

激光等离子体实验中测量离子 和 X 射线的能量计

林康春 林尊琪 张洪林 刘 僊
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文叙述了离子和 X 射线能量计的原理、结构及其定标特性。在激光等离子体实验中得到了一些结果,并作了分析和讨论。

一、引 言

在激光等离子体实验中,被靶吸收的入射激光能量主要是转变成离子和 X 射线再发射;没有被靶吸收的入射激光能量将形成散射(反射)光。精确测定靶吸收能量及研究靶发射特性是激光等离子体实验的重要课题。测量离子的能量可用法拉弟筒、离子谱仪等;测量 X 射线的能量可用 PIN 二极管、K 边多道谱仪、热释光剂量仪等。但采用这些仪器测量,有的需要同位素源来定标;有的需要测量光谱分布求积的方法得出总能量。因此,只能作相对测量。我们研制的离子和 X 射线能量计与监测打靶激光束能量的激光能量计^[1]可以采用电加热的方法统一定标,实现离子总能量和 X 射线剂量的绝对测量。而且探头本身具有对粒子电荷态不敏感,线性响应及抗电磁干扰能力强等优点,使其在激光等离子体实验中成为强有力的诊断工具^[2~4]。

激光等离子体实验中,发射离子和 X 射线的同时,也伴随着产生电子和中子,但在目前的实验条件下,电子和中子通量相对于离子和 X 射线通量可以忽略不计。所以,激光等离子体实验中靶吸收效率取决于发射的离子和 X 射线能量总和与打靶激光能量的比值。

二、原理和结构、定标测试

1. 原理和结构

离子和 X 射线能量计的原理是基于热力学定律。吸收体接收被测信号能量后,在瞬时温升的同时,又通过传导或辐射而损失能量。当热交换很小时(即满足准绝热条件时),吸收体的温度变化 $T(t)$ 遵从牛顿冷却定律:

$$dT/dt = -K(T - T_{\infty}), \quad (1)$$

其中 K 为热交换系数, T_{∞} 为环境温度。吸收体的温升与输入能量有下式关系:

$$Q = cm \Delta T, \quad (2)$$

其中 c 为吸收体比热, m 为吸收体质量。激光等离子体实验时, 吸收体接收被测信号能量产生的温升与电定标时所施电能产生的温升相比较。

我们研制的离子和 X 射线能量计的结构如图 1 所示。图中 1 是窗口, 2 是吸收体, 3 是加热器, 4 是铜导热体, 5 是热电堆, 6 是铝基块, 7 是绝缘体, 8 是外壳。离子能量计用铝作吸收体有较高的吸收效率^[5,6]。光学抛光的铝表面对 $1.06\mu\text{m}$ 光的反射率可达 92% 左右^[4]。离子能量计采用差分结构, 其中开窗口的圆盘为离子接收盘, 用光学玻璃作窗口的圆盘为补偿盘。

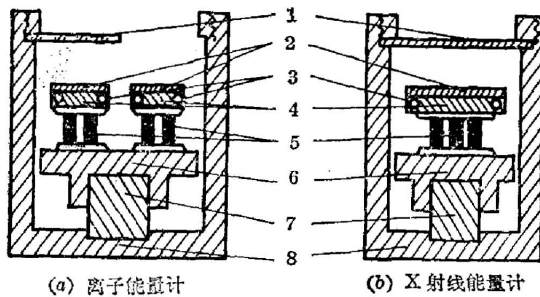


图 1 能量计结构图

Fig. 1 Structure of the calorimeter

(a) ion calorimeter (b) X-ray calorimeter

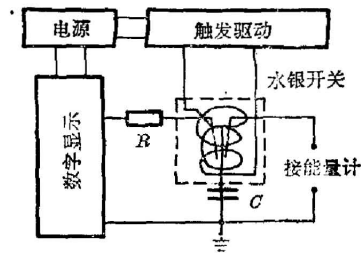


图 2 定标器原理图

Fig. 2 Block diagram of calibrator

X 射线能量计用钽箔作吸收体, 并认为它对 X 射线是全吸收的, 用铍箔作窗口。漆色卡玛丝双线并绕在导热体边缘的凹槽内^[4] 作电加热绝对标定用。

2. 定标测试

定标器的工作原理如图 2 所示。定标器输入能量计的电能按下式计算:

$$E = \frac{1}{2} CV^2, \tag{3}$$

其中 C 为电容, V 为电压。由于采用了接触电阻小 ($<0.001\Omega$) 且为恒定值的水银开关, 其定标精度比采用导电电阻不是一个常量的可控硅开关高^[4]。水银开关的启动线圈采用单稳态脉冲同步电路控制, 其导通时间 $<1\text{ns}$, 电能释放的时间常数从 $\text{ns} \sim \mu\text{s}$ 可变, 标定能量范围为 $\mu\text{J} \sim \text{mJ}$, 模拟了被测信号脉冲能量的作用方式。

