

CNIC-01387

CAEP-0025

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

短波长激光超热电子产生和抑制机理的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PRODUCTION
AND SUPPRESSION MECHANISM OF
THE HOT ELECTRONS PRODUCED BY
SHORT WAVELENGTH LASER

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01387, CAEP-0025: 短波长激光超热电子产生和抑制机理的研究/祁兰英等著. —北京: 原子能出版社, 1999.11

ISBN 7-5022-2054-2

I. 中... II. 祁... III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 29732 号

原子能出版社出版 发行

责任编辑: 孙凤春

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 mm 1/16 印张 1/2 字数 11 千字

1999年 12 月北京第一版 1999年 12 月北京第一次印刷

印数: 1—150

定价: 5.00 元



祁兰英：1965 年 7 月毕业于哈尔滨军事工程学院爆炸物理专业。中国工程物理研究院副研究员，从事激光等离子体物理研究。

Qi Lanying: Associate professor. Graduated from Haerbin Institute of Military Engineering and Technology in 1965. Since then she has been working at China Academy of Engineering Physics majoring in the experimental studies of laser fusion in the ICF field.

CNIC-01387

CAEP-0025

短波长激光超热电子产生和抑制机理的研究

祁兰英 蒋小华 赵雪薇 李三伟
张文海 李朝光 郑志坚 丁永坤

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

介绍了在“神光 I”和“星光 II”上分别进行的二倍频、三倍频激光照射金盘靶、腔靶、碳氢有机膜平面靶的实验。通过测量硬 X 光谱推断超热电子特性, 结合受激 Raman 散射光 (SRS) 和双等离子体衰变 (TPD) 产生的 $\frac{3}{2}\omega_0$ 谐波的观测, 分析各种靶超热电子产生和抑制的机理, 并探讨了抑制超热电子的有效途径。

Experimental Studies on the Production and Suppression Mechanism of the Hot Electrons Produced by Short Wavelength Laser

(In Chinese)

QI Lanying JIANG Xiaohua ZHAO Xuewei LI Sanwei

ZHANG Wenhai LI Chaoguang ZHENG Zhijian DING Yongkun

(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

The experiments on gold-disk and hohlraum and plastic hydrocarbon (CH) film targets irradiated by laser beams with wavelength $0.35\text{ }\mu\text{m}$ (Xingguang- II) and $0.53\text{ }\mu\text{m}$ (Shenguang- I) are performed. The characteristics of hot electrons are commonly deduced from spectrum of hard X-ray. Associated with the measurement of backward SRS and $\frac{3}{2}\omega_0$, the production mechanism of hot electrons for different target type is analyzed in laser plasma with shorter wavelength. A effective way to suppress hot electrons has been found.

引言

在激光聚变研究中,为了提高靶的激光吸收效率,降低反常吸收以及抑制超热电子对靶丸预热,实现高效率内爆,研究短波长激光超热电子产生和抑制机理,并寻找抑制超热电子的有效途径,是激光惯性约束聚变(ICF)基础研究的重要课题。

通常认为激光与等离子体非线性相互作用激发的电子等离子体波是产生超热电子的主要根源。产生电子等离子体波的主要机制是:SRS: $\omega_0 \rightarrow \omega_s$ (Raman 散射光频率) + ω_{ep} (电子等离子体波频率); TPD: $\omega_0 \rightarrow \omega_{ep1} + \omega_{ep2}$; IAD (离子声衰变): $\omega_0 \rightarrow \omega_{ep} + \omega_{ia}$ (离子声波频率); RA (共振吸收): $\omega_0 \rightarrow \omega_{ep}$ 。此外,自聚焦与成丝过程可以增强各非线性过程的发展,激发更强的电子等离子体波,产生更多超热电子。大量实验证明^[1~3],在长波长(1.06 μm)、长脉宽、大尺度腔靶中,产生超热电子的主要机制是 SRS; 高强度、短脉宽、小焦斑产生超热电子的主要机制是 RA,因此超热电子的产生与激光参数和等离子体尺度有密切的关系。

1 实验条件和诊断方法

实验是在“神光 I”和“星光 II”上进行的。激光波长分别为 0.53 μm 和 0.35 μm (钕玻璃激光),相应靶面激光能量分别为 60~230 J 和 30~130 J。激光脉宽为 0.6~1.0 ns,焦斑直径分别为 $\phi 100 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$ 和 $\phi 50 \mu\text{m} \sim 200 \mu\text{m}$,打靶透镜参数分别为 f/1.7 和 f/3。实验靶型有腔靶、金盘靶和碳氢有机膜(CH膜, $d = 0.6 \sim 1.2 \mu\text{m}$)平面靶。

