合器件即 CCD (princeton instrument) 记录. 整个光谱测量系统的波长分辨为 ±0.02 nm. 通过这样的实验安排 ,我们能够方便地测量同一发次的各个角度散射光的时间积分谱.

3 实验结果与讨论

图 2 是激光强度较低时($I_L = 1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) 时典型 2ω 谐波光谱. 实验中激光以 45° 入射到金平面靶. 从图 2 中我们可以看到 ,该光谱具有显著双峰的结构 ,其中强度较大峰的波长偏离 $\lambda_0/2$ 较少 ,左右对称性较好 ,而强度较弱的红移峰左右不对称 ,在长波方向有较大的展宽. 按照现有的理论 , 2ω 光谱中窄峰来源于共振吸收过程 :两支共振吸收产生的电子等离子体波互相耦合 ,生成没有频率偏移的散射光. 实际上临界面的运动所带来的 Doppler 效应会造成共振吸收峰的波长有所移动 ,其时间积分效应会使共振吸收峰有所展宽. 在长波方向展宽的红移峰与离子声不稳定性有关. 离子声是一种共振衰变不稳定性 ,在此过程中 ,入射激光共振衰变为一支电子等离子体波和一支离子声波 ,该过程满足频率和波矢的匹配条件

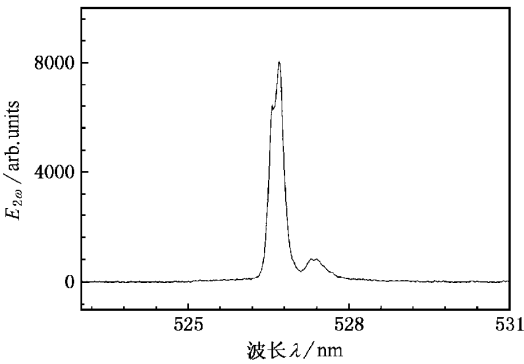


图 2 较小强度激光打靶下二次谐波发射光谱

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \omega_{\text{epw}} + \omega_{\text{ia}} \\ k_0 &= k_{\text{epw}} + k_{\text{ia}} ,\end{aligned}\tag{1}$$

式中 ω_0 (k_0) 为入射激光的频率和波数 , ω_{epw} (k_{epw}) 为电子等离子体波以及离子声波的频率和波数. 结合电磁波、电子等离子体波以及离子声波的色散关系 ,我们得到不稳定性产生的离子声波的频率

$$\omega_{\text{ia}} = \left[\frac{Zm_e}{2m_i} \left(1 - \frac{n_e}{n_c} \right) \right]^{1/2} \omega_0 ,\tag{2}$$

式中 n_e 是电子密度 , n_c 是对应于入射激光波长的临界密度. 因此由不稳定性产生的二支电子等离子体波耦合生成的 2ω 散射光的波长相对于精确的 $\lambda_0/2$ 有一个微小的移动 ,其移动量为

$$\delta\lambda = \frac{\omega_{\text{ia}}}{2\omega_0} \lambda_0 .\tag{3}$$

这正对应着图 2 中的红移峰. 将图 2 中红移峰的波长移动 0.86 nm 和 Au 等离子体平均电离度 $Z = 40$ 代入 (2) (3) 式 ,推算出不稳定性发生区域的密度为 $0.93 n_c$.

随着激光入射强度的增强 ,离子声衰变不稳定性产生的电子等离子体波的幅度也会增加 ,并会通过参量衰变不稳定性衰变为另一支电子等离子体波和离子声波 ,这样的衰变级联过程会导致 Langmuir 湍流的出现. 这些频率差约为离子声频率的电子等离子体相互耦合所产生的二次谐波光谱应该比较小强度的光谱更宽更复杂. 图 3 是所测的较大强度($2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$) 时其中一个角度的散射光谱. 此时的散射光谱主要分布在长波方向 ,由很多距离很近的分离小峰构成 ,这些小峰之间的波长间隔对应着离子声波的特征频率 ,而且湍流造成的光谱展宽淹没了共振吸收峰.

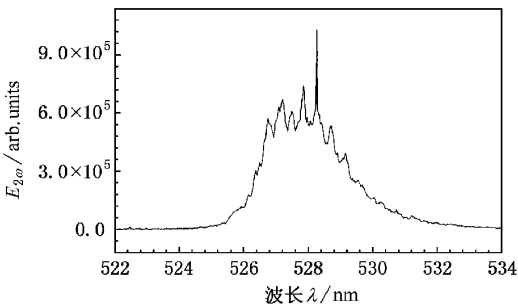


图 3 大强度激光打靶下二次谐波发射光谱

为了得到二次谐波在不同发射角度的相对强度 ,我们先将谱仪进行相对标定 ,再将谐波光谱对波长积分 ,就得到二次谐波散射光能量随散射角度的变化关系 ,如图 4 所示. 直线是其中一发实验数据的线性拟合结果. 由图 4 可以看出 ,散射光强度随散射角度的余弦呈指数衰减 ,而且随着激光功率密度增加 ,衰减有变缓的趋势. 我们认为 ,这是因为随着功率密度的增加 ,湍流不稳定性趋于饱和而逐步变得各向同性 ,致使谐波强度随散射角度的衰减趋缓.

