

质谱仪在激光等离子体物理研究中的应用*

滕浩 张杰

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室 北京 100080)

摘要 在对激光等离子体相互作用的研究中,物质由于在激光场的作用下离化而形成各种离化态的离子,研究这些离子的特性可以深入理解激光与等离子体相互作用过程.质谱仪能提供离子的最高离化态、平均电荷态、能量分布和丰度等重要信息.文章介绍了质谱仪的原理及其在激光等离子体中的应用.

关键词 质谱仪,激光等离子体,丰度

MASS SPECTROMETRY AND ITS APPLICATIONS IN LASER PLASMA STUDIES

TENG Hao ZHANG Jie

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The ion diagnostics in high temperature plasmas produced by the interaction of intense laser radiation with targets provides critical information on the average and maximum charge state of ions, ion energy distributions, and the abundance of ion species in laser plasmas. Mass spectrometry is therefore very important. Its principle is presented, and various types of mass spectrometers together with their applications in laser plasmas are described.

Key words mass spectrometer, laser plasma, abundance

1 概述

激光与等离子体相互作用中离子携带丰富的信息,对离子的质量谱、电荷态、能谱的测量以及对研究激光等离子体相互作用过程有重要的意义.质谱仪可以实现上述功能的测量,所以自有了激光等离子体研究以来,质谱仪便被迅速引入激光等离子体研究中.早在20世纪70年代就有这方面的报道,早期的质谱仪无论是仪器结构和探测手段都比较简单,使用最多的是汤姆孙(Thomson)质谱仪,探测器也用较简单的胶片或法拉第筒.质谱仪已有多年的应用,至今它在激光等离子体研究中还是重要的仪器,特别是有了飞秒激光源后,它在飞秒激光与团簇相互作用、分子反应动力学和激光分离同位素中有重要的应用.现在的质谱仪在结构上和探测手段上有很大的改进,已有与条纹相机和光纤传输相配合的质谱仪.质谱仪的研制对研究激光等离子体有重要的作用.

2 质谱仪原理^[1,2]

质谱仪是根据带电粒子或分子在电磁场中按质荷比的不同发生分离,获得不同质荷比物质的仪器.一般而言,质谱仪由5个部分组成,即进样系统、离子源系统、质量分析系统、离子检测器系统和真空系统.

从类型上来讲,按工作原理,所有的质谱仪可分为两类:静态质谱仪和动态质谱仪.静态质谱仪的质量分析系统由恒定的电场和磁场组成,在恒定的电磁场作用下,离子按质荷比不同而分开.动态质谱仪的质量分析系统由各种具有不同工作原理的交变电场组成,在交变电场作用下,不同质荷比的离子在其中实现不同的空间选择、时间选择、质量选择,从而达到按质荷比不同而分开的目的.常用的动

* 国家自然科学基金(批准号:19825110,19854001)和国家“八六三”高技术惯性约束核聚变基金资助项目

2000-09-18收到初稿,2000-12-29修回

态质谱仪有:四极质谱仪、离子阱质谱仪、飞行时间质谱仪等.所有的质谱仪必须有以下几个技术指标:

(1) 质量范围.质量范围表示质谱仪器所能分析的样品的原子或分子的质量由最小到最大的区间.

(2) 分辨本领.分辨本领是表征质谱仪鉴别相邻质量离子束的能力,通常用 $m/\Delta m$ 来表示.

(3) 灵敏度.灵敏度表征质谱仪中样品的耗量与接收到的信号之间的关系.

(4) 丰度灵敏度.丰度灵敏度表征描述强离子峰的拖尾对近弱离子峰的影响.

(5) 精密度.精密度用以衡量测量结果之间的离散程度.