采用多道滤波-荧光谱仪(FFS)和多道 K 边滤波谱仪(KFS)相结合的方法,诊断激光等离子体相互作用中超热电子产生的轫致辐射谱(1.5~100 keV),由此辐射谱来推断超热电子的行为。根据我国激光倍频后激光能量低(50~230 J)的特点,我们发展了高探测效率硬 X 射线诊断技术,建立了多道 KFS^[4],探测效率可以提高 3 个数量级以上,可以实现低通量($\geq 0.1 \mu\text{J} \cdot \text{sr}^{-1}$)硬 X 射线谱(1.5~88 keV)的测量。由谱的斜率推算出超热电子温度 T_h ,由谱的积分可得到硬 X 射线总能量。根据理论计算出单位立体角超热电子转换为硬 X 射线的转换率 η ,可以推算超热电子总能量。

0.53 μm 激光产生的背向 SRS 的波长范围为 $0.53 \mu\text{m} < \lambda < 1.1 \mu\text{m}$ 。SRS 总能量采用 LPT-I 激光能量计(灵敏度为 1 μJ ,可测波长范围为 0.3~2.5 μm)测量。在诊断的光路上加波长 0.8 μm 附近的带通滤光片和若干 QB15, AB9 玻璃滤光片,过滤掉 0.53 μm 激光和少量基频光本底后,信噪比可达 3 个数量级以上,同时采用全反射铝镜代替平板玻璃,可使测量 SRS 信号增大近 20 倍。

0.35 μm 激光产生的背向 SRS 的波长范围为 $0.35 \mu\text{m} < \lambda < 0.703 \mu\text{m}$ 。采用由 CCD-1024 硅阵列探测器、0.25 m 光栅谱仪和计算机组成的光学多道分析器 OMA-2 (灵敏度为 $3 \text{ nJ} \cdot \text{cm}^{-2}$,可测波长范围为 0.4~1.1 μm ,谱分辨率为 0.4 nm)来测量背向 SRS 散射光时间积分谱。已知 SRS 谱型的宽窄与三倍频晶体产生的 0.53 μm 本底光有较大差别,可以把它们区分开,根据谱的相对强度,还可以定性地推断它们的大小。在低功率密度 ($1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2 \leq I_L \leq 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) 三倍频激光照射条件下,TPD 是 Au 盘靶产生超热电子的一个重要根源,双等离子体衰变产物为 $\frac{3}{2} \omega_0$ 谐波,其波长为 234 nm,在空气中传播距离有限,只能在靶室窗口附近收光,利用 OMA-4 (可测波长范围为 0.2~1.1 μm) 进行光谱测

量。“星光 II”靶室的实验布局示意图见图 1。

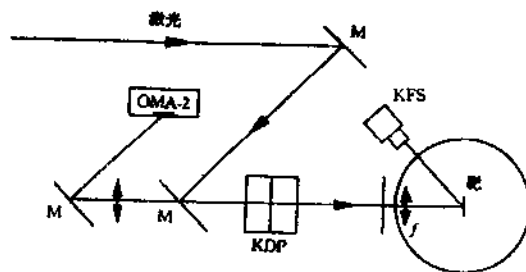


图 1 “星光 II”靶室的实验布局示意图

2 实验结果与分析

2.1 超热电子和 SRS 能量的特征

其它照射条件大致相同，不同激光波长产生的超热电子和 SRS 的特征列在表 1 和表 2 中。

表 1 不同激光波长产生的 SRS 和超热电子的比较

靶 型	$\lambda_0/\mu\text{m}$	$E_{\text{SRS}} \cdot E_L^{-1}$	$E_{\text{he}} \cdot E_L^{-1}$	T_e/keV	T_h/keV
金盘靶	1.053	4×10^{-3}	2.8×10^{-2}	3.72	13.6
	0.53	2×10^{-3}	3.1×10^{-3}	1.50	8.5
腔 靶	1.053	$(1 \sim 1.5) \times 10^{-1}$	1.8×10^{-1}		27~35
	0.53	2×10^{-2}	3.5×10^{-3}		15~20

