

激光等离子体低能 X 光辐射的研究与探测

欧阳斌 余加进 陆海鹤

(中国科学院上海光机所)

李弘毅

(美国, 洛斯·阿拉莫斯国家实验室)

提要: 本文讨论激光等离子体低能 X 光辐射机理及其测试问题。**Study of super-soft X-ray emission from laser plasma**

Ouyang Bin, Yu Jiajin, Lu Haihe

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

P. H. Y. Lee

(Los Alamos National Lab., USA)

Abstract: The emission and detection of super-soft X-ray from laser produced plasma are discussed.

引言

高功率激光加热各种靶产生的激光等离子体出现各种不同的辐射。这些辐射的出现与消失正是等离子体存在的表现, 而等离子体的特性也正是从测量这些不同辐射中得知的。X 光是最令人感兴趣的辐射之一。

等离子体的低能 X 光辐射

随着激光巨大脉冲能量向靶面灌输, 靶材从表面, 然后逐步深入地离化。先离化的离子、电子又参加正在进行的激光与靶的相互作用, 继续产生等离子体。等离子体的密度梯度温度梯度不为零, 必存在碰撞扩散等复杂的运动。在复杂的运动中, 电子受到

电场磁场作用, 其速度发生变化。根据经典理论知道, 它必然有一种辐射, 它的辐射功率量子力学表达式为:

$$U_{rte} = \frac{N_e \cdot N_i \cdot n \cdot Z_c^2 6}{3\sqrt{6\pi^3} \cdot \epsilon^3 C^3 \sqrt{m^3}} \times \frac{\bar{g}}{\sqrt{KT_e}} \exp\left[-\frac{hf}{KT_e}\right] \quad (1)$$

式中 Z 为原子序数, \bar{g} 为岗特因子, n 为折射率, ϵ_0 为介电常数, m 为电子质量, $N_e \cdot N_i$ 为电子离子密度, e 为电子电荷。

式(1)给出电子运动因速度发生变化时向空间辐射的一种电磁波的功率。这种辐射称为轫致辐射。

另外, 除上述辐射外, 高密度的离子中的正负离子相互碰撞而出现复合, 伴随这过程的辐射称为复合辐射, 其辐射功率由下

收稿日期: 1985年10月18日。

式描述:

$$U_{nfTe} = \frac{e^{10} \cdot N_i \cdot N_e}{12 \pi \sqrt{6 \pi C^3 m^{13} \epsilon_0^{15}}} \times Z^4 \frac{\bar{g}}{n^3 \sqrt{KT_e^3}} \exp\left[-\frac{hf - |E_i|}{KT_e}\right] \quad (2)$$

这种辐射与复合能级 E_i 有关。

比较式(1)、(2)可知,对于高温等离子体,如激光产生的等离子体, KT_e 值较大,其辐射主要来自韧致辐射,而且在低能区里更可观,更令人感兴趣,便于探测。

低能 X 光的测量原理

低能 X 光的测量,用常规 X 光测量方法是不利的,我们采用下述方法。当 X 光入射到金属材料上时,其电子受到激发,能量大于脱出功的电子,射入空间。能量一定的 X 光光子,打出的光电子数也是确定的。测量光电子数,便实现了对 X 光的测量。

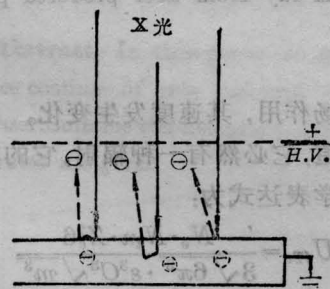


图1 探测原理

图1是这种测量的示意图。X光透过网状阳极入射到金属材料上,产生的光电子云被强电场拉到阳极,由网状阳极收集。这种结构是人们所熟悉的“二极管”,但只适于X光波段。

阴极材料是镍的二极管,其对X光灵敏度曲线如图2所示。纵坐标为灵敏度(单位pC,横坐标为光子能量(单位为keV)。由图可见,低能区比高能区的灵敏度高1~2个量级。

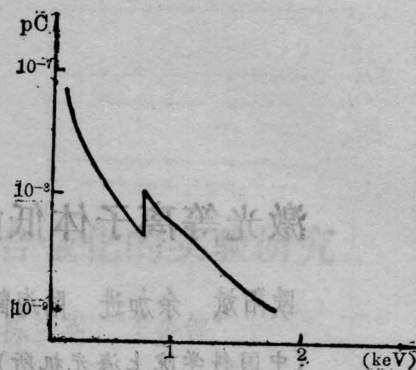


图2 镍阴极二极管灵敏度曲线

实验与结果分析

据上述原理,我们研制了适合于几百至一千多电子伏的X光测量装置,称为Y、Q、探测器,示于图3。

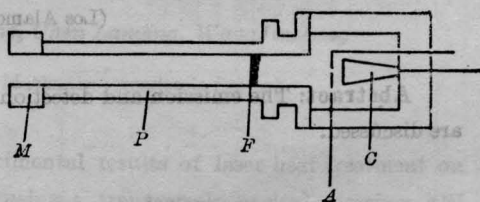


图3 Y、Q、探测器示意图

M—磁头;P—准直管;A—阳极;C—阴极

图中磁头M是永磁体,场强为500Gs;准直管P是30cm的紫铜管;滤片F是铝材料制的薄膜,厚 $2\mu\text{m}$;阳极A是透过率很高的铜网,带有2.5kV工作电压;阴极C是镍材料制成的锥形电信号引出极。

