

宽带与窄带激光打靶的电子温度

郭永明 倪元龙 万炳根 谷忠民 韦小春 谭维翰

(中国科学院上海光机所)

提要: 用 X 射线连续谱仪 (K 边多道法) 测定了宽频带激光打靶产生的等离子体的电子温度。结果表明, 两种带宽的激光打靶产生的热电子温度很相近 (在 420~500eV 范围内); 而宽带打靶产生的超热电子温度要比窄带打靶产生的低些。

Measurement of electron temperature of plasma irradiated by broadband and narrowband laser beams

Guo Yongming, Ni Yuanlong, Wan Binggen
Gu Zhongmin, Wei Xiaochun, Tan Weihan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: Measurement of electron temperature of laser plasma by means of K -edge filter detectors is reported. The results show that for broadband and narrowband laser irradiation the thermal electron temperature at the range of 420~500eV are quite similar, but the hot electron temperatures from 2.5 to 4.0 keV are different. The hot electron temperature for broadband laser irradiation is lower than that for narrowband laser irradiation.

20°, 功率密度为 $0.3 \sim 2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。

一、引言

在高功率激光与靶的相互作用研究中, X 光连续谱测量是一项重要的探测手段^[1,2]。在爆炸推进靶中产生很强的 X 射线辐射, 测定这些 X 射线谱可以诊断热电子和超热电子温度, 在测谱时普遍采用 K 吸收边材料作滤片来限制“通光频带”。我们用 K 边多道 X 光连续谱仪测定了宽带与窄带激光打 Al 靶和 Ta 靶的 X 辐射连续谱。窄频带谱宽 0.02 nm, 宽频带谱宽 3 nm, 激光能量 2~10 J, 脉宽 250 ps, 靶面法线与激光光轴成

二、 K 边多道探测装置

表 1 给出了 K 边探测器各道探头的参数。

透过滤片后的 X 光, 用 PIN 管或闪烁体-光电倍增管接收。PIN 管接收的 X 光能量 E 转换成电荷 Q 输出。PIN 管的能量电荷转换系数,

$$\eta_{\text{PIN}} = 0.272 (Q/J)$$

在光电倍增管作为接收装置的探头中,

收稿日期: 1986 年 5 月 6 日。

表1 各通道探头参数

通道号		1	2	3	4
滤片	材料	Al	Be	Ti	Co
	厚度	6 μm	100 μm	15 μm	24 μm
光阑		φ4	φ4	φ6	φ6
K 边能量 (keV)		1.56	2.20*	4.964	7.708
接收器		PIN	PIN	PLN	PIN

通道号		5	6	7
滤片	材料	Zn	Mo	Ag
	厚度	49.5 μm	100 μm	135.5 μm
光阑		φ6	φ1	φ2
K 边能量 (keV)		9.658	19.998	25.513
接收器		PIN	S+GDB	S+GDB**

* 透过 Be 滤片的峰值响应能量

** 闪烁体十光电倍增管

透过滤片后的 X 光由闪烁体 (CsI) 吸收。由于闪烁体很厚 (约 2mm), 可认为 X 光全部被吸收。闪烁体发出的可见光由光电倍增管放大后, 转换成电信号输出。能量电荷转换系数 (包括了闪烁体的发光效率和光电倍增管的放大率) η 值由实验标定得到:

$$\begin{aligned} \eta_6 &= 2.769 \times 10^3 (\text{C/J}) \\ \eta_7 &= 2.293 \times 10^3 (\text{C/J}) \end{aligned} \quad (2)$$