注: E_L 为入射激光能量。

表 2 不同激光波长产生的超热电子特征的典型结果

靶 型	E_L/J	$\lambda_0/\mu\text{m}$	$E_{\text{SX}}/(\mu\text{J} \cdot \text{sr}^{-1})$	E_{he}/mJ	T_h/keV	T_e/keV
金盘靶	110	1.053	1040	3025	16.1	2.12
	86.1	0.351	6.02	30.2	7.1	1.6
金盘靶	85	1.053	480	1373	16.1	2.02
	97	0.351	4.22	24.6	6.4	1.32
腔 靶	138	0.53	38.1	1089	12.3	1.4
	125.1	0.53	31.9	742	17.4	1.5
	118	0.35	2.6	104	6.97	2.1
	89	0.35	1.02	34	7.9	1.97

由表 1 的结果可以看出：与基频光相比，采用二倍频激光照射金盘靶和腔靶，产生的超热电子份额分别减少了 1 个数量级或 1 个数量级以上，超热电子温度 T_h 和热电子温度 T_e 降低 1/2 左右，产生的 SRS 能量份额分别减少了 2 个数量级和 1 个数量级以上。由表 2 的结果同样看出：与基频光相比，采用三倍频激光照射金盘靶，产生的超热电子能量减少了 2 个数量级左右， T_h 降低 2/3 以上， T_e 也明显下降。与二倍频激光相比，三倍频激光照射腔靶产生的超热电子总能量减少了 1 个数量级以上， T_h 降低 1/2 左右。以上不同靶型的实验结果均表明：随着激光波长的减小，产生的超热电子和 SRS 总能量均呈数量级下降。因为超热电子是由非线性参量不稳定性过程激发电子等离子体波产生的，所以反常吸收份额与参量不稳定性阈值和增长率有关^[5,6]。

2.1.1 参量不稳定性阈值 I_L

对于背向 SRS ($n \ll n_c/4$) 有：

$$I_L \approx 4 \times 10^{17} (L_n \lambda_0)^{-1} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

n_e, n_c 分别为等离子体电子密度、临界面密度。

对于双等离子体衰变有:

$$I_L \approx 5 \times 10^{15} (L_n \lambda_0)^{-1} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

式中 L_n 为等离子体密度标长。由式 (1) 和 (2) 可知, 激光波长 λ_0 愈短, SRS 等主要非线性过程愈难激发, 超热电子愈难产生。

从另一角度也可得到类似的结论。电子-离子的碰撞频率 ν_{ei} 由下式表示:

$$\nu_{ei} = 8.72 \times 10^{-11} n_e Z \ln \Lambda / T_e^{3/2} \quad (3)$$

$\ln \Lambda$ 为库仑对数, 实验和理论模拟计算均表明, T_e 随 λ_0 的减小而减小, 因而 ν_{ei} 增大, 即 λ_0 愈短, 逆韧致吸收愈强 ($n_e \approx 10^{21} \lambda_0^{-2}$), 反常吸收减弱, 超热电子和 SRS 减少。

2.1.2 参量不稳定性增长率 γ_0

γ_0 可由下式表示:

$$\gamma_0 \propto \frac{1}{\omega_0} \left[\omega_{pe}^2 / \omega_{ek} (\omega_0 - \omega_{ek}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中 ω_0 和 ω_{pe} 分别为入射激光频率和等离子体频率; ω_{ek} 为电子等离子体波波数为 k 的频率。由式 (4) 可见, γ_0 随 λ_0 减短 (ω_0 增大) 而降低, 因而 SRS 和超热电子就减少。实验结果与理论分析一致, 与美国利弗莫尔实验室^[7]的实验结论也是一致的。可见三倍频可以有效地抑制超热电子。