用这一探测装置做了多次实验,都得到理想的结果。实验装置及探测器的相对位置如图4所示。激光器的输出功率 10^9W ,由非球面透镜聚焦到靶上。与激光束成 50° 角的方位上安放Y、Q、探测器,它的输出由千兆周示波器记录。Y、Q、探测器工作电压可以在2.5~2.7kV范围选定。

脉冲激光束入射到靶T上产生等离子体,等离子体辐射的X光被 50° 方位安放

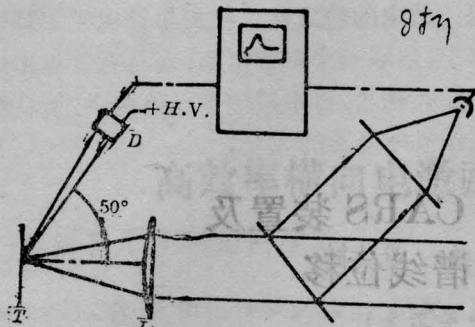


图4 实验装置图

T—靶; L—透镜 D—Y、Q 探测装置

的探测器 D 接收,它给出 X 光脉冲信号。

图5给出三张实验中得到的示波器照片。由 Y.Q. 结构原理探头给出的信号是由下述因素决定的低能 X 光信号:

1. 磁头和滤片把某些带电粒子去掉,防止它们进入 Y.Q. 造成假信号,就是说,只有 X 光进入探测器产生信号。

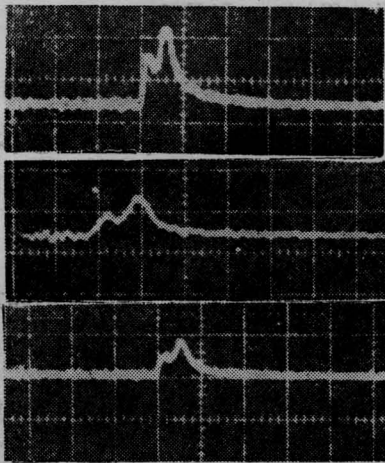


图5 典型的波形图

(上) 金靶 (中) 钼靶 (下) 碳靶
垂直 50V/div 垂直 50V/div 垂直 10V/div
水平 10ns/div 水平 5ns/div 水平 10ns/div

2. 滤片是 $2\mu\text{m}$ 厚的铝箔, 它的透过率曲线如图6所示^[1], 纵坐标为 X 光光子能量。可见在低能区, 能量为 $700\text{eV}\sim 1.5\text{keV}$ 的 X 光光子有最大透过。

3. 综合透过率曲线与镍阴极的响应灵敏度曲线, 便可计算得到探测器的灵敏度依赖能量的关系曲线, 示于图7。纵坐标为探

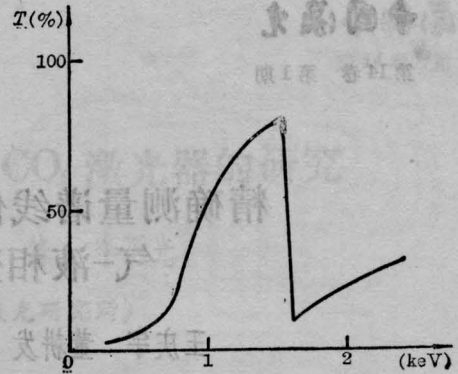


图6 滤片透过率曲线

材料铝; 厚度 $2\mu\text{m}$

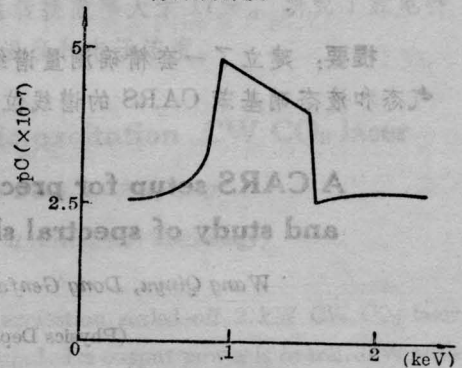


图7 探头响应灵敏度曲线

头的响应灵敏度, 横坐标为 X 光光子能量。

图5表示不同的靶材在能量相近的激光脉冲(双脉冲)辐照下, 产生的 X 光有极大的差异。我们用低 Z 碳靶、高 Z 金靶及居于其中的钼靶, 获得不同的 X 光波形。下面简单分析说明波形幅度是 X 光产额的直接表示。