下标 6 和 7 指对应的探头道数。

探头输出的电荷再经过电荷灵敏放大器放大, 转换成电压信号在示波器上显示。

多道谱仪探头装在外径为 180 mm 的法兰盘上, 对准 540 mm 远处的靶球, 探头与靶面法线约成 45° 角。图 1 是整个测试系统的示意图。

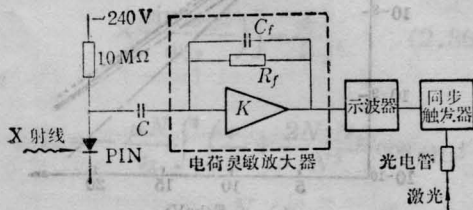


图1 探测系统结构示意图

三、数据处理

如何从实验中测得的电压值反解出 X 射线连续谱是个比较复杂的问题。我们采用文献 [3] 的 δ 函数近似法求出零级近似谱, 然后再用迭代法进行修正。

探头接收到的电荷量由下式给出:

$$Q_i = \Delta\Omega_i \cdot \eta_i \cdot \int_0^\infty R_i(E) \cdot S(E) \cdot dE \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, 7$

式中 $\Delta\Omega_i$ 是探头所张的立体角; $R_i(E)$ 是探头的响应函数, $S(E)$ 是 X 光能谱。

装有滤片的 PIN 管接收器的响应函数为:

$$R_i(E) = \exp(-\mu_1 \cdot \rho_1 \cdot d_1) \cdot \exp(-\mu_2 \cdot \rho_2 \cdot d_2) \cdot [1 - \exp(-\mu_2 \cdot \rho_2 \cdot d_3)] \quad (4)$$

式中 μ_1, ρ_1 和 d_1 分别是滤片的吸收系数、密度和厚度; μ_2, ρ_2 是 PIN 管材料硅的吸收系数和密度, d_2, d_3 分别是 PIN 管死层和灵敏区的厚度。

对于用光电倍增管作接收器的探头, 其响应函数近似为:

$$R_i(E) = \exp(-\mu_1 \rho_1 d_1) \quad (5)$$

式中符号的意义同上。

1. δ 函数近似

假定探头的响应函数近似为 δ 函数, 则 (3) 式的积分易于求出:

$$\begin{aligned} Q_i &= \Delta\Omega_i \cdot \eta_i \cdot R_i(E_i) \cdot S(E_i) \cdot \Delta E_i \\ U_i &= Q_i / C_{fl} = A_i \cdot S(E_i) \end{aligned} \quad (6)$$

这里, $A_i = \Delta\Omega_i \cdot \eta_i \cdot R_i(E_i) \cdot \Delta E_i / C_{fl}$ 。于是只要知道了 $Q_i, \Delta E_i$ 和 $R_i(E_i)$, 就可以得出在 E_i 处的能谱 $S(E_i)$ 。为求 $R_i(E_i)$, 可以假定在局部小区域内吸收系数 μ 与光子能量 E 有如下关系:

$$\mu = a \cdot E^{-b} \quad (7)$$

从文献 [4] 可得到 μ 的函数关系。在 E_i 附近求得平均吸收系数后, 再从 (4) 或 (5) 式求出 $R_i(E_i)$, 进而可求得系数 A_i (见表 2)。

表2 探头平均响应系数 $R_i(E_i)$ 和 A_i 系数

滤片	Al	Be	Ti	Co
C_{fi} (pF)	2000	1000	100	12.5
E_i (keV)	1.2	2.2	3.4	6.7
ΔE_i (keV)	0.7	1.8	3.0	5.9
$R_i(E_i)$	0.293	0.396	0.189	0.239
A_i (keV·V·Sr·J ⁻¹)	1.202×10^3	8.356×10^3	1.496×10^5	2.982×10^6

滤片	Zn	Mo	Ag
C_{fi} (pF)	3	2	2.5
E_i (keV)	8.6	16.8	22.2
ΔE_i (keV)	4.5	7.2	7.7
$R_i(E_i)$	0.189	0.141	0.156
A_i (keV·V·Sr·J ⁻¹)	7.483×10^6	3.802×10^9	1.188×10^{10}