2.2 SRS 和超热电子增强因素

利用 OMA-2 光学多道谱仪观测三倍频激光照射有膜 (CH 膜) 腔靶和无膜腔靶产生的背向 SRS 的时间积分谱示于图 2 中。

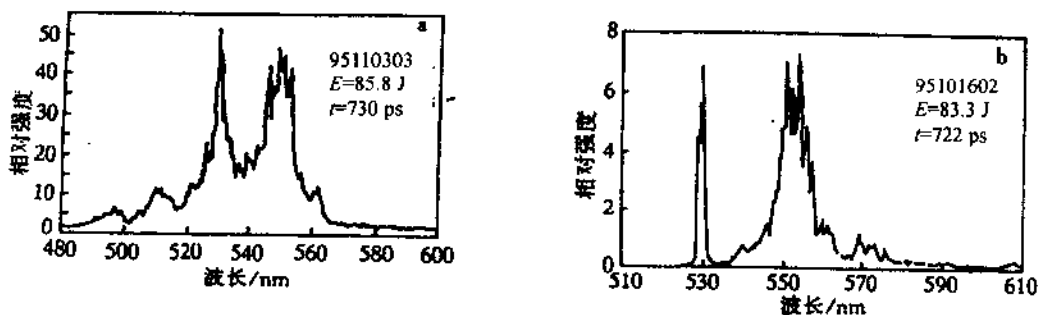


图 2 腔靶 SRS 时间积分谱
a——有膜腔靶; b——无膜腔靶。

在图 2a 和 2b 中, 左边尖窄峰是倍频晶体产生的波长为 $0.53 \mu\text{m}$ 的剩余本底光, 右边较宽的峰是 SRS 时间积分谱。我们对图 2 的 SRS 谱相对强度已作了归一化处理。比较两者可以看出, 加有 CH 膜的腔靶产生的 SRS 强度明显比无膜腔靶增强几倍; 另外, 还观测到轻材料作靶容易产生 SRS。在大致相同的照射条件下, CH 膜靶比高 Z 金盘靶产生的 SRS 和超热电子均增加一个数量级以上; 激光入射角大, 容易产生 SRS。当 40 J 激光以 45° 角入射到金盘靶上时, 能明显观测到 SRS 时间积分谱; 入射角 $\theta < 30^\circ$, 就观

察不到 SRS 谱了。以上诸方面 SRS 和超热电子增强的主要原因是由于碳氢材料作靶或在腔中加的碳氢材料是轻材料, 其形成的等离子体膨胀速度快 (离子声速 $c_s = \sqrt{ZT_e/AM_p}$), 对于 CH 轻材料, $Z=5.5$, $A=7$; 对于高 Z 金属材料, $Z=40$, $A=197$, 而 T_e 两者差不多。所以轻材料作靶或在腔中填充轻材料, 产生的等离子体密度标长 L ($L=c_s \times \tau$) 明显大于高 Z Au 材料或无膜腔靶, 使小于 $n_c/4$ 的等离子体密度的标长 L 增大; 另一种情况, 当激光以大角度入射时, 也可能使小于 $n_c/4$ 的等离子体密度的标长 L 增大, 这两方面因素均降低了产生 SRS 的阈值[见式 (1)], 因而容易激发 SRS, 致使 SRS 增强, 超热电子增多。

2.3 超热电子产生机理

在 $0.53 \mu\text{m}$ 激光照射 Au 盘靶实验中, KFS 观测到的 Au 盘靶产生硬 X 光 ($10 \sim 88 \text{ keV}$) 总能量 E_{HX} 以及 LPE-IA 型激光能量计测量的 E_{SRS} 一并表示在表 3 中。表 3 中的 E_{he} 值是由下式计算的, 即

$$E_{\text{he}} = E_{\text{HX}} / \eta \quad (\text{J}/4\pi) \quad (5)$$

式中, η 是超热电子转化为硬 X 光的转换率, 当靶厚 $d \approx 15 \mu\text{m}$, $T_e \approx 15 \text{ keV}$ 时, η 值近似取值 2×10^{-4} ; E_{HX} 是靶后 2π 空间发射硬 X 光总能量, 由理论计算给出: $E_{\text{HX}} = (\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}) E_{\text{HX}}$ (靶前 2π 空间 E_{HX} 值, 考虑了 X 光角分布修正)。

通常认为 SRS 能量主要是由激光强度 I_L 和等离子体尺度 L 决定的。当阈值较高时, I_L 起关键作用; 当 I_L 低于阈值时, 在再大尺度的等离子体中, SRS 也不会发生。因此表 3 中的结果在不离焦时的 E_{SRS} 值远大于离焦时的 E_{SRS} 值。由表 3 也明显看出, 在激光离焦和不离焦的情况下, 超热电子总能量 E_{he} 均大于 E_{SRS} , 而且大部分 E_{SRS} 值只占靶面激光能量 E_{L} 的 $1/10^5$, 因此粗略推断, 在我们的实验条件下, 波长 $0.53 \mu\text{m}$ 激光照射 Au 盘靶产生超热电子的机制 SRS 不起主要作用。由于“神光 I”靶室窗口是 K_9 玻璃, 使我们的实验无法观测 $2\omega_0$ 和 $\frac{3}{2}\omega_0$ 谐波能量, 但是由 Au 盘靶的等离子体密度标长 L 估算不稳定性过程阈值 (见表 4) 可以初步猜想。