3 适用于激光等离子体的离子质谱仪的分析

超短超强激光与各种靶相互作用,靶物质通过各种吸收机制^[31]吸收激光能量,并在极强激光电场作用下迅速电离,形成激光等离子体.激光等离子体本身就是一离子源,但离子能量发散很大,根据文献[4]报道,离子能谱高达 350 keV,在激光加速离子系统中,离子能量可达 MeV 量级^[5],而且这些离子是从同一位置出发.由于本身具有高的能量,可利用它们本身具有的能量,就可从源区出发到达探测器,所以不需要离子引出系统,正因为如此,大都考虑用飞行时间来进行质谱的测量.另外,激光等离子体是在高真空条件下产生的,所以前面介绍的质谱仪中的离子源系统、离子的引出系统、真空系统和进样系统都不必考虑,只考虑质量分析系统和离子检测系统.下面,我们根据激光等离子体的发展介绍已用于激光等离子体中的质谱仪器.

3.1 汤姆孙质谱仪^[6]

汤姆孙质谱仪的结构示意图如图 1.令离子的运动方向为 z 轴,并在 xy 平面上成像,设离子质量为 m ,电荷数为 Ze ,则离子的质荷比为 m/Z ,它在正交电磁场作用下发生偏转,在 xy 平面上的轨迹方程为

$$y^2 = k \cdot \frac{Z}{m} x. \quad (1)$$

令 $k = \left| \frac{B^2}{E} \right| \left| \frac{z^2}{2} \right|$,可见离子射线在 xy 平面上的轨迹是一个抛物线方程,而常数 k 与电场、磁场强度、仪器的几何尺寸以及带电粒子的质荷比有关.可见在一定电场和磁场强度、仪器几何尺寸条件下,每一根抛物线代表一特定质荷比 m/Z 的离子束,而不同速度的同一质荷比的带电离子分布在同一根抛物

线上.这种质谱仪在 高能离子探测中现在还在应用^[7],特别是它既能测量质谱又能测量能谱.现在一般质谱仪中的记录采用微通道板,但微通道板对高能离子(大于 200 keV)的探测效率极低,对这种情况可以用胶片记录或固体核径迹探测器 CR39 和硝酸纤维膜记录,但质量分辨率不高,主要缺点是数值处理和探测器标定较麻烦.

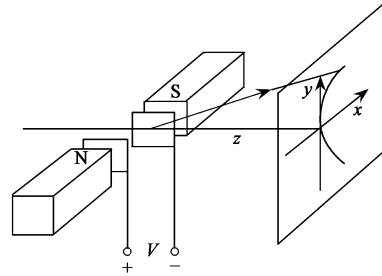


图 1 汤姆孙质谱仪

3.2 静电分析器 - 飞行时间质谱仪^[7,8]

其原理如图 2 所示.这种质谱仪可测量质谱又可测量能谱.由离子源出射的离子进入一加高压的平板型静电分析器,使不同质荷比的离子沿不同方向偏转后,被不同位置上的探测器接收,从而达到分辨不同质荷比离子的目的.

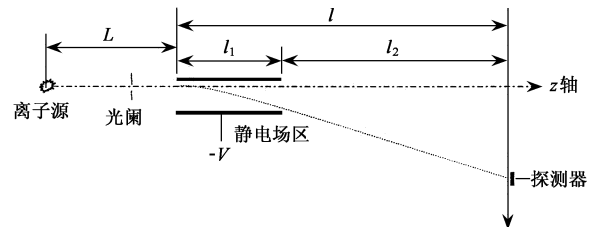


图 2 静电分析器 - 飞行时间质谱仪

其质荷比方程为

$$\frac{m}{Z} = k_1 \frac{1}{x}, \quad (2)$$

式中 k_1 为只与仪器有关的常数, x 为探测器的位置.由(2)式可见,不同的位置代表不同的荷质比.

荷能比方程为

$$\frac{\mathcal{E}}{Z} = k_2 \frac{1}{x}, \quad (3)$$

式中 k_2 为与仪器和所加高压有关的常数.

该分析器的能量和质荷比的分辨率主要由探测器入射道的宽度 Δx 决定,即

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \frac{\Delta x}{x} \approx \frac{\Delta m/Z}{m/Z}. \quad (4)$$

作为它的改进,还发展了扇形场静电偏转分析器配飞行时间质谱仪.