设 X 光以总能量 W 入射到探测器上。又设每个光子的平均能量为 E , 则光子数为 N 时有关系式 $W = NE$ 。在这些能量作用下, 获得 n 个光电子, 对应的电流在示波器输入端电阻为 $R = 50\Omega$ 上产生电压 V , 即

$$V = \eta n e R / t$$

η 为光电子的收集效率, e 为电子电荷, t 为脉冲波形宽。在选定的阴极材料情况下有:

$$V = \eta R e N E \phi / t \quad (3)$$

其中 ϕ 为转换效率。所以波形的幅度表示了 X 光产额, 或光子数。比较图5波形, 参

(下转第 23 页)

距屏幕为 $|R|$ 的物点由屏幕所形成的象斑尺寸可写为:

$$\Delta x(R) = \frac{|R|}{R_I} \max_{[x_1, x_2]} \{ \delta_x(x_{00}, x_1) - \delta_x(x_{00}, x_2) \} \quad (14)$$

我们可以按等式(2)和(3)求得列于表1的全息屏幕在不同成象范围上的象差 δ_x 、 δ_y 值。图5为屏幕的象差曲线。

表1 全息屏幕不同成象范围上的象差值

屏幕成象范围 $x(y)$, (mm)	δ_x (mm)	δ_y (mm)
-150	-14.10	60.90
-100	-5.60	27.40
-50	-1.50	8.50
0	0	0
50	-10.00	-1.90
100	-34.00	-0.30
150	-74.00	0.60

屏幕在最大成象范围($x_1 = -150$ mm, $x_2 = 150$ mm)成象时的弥散斑尺寸可由(14)式求得:

$$\begin{aligned} \Delta x(R) &= \frac{|R_c|}{R_I} \max_{[x_1, x_2]} \{ \delta_{x1} - \delta_{x2} \} \\ &= \frac{1.64}{3.31} [-0.0744 \\ &\quad - (-0.0141)] = -0.0293\text{m} \end{aligned}$$

所以,若投影物镜出瞳尺寸 $2b_x \times 2b_y = 100 \times 100$ 时,由(12)式求得有效视觉区域尺寸为:

(上接第15页)

考式(1)、(2)可以推断, Y. Q. 探测的 X 光是等离子体的韧致辐射,并非复合辐射。因为波形的幅度比远远不符合于式(2)中的 Z 的四次方关系。

应该说明,示波图给出的电压变化,并不能由上式(3)所能表示,只是为了简单分析起见才用它。探头的时间响应函数还得另外推算,本文从略。但 X 光产额依赖于原子序数 Z 的关系是选择靶材的依据,根据这点可以

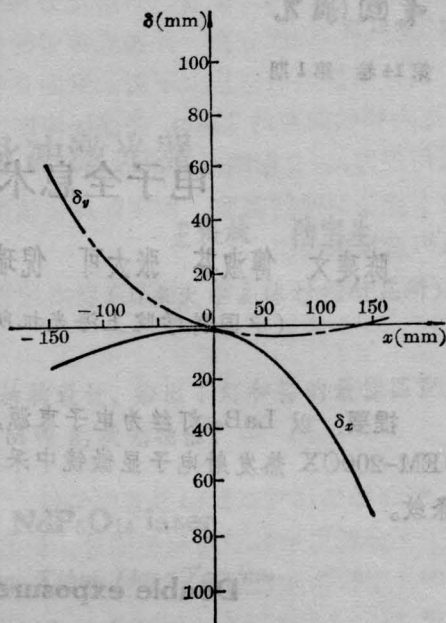


图5 全息屏幕的象差曲线

$$d_{v\text{有效}} = 2b_x(R_I/|R_c|) - \Delta x = 172\text{ mm}$$

我们曾按测量视觉区域平面上的不变照度范围来确定有效视觉区域的尺寸,证明上述结果与实验相一致。

参考文献

- [1] 徐昆贤;《仪器仪表学报》,1983, 4, No. 4, 357.
- [2] 徐昆贤;《中国激光》,1983, 10, No. 6, 362.
- [3] E. B. Champagne; *JOSA*, 1967, 57, 51.
- [4] Г. Н. Буйнов и др.; *Опт. и спектр.*, 1973, 34, No. 4, 768~774.
- [5] J. L. Rayces; *Optica Acta*, 1964, 11, 85.

选择各种原子序数的材料,去做特殊目的的实验。

本工作得到邓扬铭、徐至展同志的关心,实验中得到殷光裕同志实验组的大力支持,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Eugene P. Bertin; "Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis", Second Edition, Plenum Press New York, London, 1975.