表 3 $0.53 \mu\text{m}$ 激光照射金盘靶超热电子能量 E_{he} 和 E_{SRS} 典型结果比较

$I_L/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	E_{L}/mJ	E_{SRS}/mJ	离焦/ μm
4.7×10^{15}	≈ 377	90	0
4.5×10^{14}	≈ 91	0.81	300
5.8×10^{14}	≈ 167	2.8	340

不离焦时亚临界区域大小为焦斑大小或为声速与激光脉宽的乘积, 即 $c_s \times \tau = 10^7 \text{ cm/s} \times 1 \text{ ns} = 100 \mu\text{m}$ 。

比较表 3 和表 4 可以看出: 在激光不离焦情况下, 实际激光强度 I_L 大于 TPD 和 SRS ($n \approx n_c/4$) 阈值, 而小于 SRS ($n \ll n_c/4$) 阈值, 因此, 此时产生超热电子的主要机制可能是 TPD 和 RA, 此外还有 SRS ($n \approx n_c/4$)。在激光离焦的情况下, 使几种不稳定性阈值变得更低, 但是实际 I_L 值还是小于 SRS ($n \ll n_c/4$) 阈值, 此时, 产生超热电子可能还是 TPD 起主要作用, 此外还有 SRS ($n \approx n_c/4$)。

表 4 不稳定性阈值的估计

离焦/ μm	$L/\mu\text{m}$	TPD/ $(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	SRS ($n \ll n_c/4$) / $(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	SRS ($n \approx n_c/4$) / $(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$
0	≈ 100	1.5×10^{14}	7.5×10^{13}	7.5×10^{13}
340	≈ 240	6.3×10^{13}	3.0×10^{13}	3.0×10^{13}

0.53 μm 激光照射黑腔靶实验中, 产生的超热电子总能量 E_{he} 和受激 Raman 散射光能量 E_{SRS} 典型值分别为 390~585 mJ 和 750~969 mJ, 而且 SRS 峰值波长典型值为 $\lambda_m = 0.78 \mu\text{m}$ 。根据 Mantey-Rowe 关系式中的能量守恒方程:

$$\omega_0 = \omega_s + \omega_{\text{epw}} \quad (6)$$

式中, ω_0 , ω_s , ω_{epw} 分别为入射激光频率、SRS 频率、电子等离子体波频率, 由 $\lambda_0 = 0.53 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_{\text{SRS}} = 0.78 \mu\text{m}$ 可以得出:

$$\omega_s = 0.67 \omega_0 \quad (7)$$

并代入 (6) 式, 得到:

$$\omega_{\text{epw}} = 0.32 \omega_0 \quad (8)$$

入射光光波能量转化为 SRS 波能量和电子等离子体波能量时, 它们之间的能量分配是以频率为比例的, 即:

$$\frac{E_{\text{SRS}}}{E_{\text{epw}}} = \frac{\omega_{\text{SRS}}}{\omega_{\text{epw}}} \quad (9)$$

以式 (7) 和式 (8) 代入式 (9), 可以得到:

$$E_{\text{SRS}} = 2.1 \times E_{\text{epw}} \quad (10)$$

电子等离子体波把大部分能量交给电子, 即: $E_{\text{he}} \leq E_{\text{epw}}$ 。结合式 (10) 比较 E_{SRS} 和 E_{he} 两者的能量关系, 初步推断黑腔靶产生超热电子的主要机制是 SRS, 此外还有 TPD。

在目前“星光 II”二倍频输出激光参数条件下 ($1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2 \leq I_L \leq 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) Au 发泡盘、Au 盘靶的受激 Raman 散射基本被抑制, 观测不到 SRS 谱, 只能观测到 $\frac{3}{2} \omega_0$ 光谱 (见图 3), 实验仅仅在 EN70° 方向测到 $\frac{3}{2} \omega_0$ 的红移峰, 同时还观测到超热电子总能量约为 15~40 mJ, 国外资料^[8]介绍, 0.35 μm 激光照射实验中 TPD 的激发阈值 $\geq 1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 在 $6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 激光强度下 TPD 达到饱和, 从激发到饱和, TPD 产生的超热电子能量为 0.05~35 mJ。综合以上结果, 可以定性推断: 在 $1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2 \leq I_L \leq 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 情况下, Au 盘、Au 发泡盘产生超热电子机制是双等离子体衰变 (TPD); 在腔靶条件下, 激光等离子体受到腔体的约束, 腔内电子密度比盘靶更均匀, 使 $< n_c/4$ 区域空间等离子体密度的尺度增大, 从而增强了非线性过程的产生, 在目前“星光 II”输出参数下 ($I_L \geq 1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$), 不论什么腔靶都存在 SRS 被激发现象 (见图 2), 腔靶产生的 SRS 比 Au 盘靶增大一个数量级以上。对于 CH 膜盘靶, 不仅观测到 TPD 增强, 而且观测到 SRS 剧烈增长, 以致 OMA-4 测到的谱饱和, 不同角度方向测到的 SRS 光谱 (见图 4), 背向 SRS 增长率最大, 90° 方向最小, 因此定性推断腔靶和 CH 膜靶产生超热电子的主要机制是 SRS, 此外还有 TPD。