3.3 扇形场静电偏转分析器配飞行时间质谱仪^[5,9]

前面介绍的是通过不同位置来测质谱,这种方法的数据处理较麻烦,且分辨率不高.激光等离子体源相对于远处的探测器而言,可以认为是点源,且同时发射,非常适合于用飞行时间来进行质谱测量.但简单的飞行时间质谱仪^[10]要求离子源初始能量相同,因为飞行时间不仅与质荷比有关,而且与初始能量有关,如果初始能量发散很大,会影响离子到达探测器的时间,不能进行质谱测量.如前所述,飞秒激光等离子体源的能量发散很大,简单的飞行管质谱仪是不能进行质谱测量的,为了解决这个问题,可在飞行管中加一能量分析器^[11],如圆柱电容偏转分析器^[2]、球形电容偏转分析器^[13]、环形电容偏转分析器^[11]等,由于它们具有选能的功能(推导见参考文献[1]),这就使到达探测器的离子能量是单一的,可以测得质谱,并且还可以逐步改变能量分析器的能量,测得离子的能谱.这种质谱仪集中了飞行时间质谱仪和静电场能量分析器的优点,它既能测量质谱又能测量能谱.

比如,将简单漂移管和扇面圆柱形静电分析器结合,可以用来测质谱,因为离子在扇面圆柱形静电分析器中的运动本身就是一个离子漂移过程.况且扇面圆柱形静电分析器具有能量选择功能,对于相同能量不同质量的离子完全可以靠飞行时间来分辨质量.另外,我们可以逐步改变扇面圆柱形静电分析器的电压,改变通过分析器的离子的能量,可以测得不同能量的质谱,从而获得同种离子的能谱,这就达到既有质谱又有能谱的测量.要提高质量分辨本领,可以采用飞行时间聚焦方案,时间聚焦的条件是简单漂移管的长度等于扇面圆柱形静电分析器的弧长,具体情况见文献[13-16].这方面的质谱仪可探测的物理量很多,如质谱、能谱和价荷态,在激光等离子体中已有很多应用^[5,11,12,17-19].

3.4 条纹相机-飞行时间质谱仪^[20,21]

这是美国 Livermore 实验室针对 100fs 激光与靶相互作用产生的离子能量为 0.1-100keV 范围而设计的.它是利用静磁场将不同质荷比的离子分开,发生偏移,其偏移量正比于质荷比,用大面积的微通道板接收偏移的离子,转化为电信号,再通过塑料闪烁体转化为光信号,由光纤传输,耦合进高时间分辨的条纹相机,就可以得到随时间和空间二维扫描条纹.对一定质荷比的离子而言,它是一条有恒定斜率的

直线.若针对某一特定的条纹,则可以得到该离子的能谱分布,其结构见图 3.

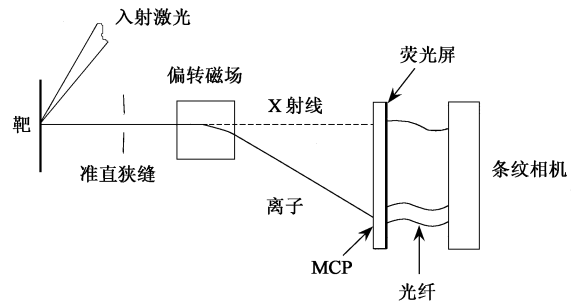


图 3 条纹相机-飞行时间质谱仪

设在微通道板上离子的偏移量为 d , 磁场大小为 $\int B dl$, 一定质荷比 m/Z 的离子在静磁场中的质荷比方程为

$$\frac{Z}{m} = \frac{1.04 \times 10^{-4}}{\int B dl} \left| \frac{L}{h} \right| \frac{d}{t}, \quad (5)$$

可见质荷比与记录时空扫描的斜率有关.所以时空扫描图上的一定斜率的直线代表一定质荷比的离子.

质量分辨为

$$\Delta \left| \frac{Z}{m} \right| = \frac{1.04 \times 10^{-4}}{\int B dl} \left| \frac{L}{h} \right| \frac{\Delta d}{t} = \frac{Z}{m} \frac{\Delta d}{d}. \quad (6)$$

如换为以能量表示,则为

$$\Delta \left| \frac{Z}{m} \right| = \frac{1.44 \times 10^2}{h \int B dl} \sqrt{\epsilon \Delta d}, \quad (7)$$

其中 h 和 L 分别为磁场和靶到探测器的距离, ϵ 为离子能量.可见,我们可以选择合适的入射狭缝的宽度以及磁场大小和磁场到探测器的距离来控制质谱仪器的质量分辨本领.

