

# 激光等离子体韧致辐射及其连续谱的测量

欧阳斌 林尊琪 余加进 甘柏辉 张秉钧

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文介绍激光等离子体韧致辐射 X 光连续谱的产生和测量, 并给出了研制的韧致谱仪和测量的结果。

## Emission and measurement of Bremsstrahlung spectrum from laser-plasma

Ouyang Bin, Lin Zunqi, Yu Jiajin, Gan Baihui, Zhan Bingjun

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

**Abstract:** The emission and measurement of Bremsstrahlung spectrum from laser-plasma are discussed and the Bremsstrahlung spectrometer and the measured results are described.

### 引言

由激光产生的高温高密度等离子体发射的韧致辐射谱, 对于了解等离子体的电子、超热电子速度分布, 等离子体对激光吸收机理和靶的设计都是极为有用的。为了测量等离子体韧致辐射谱, 我们研制了 K 吸收边多道韧致辐射 X 光连续谱仪, 并在实验中取得较好的结果。

### 韧致辐射 X 光的产生

利用激光能够在极短时间内把巨大的能量灌输给靶, 使靶物质迅速离化, 产生高温高密度等离子体。这种等离子体的复杂运动产生大量的各种形式的辐射, 如中子辐射、X 光辐射、二次谐波辐射等等, 其中 X 光波段的

辐射也有称为电子的自由-自由辐射, 是最令人感兴趣的。

高温高密度等离子体的辐射中, 电子的自由-自由辐射是主要的辐射, 强度分布可以用下式给出:

$$I_{\lambda} = c \frac{n_i n_e z^2 l_c}{\lambda^2 \sqrt{KT}} \bar{g}_f \exp[-E/KT] \quad (1)$$

式中  $n_i$ 、 $n_e$  为离子、电子密度;  $\bar{g}_f$  为 Gaunt 因子;  $z$  为原子电荷数;  $\lambda$  为波长;  $l$  为等离子体范围;  $c$  为光速;  $K$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为电子温度;  $E$  为光子能量;  $C$  为常数, 等于:

$$C = \frac{32 \pi^3 e^6}{\sqrt{3} c^3 [2 \pi m]^{3/2}}$$

由式(1)知, 从谱分布曲线斜率可得到电子温度。

收稿日期: 1982年9月1日。

## 测量原理

连续谱的测量,可以用分段法测出,再得出连续谱;也可用有限个点取得谱分布值,然后再得到完整的谱。我们的谱仪是后一种形式的。其中测量点是由X光滤光片来确定的。

X光通过物质时强度发生变化,从 $I_0$ 变为 $I$ 。它与物质的厚度 $D$ 、密度 $\rho$ 有下面的关系:

$$I = I_0 e^{-\mu \rho D} \quad (2)$$

$\mu$ 为质量吸收系数,它是入射的X光波长的函数,与物质的原子壳层结构有关。在X光波长范围内,出现几个突变,称为吸收边<sup>[2]</sup>。在吸收边对应的波长处,吸收系数将随X光波长的增加而急剧减少,即透过率突然增加。也就是说,在吸收边附近X光透射强度急剧地增加。各种金属都有吸收边,它与壳层的名称相对应,分别称为K吸收边、L吸收边等,其中K吸收边最明显,不同金属的K吸收边的能量位置是不同的。

鉴于激光等离子体韧致辐射谱的特点,用多种金属的K吸收边特性作X射线的波长选择元件尤其有利,因为它是指数下降的谱分布,接近于麦克斯韦分布。这种谱分布的X射线,经K吸收边滤光片作用后,原来连续的、极宽能带的X射线谱,变为分布能带很窄的X射线,图1是其示意图。

对透过滤光片的X射线的测量方法较多,我们是用碘化铯(铯)闪烁体和光电倍增

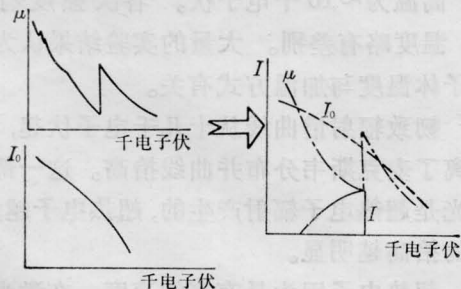


图1 K吸收边作用示意图

管GDB-14组成的系统进行测量的。X射线使闪烁体发光,由倍增管接收,在负载上获得电压。因此,连续谱的测量,就成了多个电压讯号的测量,电压讯号的测量可以借助于电子学系统。