2. 迭代法

由 δ 函数近似法可得到 7 个分立的能谱点:

$$S_i^{(0)}(E_i) = U_{oi} / A_i \quad i = 1, 2 \dots 7$$

式中 U_{oi} 为实验中测到的电压值。这 7 个分立点用最小二乘法拟合后，在单对数坐标上可得到一条 X 射线连续谱，以此作为零级近似谱 $S^{(0)}(E)$ 。而探头的响应函数由(4)、(5)式给出，再从(3)和(6)式即可得此近似谱 $S^0(E)$ 的理论电压值:

$$U_i^{(0)} = [\Delta\Omega_i \cdot \eta_i \cdot \int_0^\infty R_i(E) \cdot S^0(E) \cdot dE] / C_{fi} \quad i = 1, 2 \dots 7$$

将此电压 $U_i^{(0)}$ 与实测电压值 U_{oi} 比较，得到 7 个修正的能谱点:

$$S_i^{(1)}(E_i) = S^{(0)}(E_i) \cdot U_{oi} / U_i^{(0)} \quad i = 1, 2 \dots 7$$

重复上述过程，逐次迭代下去，可使得理论电压值向实测值逼近，经过 n 次迭代后达 $U_{oi} / U_i^{(n)} = 1 \pm 0.01$ ，得到的能谱点为:

$$S_i^{(n+1)}(E_i) = S^{(n)}(E_i) U_{oi} / U_i^{(n)} \quad i = 1, 2 \dots 7$$

它们即认为是所测值。

四、实验结果

实验中测定了窄带激光和宽带激光打 Al 靶和 Ta 靶的 X 光连续谱，取其中数据较完整的 20 次进行分析，用迭代法求得的连续谱 $S^{(n)}(E)$ 绘于图 2~图 6。图 2 是 δ 函数法