图 3 为离子和 X 射线能量计定标及测试方框图, 经放大显示的信号可联接数字打印机记录。根据定标器输入的能量可以推算出能量

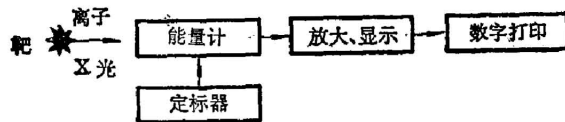


图 3 能量计定标测试方框图

Fig. 3 Block diagram for calibration and diagnostics of the calorimeter

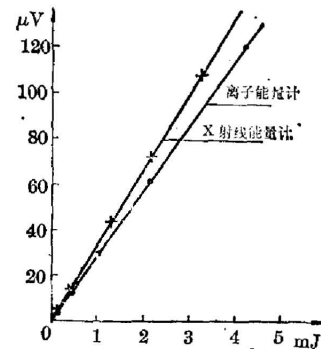


图 4 线性曲线

Fig. 4 Linear relation between input energy and output voltage

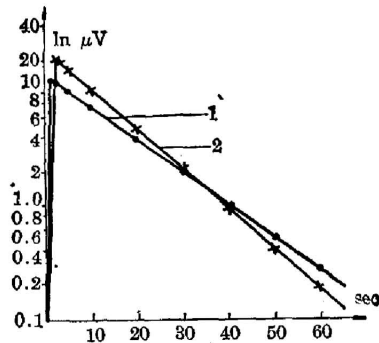


图 5 响应曲线

Fig. 5 Response curve

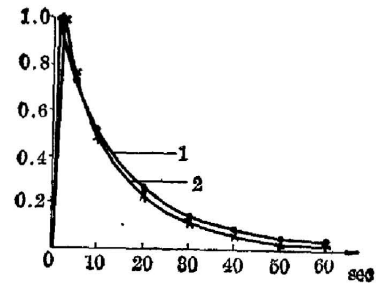


图 6 归一化曲线

Fig. 6 Standardization curve

计的灵敏度及标准常数。图 4 为离子和 X 射线能量计的线性曲线。图 5 为离子和 X 射线能量计输入能量一定时热电势随时间变化的响应曲线。图 6 为对应于图 5 的归一化响应曲线。经过多次重复定标测试得出离子和 X 射线能量计的性能参数列于表 1。其灵敏度高于国外同类产品^[3](见表 2)。

表 1 能量计的性能参数

Table 1 Parameters of the calorimeters

	灵敏度($\mu\text{V}/\text{J}$)	测量范围(mJ)	响应时间(s)	冷却常数(s^{-1})	重复精度
离子能量计	27900	0.015~5	1.0	0.065	$< \pm 1\%$
X 射线能量计	32700	0.010~5	1.5	0.077	$< \pm 1\%$

表 2 和国外同类型能量计比较

Table 2 Comparing to the same kinds of calorimeter from abroad

	我 们 研 制			美国 LLL		
	接收口径(mm)	$s_i(\mu\text{V}/\text{J})$	$s_a(\mu\text{V}/\text{J})$	接收口径(mm)	$s_i(\mu\text{V}/\text{J})$	$s_a(\mu\text{V}/\text{J})$
离子能量计	$\phi 9.5$	27900	39000	$\phi 12.7$	14800	11700
X 射线能量计	$\phi 16$	32700	16000	$\phi 12.7$	8700	6900