## 实验用的韧致谱仪

我们用于实验的韧致谱仪包括探头和电子系统两大部分,见方框图2。

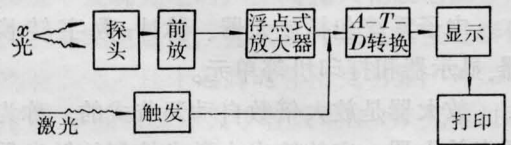


图2 方框图

### 1. 探头

探头由八个探测器组成,每个的结构如图3所示。它包括K吸收边滤光片、闪烁体、中性滤光片、光导、光电倍增管、分压器、前置放大器。元件的数值如附表。

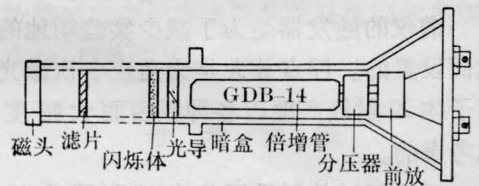


图3 探测器结构

八个探测器用的金属滤光片分别是铝、钛、铜、钼、银、铊、钽、铅。它们的厚度由公式(1)初算后,再由计算机模拟计算出最好的值,挑选各道响应函数正交性好的一组,配制八种滤光片。闪烁体厚度借用公式(2)计算,但以 $\bar{\mu}$ 、 $\bar{\rho}$ 、 $t$ 代替 $\mu$ 、 $\rho$ 、 $D$ , $\bar{\mu}\bar{\rho}$ 为按闪烁体中各元素的权重比的平均值。附表中给出的滤光片厚度为实际上使用的厚度,有些滤光片因受产品的限制,自己磨制条件较差并没有用理论计算值。闪烁体的厚度是实际探头内闪烁体厚度,闪烁体是自己磨制的,有些厚度也与理论计算有偏差。为了适应高低能区X

射线光强的巨大变化, 探头内插入了中性滤光片, 它是用 LIFORD-2 型干板曝光后制成的。它的作用是对闪烁体的光作衰减, 保证倍增管工作在线性区。光电倍增管经过两种光源(从恒定强度的光源中斩出脉冲光和毫微秒星点光源)照明下挑选的, 选出特性稳定的管子, 同时, 确定每个管子的工作电压。

前置放大器实际上是晶体管射极跟随器, 主要是起阻抗匹配作用, 把讯号送到较远地方而损失较少。

## 2. 记录用的电子系统

电子系统包括放大器、脉冲-数字转换器、显示器和打印机等单元。

放大器是放大倍数自动调节式的, 称为浮点放大器。它的输出由激光控制的触发器启动门电路后输给脉冲-数字转换单元。脉冲经过  $A-T$  转换和  $T-D$  转换后, 经显示器给出幅度值。显示器可以慢、快不同速度对各路巡回显示数字, 打印机可以自动或启动后打出各道值。放大器系统, 调整时做到打印显示值即为输入脉冲的毫伏数。

谱仪的触发器是为了减少实验场地的干扰而设置的。浮点放大是为适应各次激光等离子体 X 射线产额因各种原因而大幅度变化考虑的。

探头经过放射性同位素源和 X 光机激发荧光特征线的反复标定, 并实验测出直流-脉冲转换系数  $u = 8.13 \times 10^{-7}$  伏/千电子伏。它表示每千电子伏特 X 光能量完全被探头吸收后, 探头给出宽为  $T$ , 高为  $u$  伏特的脉冲。 $T$  为激光激发探头时输出脉宽的实际值, 实验中拍得为 1 微秒(半高宽)。

## 实验结果

用韧致谱仪, 在激光等离子体实验中测得的结果, 用计算机算出发射谱的数字解, 画出谱分布曲线(图 4)。

设韧致谱的辐射函数为  $f(\lambda)$ , 谱仪的

响应函数为  $\phi_j(\lambda) = M_j \cdot G_j \cdot e^{-\mu_j \cdot \rho_j \cdot D_j} \cdot (1 - e^{-\mu_j \rho_j \lambda})$ , 下标  $j$  表示第  $j$  道的响应函数,  $M_j$  为第  $j$  道的包括倍增系数在内的灵敏度因子,  $G_j$  为第  $j$  道的包括收集效率有关的因子, 其余同前。探头输出脉冲为  $Y_j$ , 则:

$$Y_j = \int \phi_j(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, 8.$$

用计算机的数字解, 从积分号内解出  $f(\lambda)$  的值和电子温度。用计算值作曲线(图 4)。

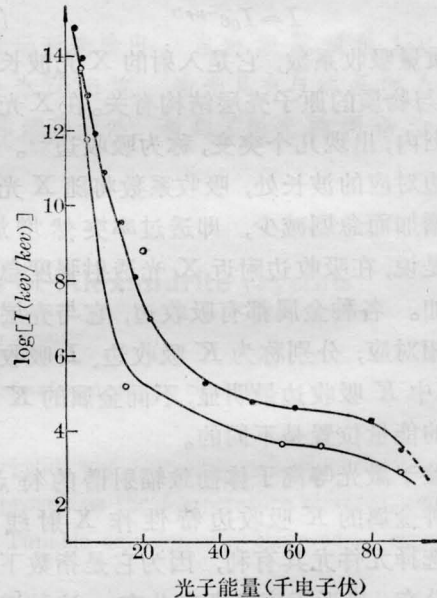


图 4 激光等离子体韧致辐射谱

实验中用的激光功率每路约  $4 \times 10^{10}$  瓦, 脉宽约 1 毫微秒, 双向照明靶丸方式。靶室真空度约  $10^{-4}$  托。曲线的斜率是电子温度。各种靶材的温度都差不多, 低温为 500 电子伏, 高温为  $\sim 10$  千电子伏。各次强度有差异, 温度略有差别。大量的实验结果认为等离子体温度与加温方式有关。

韧致辐射谱曲线从十几千电子伏起, 就偏离了麦克斯韦分布并曲线抬高。这一部分 X 光是超热电子辐射产生的, 超热电子越多, 谱的抬高越明显。

超热电子因为具有高的速度, 在激光加热时, 它的存在将使靶的内层先加热, 这种预



加热对于聚爆压缩是不利的, 因此设计各种靶时, 超热电子的影响应该注意。在加热中, 由于超过  $10^6$  K 的情况下, 等离子体中的 X

射线带走大量的能量而造成冷却。

本工作的参加者还有曹金洲、周锦智、戚小妹、陆海鹤等。

附表

道序		1	2	3	4	5	6	7	8
	元素	Al	Ti	Cu	Mo	Ag	Er	Ta	Pb
滤光片	K 边位置(千电子伏)	1.56	4.96	8.98	20.0	25.5	27.5	67.4	88.0
	厚度(微米)	36	28	36	70	105	210	195	620
闪烁体	碘化铯(铯)厚(毫米)	0.4	0.6	0.6	0.8	2.5	2.5	2.5	5
中性滤片	衰减倍数	$2 \times 10^4$	$10^4$	$5 \times 10^2$	25	5	1	1	1
实验值 (毫伏)	CD <sub>2</sub> 靶 $\phi$ 100 微米	1167	1162	1438	558	430	818	160	487
	CD <sub>2</sub> 靶 $\phi$ 100 微米	1126	1030	1058	310	258	636	146	175
	充气玻壳	1450	1280	1150	380	160	350	750	230
	充气玻壳	1150	560	305	380	320	875	500	230

参 考 文 献

[1] R. C. Elton, A. D. Anderson; Calculations Useful in the Determination of Temperature From X-Ray

Continuum Radiation Emitted High Temperature Plasmas, 1967, Naval Research Laboratory.

[2] A. N. 季达依哥罗茨基; “X 射线结构分析”, 科学出版社, 1958 年。



## 用“频带选通谐振腔”获得宽频带激光输出

增加高功率激光的光谱带宽, 不仅有利于等离子体的吸收, 提高布里渊散射的阈值, 改善靶的照明均匀性, 防止热斑和超热电子的产生; 更为重要的是, 在发展 Nd 玻璃高功率激光系统中, 宽带激光的相干性下降, 并可以消除高级 Fresnel 衍射, 抑制自聚焦的增长, 因而有可能大大地提高激光系统的输出容量。

我们使用“频带选通谐振腔”技术, 在 Nd 玻璃激光系统中成功地获得  $100\text{\AA}$  以上的宽带激光输出。所谓“频带选通腔”是采用一种类似于宽带干涉滤光片的反馈腔膜组成谐振腔, 它压制中心波长光子数的增殖, 提升旁带的光子密度, 使得在足够宽的频带范围内, 各种纵模同时进入振荡。这种方法产生宽带激光比用等离子体滤波的方法方便得多, 目前尚未见报导。

我们实验中使用的选通腔板对 1.058 微米的透过率 57.7%, 而在 1.065 微米和 1.050 微米处的透

过率分别下降到 38.8% 及 37.3%; 这是根据国产硅酸盐 Nd 玻璃的荧光光谱特性进行设计的。实验中可以使用折迭式腔使光束与选通腔板作用两次而进一步提高选通的效果。

宽带激光振荡器的输出特性如下: 带宽  $100\text{\AA}$ ; 中心波长 1.060~1.063 微米; 脉冲能量 0.5 焦耳; 脉冲宽度 70 毫微秒。示波照相表明, 由于它包含的纵模数量很大, 模式相干的结果使脉冲的时间过程变得比较光滑。此外, 我们还进一步观察到这种宽带激光对消除相干条纹和 Fresnel 衍射方面的效果是明显的。

关于宽带激光的放大与传输特性的研究工作正在进行中。

(中国科学院上海光机所 余文炎 郑玉霞  
梅 广 冷珍美 1983 年 7 月 20 日收稿)