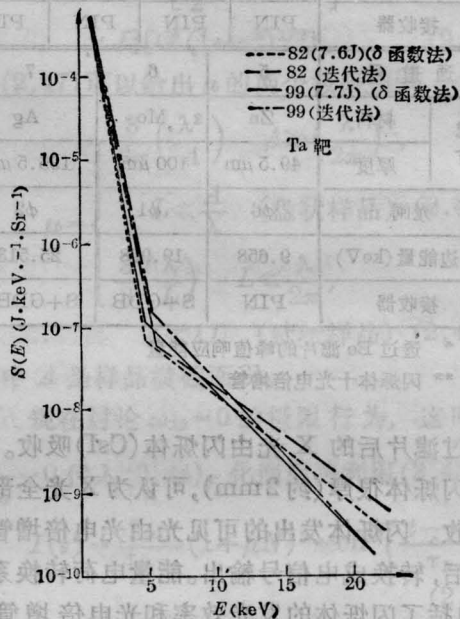


图 2

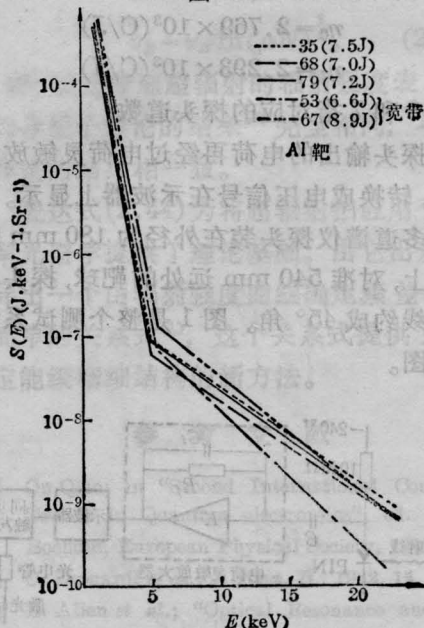


图 3

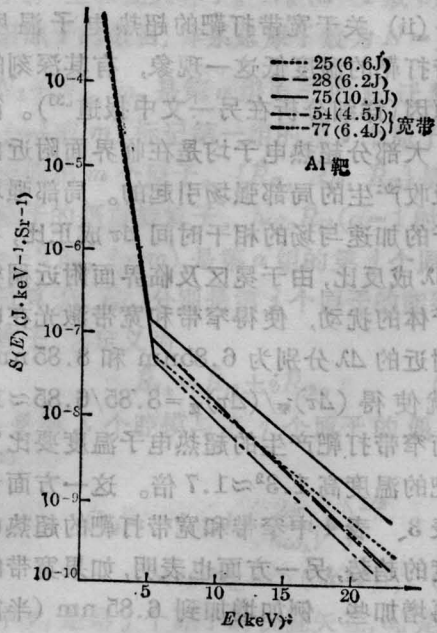


图 4

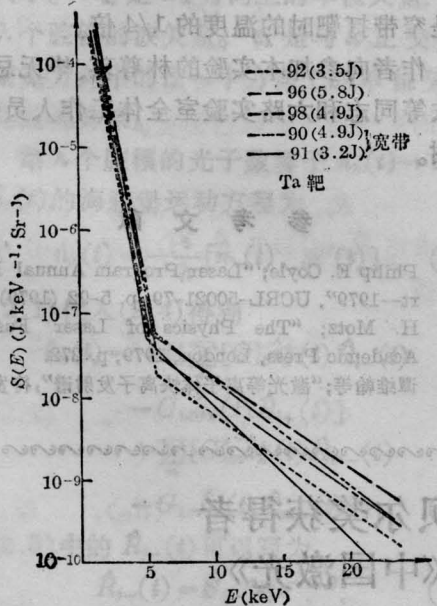


图 5

求得的谱分布 $S^0(E)$ 与迭代法求得谱分布的比较。图3~图6分别为Al靶和Ta靶的X光连续谱分布(参量见图注),热电子温度和超热电子温度列于表3和表4(电子温度测量相对误差为 $\pm 10\%$)。

表 3 Al靶的电子温度和超热电子温度

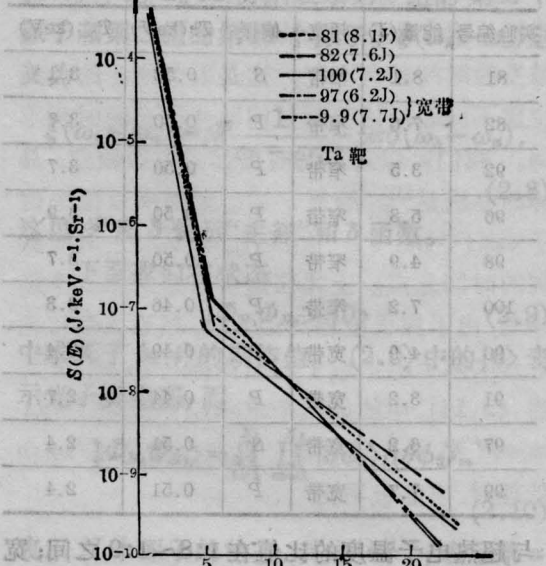


图 6

表 3 Al靶的电子温度和超热电子温度

实验编号	能量(J)	频宽	偏振	T_e (keV)	T_{hot} (keV)
25	6.5	窄带	45°	0.44	3.3
28	6.2	窄带	S	0.43	2.8
35	7.5	窄带	P	0.43	3.9
68	7.0	窄带	P	0.43	4.0
69	7.2	窄带	P	0.44	3.7
75	10.1	窄带	S	0.43	3.3
53	6.6	宽带	P	0.44	2.8
54	4.5	宽带	S	0.43	2.9
67	8.9	宽带	P	0.49	3.3
77	6.4	宽带	S	0.45	2.9