三、激光等离子体实验及误差分析

1. 激光等离子体实验

所用的激光器为六路激光装置中的一路激光束^[8], 其技术指标及靶场参数为: 打靶能量 5~10 J/beam, 脉宽 100 ps, 光束发散角 0.5 mrad, 光束孔径 $\phi 60$ mm, 透镜焦距 120 mm, 靶室真空度 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ Torr。

a) 单光束打大平面靶(焦点在靶表面), 靶的平面法线与入射光轴成 α 夹角。离子能量计放在入射光波平面内与光轴成 $\beta=44^\circ$ 的位置(距靶 230 mm) 如图 7 所示。进行 P 偏振光束和 S 偏振光束打靶, 在相同激光打靶条件(能量 8J)下, S 偏振光束的离子动能随着 α 的变化单调缓缓地下降, 而 P 偏振光束的离子动能当 $\alpha=20^\circ$ 时, 有一个极大值, 如图 8 所示, 这是由于共振吸收与偏振角度有依赖关系^[9,10]。我们把五个性能相同的激光能量计^[1]放在入射激光平面内与光轴成 β 为 33° 、 44° 、 55° 、 66° 、 80° 的位置上, 在相同打靶条件下, 当 $\alpha=0^\circ$, S 偏振光束和 P 偏振光束的散射光分量如图 9 所示。当 $\alpha=20^\circ$ 时 S 偏振光束和 P 偏振光束的散射光分量如图 10 所示。这和上面测量离子能量的结果是一致的。

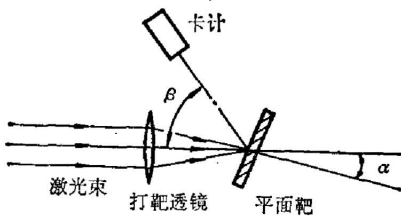


图 7 能量计在靶室中的位置
Fig. 7 Setup of calorimeters

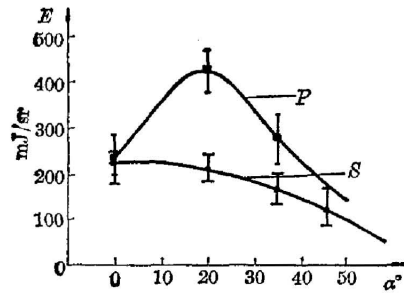


图 8 离子动能的 P 、 S 分量
Fig. 8 Ion kinetic energy with P and S polarization

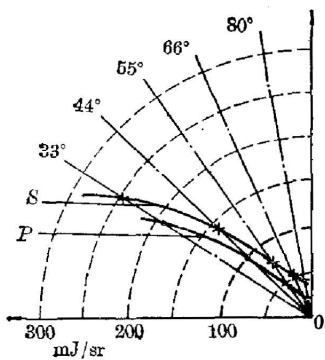


图 9 $\alpha=0^\circ$ 时散射光的 P 、 S 分量
Fig. 9 Distribution of scattering light with P or S polarization incidence ($\alpha=0^\circ$)

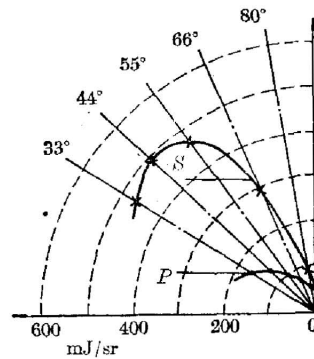


图 10 $\alpha=20^\circ$ 时散射光的 P 、 S 分量
Fig. 10 Distribution of scattering light with P or S polarization incidence ($\alpha=20^\circ$)

b) 单光束打不同材料的平面靶($\alpha=20^\circ$, 焦点离靶面 $100\mu\text{m}$) X 射线能量计放在入射光波平面内与光轴成 $\beta=44^\circ$ 的位置(距靶 150 mm) 如图 7 所示, 在相同的激光打靶条件下(打靶能量 9J), 测量不同原子序数靶材的 X 射线发射量列于表 3, 随着靶材原子序数 Z 的变大, X 射线发射量增加^[1,2]。

2. 误差分析

a) 电定标误差

由公式(3)得:

表 3 不同靶材 X 射线发射量
Table 3 Emitting X-ray energy for different taggots

靶 材	⁴ Be	¹³ Al	⁴² Mo	⁷⁹ Au
mJ/Sr	0.286~0.431	0.716~0.856	1.141~1.427	1.712~1.977

$$\frac{dE}{E} = \left| \frac{dC}{C} \right| + 2 \left| \frac{dV}{V} \right|,$$

其中 $\left| \frac{dC}{C} \right| < 1\%$, $\left| \frac{dV}{V} \right| < 0.1\%$ 。所以电定标误差 $< 1.2\%$ 。

b) 测量误差

离子能量计由于表面溅射和二次电子发射引起的误差 $< 2\%$ ^[5], 离子能量计补偿盘玻璃窗口对 $1.06 \mu\text{m}$ 光透过率测量误差 $< 0.5\%$, 电能和被测信号能量在吸收体上的作用部位不同引起传导和辐射损失不同带来的误差为 1.5% 。所以激光聚变实验中离子能量计测量的相对误差 $< 4.5\%$ 。