利用散射强度的角度分布 ,对谐波光强度的角度分布进行拟合再积分得到不同入射激光强度下空

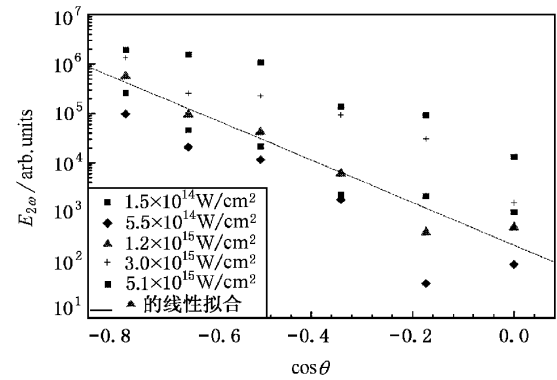


图 4 一束光滑激光照射下散射光总能量与散射角度余弦关系图(入射角为 0°)

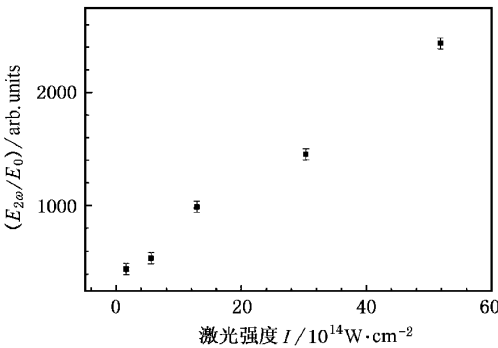


图 5 二次谐波能量转换效率与入射激光强度关系图

本文研究了二次谐波辐射与发射角度的关系。实验结果表明,当激光功率密度增大的时候,二次谐波的光谱表现为有许多小峰叠加而成的宽谱,而且小峰之间的频率间隔大致对应于离子声波频率。随着激光功率密度的增加,散射光强随发射角度衰减的趋势变缓。我们认为这两个现象是由参量衰变级联形成的 Langmuir 湍流造成的。测量同时发现二次谐波的转换效率与入射激光的功率密度之间的关系为线性增长关系。

4 结 论

[1] H. A. Baldis *et al.*, *Laser-Plasma Interactions in Handbook of Plasma Physics*, Vol. 3 (North-Holland ,Amsterdam ,1991), p. 361.

[2] N. G. Basov ,*Dense Plasma Diagnostics (High Power Laser and Particle Beams Physics ,Mianyang ,1992)*, pp. 78—88(in Chinese) [巴塞夫著 ,华欣生译 《稠密等离子体诊断学》强激光与粒子束编辑部 绵阳 ,1992) ,第 78—88 页].

[3] Z. Z. Xu *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **54**(1983) A902.

[4] C. Yamanka *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **22**(1974) ,1038.

[5] K. Tanaka ,*Phys. Fluids*, **27**(1984) 2187.

[6] B. Bai *et al.*, *High Power Laser and Particle Beams*, **12**(2000) ,451(in Chinese) [白 波等 ,强激光与粒子束 ,**12**(2000) A51].

SECOND HARMONIC LIGHT EMISSION FROM PLASMAS
PRODUCED WITH 1.053μm LASER *

BAI BO ZHENG JIAN LIU WAN-DONG YU CHANG-XUAN

(Department of Modern Physics , University of Science and Technology of China ,Hefei 230027 , China)

JIANG XIAO-HUA LIU SHEN-YE ZHENG ZHI-JIAN

(Research Center for Laser Fusion , China Academy of Engineering Physics , P. O. Box 919-986 ,Mianyang 621900 ,China)

(Received 23 August 2000)

ABSTRACT

Time-integrated spectra of second harmonic(2ω) light emission from plasmas produced with 1.053μm laser are simultaneously measured at several scattering-angles. By analyzing the relationship between scattering energy and scattering angle also by analyzing the total 2ω light intensity as a function of incident beam intensity ,we found that the Langmuir turbulence ,which is produced by cascade of parametric decay instability ,plays an important role in the laser-plasma interaction.

Keywords : second harmonic emission , laser-produced plasma , resonance absorption , ion-acoustic decay instability

PACC : 5225P , 5270 , 5255

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 19735002)and by the National High Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China(Grant No. 863-416-3-1.2).