从这些图表中可以看出,激光频带宽度对热电子温度影响不大;但对超热电子温度还是有明显的影响,宽带激光打靶产生的超热电子温度低于由窄带激光打靶产生的。

激光打Al靶产生的热电子温度 ~ 430 eV,与带宽的关系不大,窄带激光打靶产生的超热电子温度 ~ 3.6 keV,热电子温度

表 4 Ta 靶的电子温度和超热电子温度

实验编号	能量(J)	频宽	偏振	$T_e(\text{keV})$	$T_{hot}(\text{keV})$
81	8.1	窄带	S	0.52	3.1
82	7.6	窄带	P	0.50	3.7
92	3.5	窄带	P	0.50	3.7
96	5.8	窄带	P	0.50	3.9
98	4.9	窄带	P	0.50	3.7
100	7.2	窄带	P	0.46	3.3
90	4.9	宽带	P	0.49	3.4
91	3.2	宽带	P	0.44	2.7
97	6.2	宽带	S	0.51	2.4
99	7.7	宽带	P	0.51	2.4

与超热电子温度的比值在 1:8~1:9 之间; 宽带激光打靶产生的超热电子温度~2.8keV, 热电子温度与超热电子温度的比值约 1:6~1:7。

激光打 Ta 靶产生的热电子温度~500eV。热电子温度与超热电子温度的比值是: 窄带时为 1:6~1:8, 宽带时为 1:5~1:7。

五、讨 论

(i) 超热电子温度分布在 2.5~4 keV 范围内, 而激光器件的功率密度 $\phi=0.3\sim 2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 按超热电子的温度 T_h 与 ϕ 的定标关系及 $T_h \sim \phi$ 的实验曲线^[2], 也得出 T_h 是处于这一范围内, 故我们所测结果是合

理的。

(ii) 关于宽带打靶的超热电子温度比窄带打靶的温度低这一现象, 有其深刻的物理原因(详细分析在另一文中报道^[3])。简言之, 大部分超热电子均是在临界面附近由共振吸收产生的局部强场引起的。局部强场对电子的加速与场的相干时间 $\Delta\tau$ 成正比, 与谱宽 $\Delta\lambda$ 成反比, 由于冕区及临界面附近稠密等离子体的扰动, 使得窄带和宽带激光在临界面附近的 $\Delta\lambda$ 分别为 6.85nm 和 8.85nm^[3], 这就使得 $(\Delta\tau)_{\text{窄}}/(\Delta\tau)_{\text{宽}}=8.85/6.85\approx 1.3$, 因而窄带打靶产生的超热电子温度要比宽带打靶的温度高 $1.3^2\approx 1.7$ 倍。这一方面说明了表 3、表 4 中窄带和宽带打靶的超热电子温度的趋势, 另一方面也表明, 如果宽带的带宽再增加些, 例如增加到 6.85 nm (半能宽度), 则在临界面附近的宽度为 $6.85+6.85=13.7 \text{ nm}$, 宽带打靶产生的超热电子温度将是窄带打靶时的温度的 1/4 倍。

作者向参加本实验的林尊琪、毕无忌、何兴法同志和六路实验室全体工作人员表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Philip E. Coyle; "Laser Program Annual Report-1979", UCRL-5002L-79, p. 5-92 (1979).
- [2] H. Motz; "The Physics of Laser Fusion", Academic Press, London, 1979, p. 272.
- [3] 谭维翰等; "激光等离子体快离子发射谱", 待发表。

美国著名科学家、诺贝尔奖获得者 布隆伯根教授访问《中国激光》

1987年5月19日, 美国著名科学家、诺贝尔奖获得者布隆伯根教授访问了《中国激光》。《中国激光》的沪区编委和中国科学院上海光机所有关领导召开了热烈的欢迎会。《中国激光》主编、中国科学院上海光机所所长王之江教授在欢迎会上向布隆伯根教授颁发了海外编委证书。1985年, 布隆伯根教授与另一位诺贝尔奖获得者肖洛共同向美国物理学

会和美国光学学会推荐全文翻译出版《中国激光》英文版, 为促进中国与世界各国的激光科学技术交流作出了贡献。

欢迎会后, 布隆伯根教授参观了上海光机所的部分实验室, 并向科技人员作了学术报告。

(群莅)