4 结论

在强激光与靶物质相互作用中,对带电粒子的测量是激光等离子体研究的重要内容之一,通过测量带电粒子的质谱、能谱、电荷态等可以获得激光等离子体相互作用的机制,所以在激光等离子体研究中引入质谱仪是必然的结果.至今,质谱仪器还在激光等离子体诊断中发挥着重要的作用.比如质谱仪除了能测质谱、能谱、电荷态外,还可以判断激光是与靶物质作用还是与靶表面污染物作用等.我们可以针对激光等离子体能量发散很大的特点,可先选用一滤速器进行初步的选能,然后再通过一离子反物理

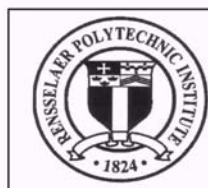
射系统进行时间聚焦,可以得到较好的质谱.如果既要得到质谱又要得到能谱,就必须在质谱仪中加入能量分析器,而能量分析器有多种,要根据能谱范围和能量分辨的要求来设计.总之,我们可以根据激光等离子体的特点和要探测的离子不同的质量数范围和能谱范围设计相应的质谱仪器.

参 考 文 献

- [1] Duckworth H E, Ghoshal S N. Mass Spectrometry. New York : McGraw Hill, 1963
- [2] 王世俊. 质谱学及其在核科学技术中的应用. 北京: 原子能出版社, 1998 [Wang S J. Mass Spectrometers and its Applications in Nuclear. Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 1998 (in Chinese)]
- [3] Wilks S C, Krueer W L *et al.* Phys. Rev. Lett., 1992, 69 : 1383 ; Forslund D W *et al.* Phys. Rev. A., 1975, 11 : 679 ; Gibbon P, Bell A R. Phys. Rev. Lett., 1992, 68 : 1535 ; Andreev A A *et al.* Sov. Phys. JETP., 1992, 74 : 963
- [4] Ditmire T, Tisch J W G *et al.* Nature, 1997, 54 : 38616
- [5] Laska L, Krasa J *et al.* Rev. Sci. Instrum., 1996, 67 : 950
- [6] Krushelnick K, Clark E L *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 83 : 737
- [7] Decoste R. Rev. Sci. Instrum., 1977, 48 : 232
- [8] Decoste R. Appl. Phys. Lett., 1977, 31 : 68
- [9] Denus S, Farny J *et al.* J. Tech. Phys., 1977, 18 : 25
- [10] Wiley W C *et al.* Rev. Sci. Instrum., 1950, 26 : 1150
- [11] Vanrompay P A, Nantel M *et al.* Appl. Sur. Sci., 1998, 127 : 1023
- [12] Pronko P P, Vanrompay P A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 83 : 2596
- [13] Poschentieder P W. Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys., 1972, 9 : 357
- [14] Pinkston J D, Rabb M *et al.* Rev. Sci. Instrum., 1986, 57 : 583
- [15] Gohl W, Kutscher R *et al.* Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys., 1983, 48 : 411
- [16] Bakker J M B. Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys., 1971, 6 : 291
- [17] Mraz W, Parys P *et al.* Laser and Particle Beams, 1999, 17 : 307
- [18] Mraz W, Parys P *et al.* Laser and Particle Beams, 1994, 12 : 421
- [19] Woryna E *et al.* Laser and Particle Beams, 1996, 14 : 293
- [20] Guethlein G *et al.* Rev. Sci. Instrum., 1995, 66(1) : 333
- [21] Young P E *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 76 : 3128

• 信息服务 •

美国伦斯勒理工学院招生信息



Rensselaer

Troy, New York, U.S.A.

August, 2001

JOIN OUR GRADUATE SCAOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics, Applied Physics, and Astronomy

Areas of research : Astronomy, Elementary Particles Physics, Origins of Life, THz Imaging, THz Electronics, Nano-Particles Physics.

Teaching, research assistantships, and fellowships are available.

Application : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

Email : gradphysics@rpi.edu