X 射线能量计由于采用了 $20 \mu\text{m}$ 的铍箔作窗口, 它滤掉了激光等离子体实验时 X 射线发射的一部分低能剂量, 只有能量在 950 eV 以上的 X 射线谱才有响应(激光等离子体温度 $\sim 600 \text{ eV}$ 时)。所以 X 射线能量计的测量误差比离子能量计的大得多。但在物理实验方面感兴趣的 1 keV 以上的 X 射线双电子温度分布总剂量测量是十分有效的。

本实验是在中科院上海光机所六路激光装置及靶场的密切配合下完成的, 离子和 X 射线能量计在中国计量科学院作过电校准绝对定标, 周复正、田莉同志也做了很多工作, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 林康春, 周复正等; 《中国激光》, 1983, **10**, No. 3 (Mar), 186.
- [2] H. G. Ahlstrom *et al.*; *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, 1977, **4A**, No. 11 (Nov), 437.
- [3] S. R. Gunn; *LLL Report UCID-17308*, 1976.
- [4] S. R. Gunn *et al.*; *Rev. Sci. Instrum.*, 1977, **48**, No. 11 (Nov), 1375.
- [5] H. H. Andersen; *Radiat Eff.*, 1970, **3**, 51.
- [6] F. Brown, J. A. Davies; *Can. J. Phys.*, 1963, **41**, No. 6 (Jun), 844.
- [7] S. R. Gunn; *Rev. Sci. Instrum.*, 1974, **45**, No. 7 (Jul), 936.
- [8] 邓锡铭, 余文炎等; 《光学学报》, 1981, **1**, No. 4 (Jul), 289.
- [9] J. S. Pearlman *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **38**, No. 24 (Jun), 1397.
- [10] K. S. Manes *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **39**, No. 5 (Aug), 281.
- [11] L. E. Chase *et al.*; **AD/A-092292**, 1974, 68.
- [12] P. J. Mallozzi *et al.*; *Fundamental and Applied Laser Phys.*, 1971, 165.

Calorimeters for measurement of ions and X-rays in laser-plasma experiments

LIN KANGCHUN LIN ZUNQI ZHONG HONGLIN AND LIU JIAN
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 4 May 1984; revised 28 June 1984)

Abstract

The principle, structure and calibration of the ion and X-ray calorimeters are described. The results of their applications to the experiments on laser-plasma are analyzed and discussed.



(上接第 31 页)

本科生和研究生,还积极开展原子分子光谱学和应用光学方面的科学研究工作。1958~1965年期间,先后完成了析钢仪和大型光谱仪的设计研制;进行了超纯金属的发射光谱分析、石油馏分的喇曼光谱分析、有机磷农药的振动光谱研究、大气窗口的红外吸收光谱研究以及傅里叶变换光谱仪的研究等多项工作。

1976年后,在他的指导和支持下,研制成功工作寿命在一万小时以上的 He-Ne 激光器,这是当时国内最早研制成功的长寿命气体激光器。此外还先后指导研制了横向塞曼激光器、二米双频测长仪、哈特玛变换光谱仪等,协助有关科研和生产单位研制了人工模拟白昼光装置及荧光显微镜等,使这些项目取得了可喜的成果,有些工作曾经得到国家有关部委和天津市科委的嘉奖。与此同时,他还指导开展了有机分子旋转异构体的喇曼和红外光谱研究、分子间能量转移的激光光谱研究等基础研究工作。

沈寿春教授不但是一位知识渊博的光学专家,也是一位献身于教育事业的教育家。他诲人不倦,数十年如一日,为国家培养了大批的光学人才。他不仅重视基础理论课程的讲授,先后讲授过普通物理学、电磁学、光学、光谱学和高等光学等一系列课程;还十分重视实验教学工作,亲自指导青年教师建立实验室,编排实验内容。他精心编写所讲授的课程的大纲和讲义,审阅有关教材。他所编写的《光学》和《高等光学》教材,对我国高校在光学方面的教材建设作出了重要的贡献。

1977年他被任命为国家科委光学及应用光学学科组成员,1979年中国光学学会成立时,被选为学会的副理事长。

(林文光)