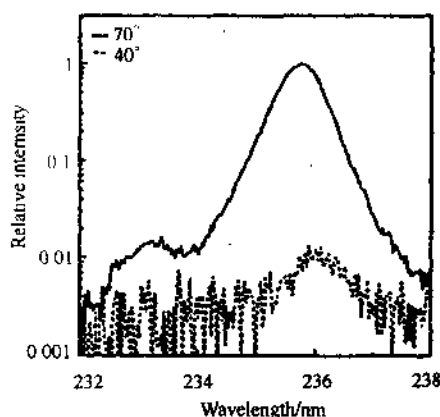


图3 盘靶 $\frac{3}{2}\omega_0$ 光谱

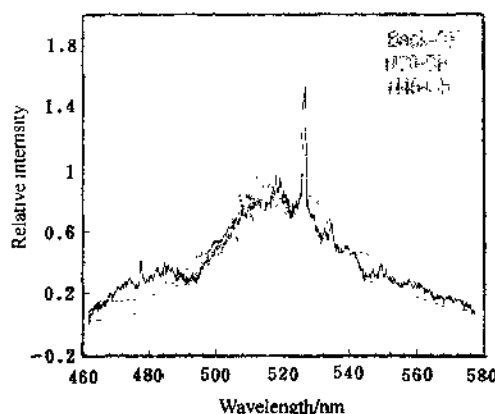


图4 SRS 的角分布

3 结束语

通过实验证明了采用短波长激光打靶具有优势,能大大提高不稳定性阈值和降低不稳定性增长率,使超热电子和 SRS 总量明显降低 1~2 个数量级, T_h 也明显下降 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$, 这表明采用短波长激光是抑制 SRS 和超热电子的有效途径。另外,实验还证明了采用轻材料 (CH 膜) 作靶或腔中加碳氢材料以及大角度激光入射,对抑制 SRS 和超热电子是不利的。

短波长 (0.53 μm)、中等脉宽、中等激光强度、小的等离子体尺度 ($L \leq 100 \mu\text{m}$) 的金盘靶中超热电子产生的主要机制可能是共振吸收 (RA) 和双等离子体衰变,当 $240 \mu\text{m} \geq L > 100 \mu\text{m}$ 时,可能主要是 TPD。在大尺度 ($L \geq 300 \mu\text{m}$) 黑腔靶中,超热电子的主要来源是 SRS ($n < n_c/4$)。三倍频、中等激光强度、小尺度激光等离子体产生超热电子的主要机制是 TPD。三倍频腔靶和 CH 膜靶产生超热电子的主要机制是 SRS,此外还有 TPD。

感谢“神光 I”和“星光 II”全体运行人员以及其他有关同志的大力协作。

参考文献

- 1 Krue W L. Phys. Fluids, 1991, B3 (8): 2360~2362
- 2 祁兰英,李三伟等. 1.053 μm 激光照射黑腔靶超热电子特性的研究. 强激光与粒子束, 1993, 5 (3): 415~424
- 3 Drake R P, Turner R E, et al. Phys. Rev. Lett., 1984, 53: 1739~1741
- 4 祁兰英,李三伟等. 用于硬 X 光诊断的 K 边滤波谱仪. 强激光与粒子束, 1995, 7 (3): 437
- 5 常铁强,张钧,张家泰等. 激光等离子体相互作用与激光聚变, 第一版. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991, 27
- 6 Krue W L. Intense Laser Plasma Interactions: from Janus to Nova. Phys. Fluids, 1991, B3 (8): 2356
- 7 Krue W L. Intense Laser Plasma Interactions: from Janus to Nova. Phys. Fluids, 1991, B3 (8): 2360
- 8 Drake R P, et al. Phys. Rev. Lett., 1989, 40 (6): 3219~3225

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-2054-2



9 787502 220549 >