

# 高离化态原子束箔光谱学研究\*

曾宪堂<sup>1)</sup> 杜树斌 李景文 江历阳

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 在原子能院端压为 13MV 的串列加速器上,建成了束箔光谱学实验设备,其中包括“掠入射真空紫外到软 X 射线的光谱仪”。测量了 S, Br, Ge, Ni, Cu 和 Ti 等一些元素的高离化原子光谱。

**关键词** 高离化原子 束箔技术 掠入射光谱仪 跃迁谱线 能级

## 1 引言

高电荷态原子光谱学研究是现代原子物理重要分支之一。光谱学方法是研究原子量子态精细结构的实验方法,它能敏感地探测到相对论效应、量子电动力学效应、电子间的相互关联,以及核有限尺寸的影响。光谱学研究能提供这类离子的跃迁谱线、相对跃迁强度、能级结构和能级寿命等的实验数据。这些数据可用来检验基本的原子结构理论,并在 X 光激光研究、惯性约束聚变研究、等离子体诊断、解释星体光谱中有重要应用。

在实验室主要研究设备,涉及到两个方面:一是光源;二是光谱仪。

实验室光源有激光产生的等离子体、Tokamak 等离子体和基于加速器用“束箔技术”获得的快速飞行的离子。

激光产生等的离子体可提供强光源,比 Tokamak 等离子体光源强七、八个数量级,比束箔光源要强约十五、六个数量级。因此,强激光等离子体光源与高分辨光谱仪相结合,可以测得高品质的高离化态离子光谱。

利用加速器获得快速飞行的离子,这些离子穿过碳膜的瞬间,一些电子被剥离掉,形成高剥离态离子,其离化度取决于离子的速度。剩下的电子中,一些被激发到高激发态,形成受激的高剥离态离子。穿过碳膜后,这些离子在飞行中由于电子退激而发光。这就是用“束箔技术”获得的光源。

束箔光源的特点是光源比较弱,不易测得高分辨光谱,这是一缺点。但是,同大多数等离子体光源相比,束箔相互作用能产生高剥离态和高激发态,甚至产生双激发态。

\* 国家自然科学基金,中国工程物理学院科学基金,核工业科学基金和中国原子和分子联合体的基金资助

1) E-mail: xtzens@iris.ciae.ac.cn

有些量子态用其他的方法难以激发出来, 而束箔激发是非选择性的, 容易激发这些态, 因而能探测到它们. 束箔光源, 是时间分辨的, 可以测量离子的能级寿命. 由于光源弱, 不存在离子间多次碰撞的干扰, 也无内离子场, 可以观测到禁戒跃迁. 从这种意义上来说, 光源弱也是一优点<sup>[1]</sup>. 因此, 基于加速器的束箔光谱学方法<sup>[2]</sup>仍然是光谱学研究的重要的方法之一, 同激光等离子体光谱学方法是互相补充的.

## 2 束箔光谱学实验装置

原子能院有端压为 13MV 的 HI-13 型串列加速器, 适于开展束箔光谱学<sup>[2]</sup>研究. 在国防原子参数需求的牵引下, 在于敏先生主持的国家自然科学基金重大项目“电子与原子、离子相互作用微观过程理论与实验研究”的推动下, 采取了正确的技术路线, 建成束箔光谱学研究实验系统, 其中包括建成国内首台自建的“2.2m 掠入射真空紫外到软 X 射线谱段光谱仪”<sup>[3,4]</sup>.

建造光谱仪的具体作法是, 参照国际上标准的 McPherson 247 型光谱仪, 立足国内自行研制. 关键的两个部件——光栅和“精密道轨付”. 光栅从美国进口, 因国内无相应产品; 其余部件, 包括“精密道轨付”, 由长春光机所试制, 其中“精密道轨付”, 加工难度很大, 要求对曲率直径 2.2m 弧型金属道轨的加工精度要好于  $4\mu\text{m}$ .

该谱仪的性能, 当光栅为 600 槽/mm 时, 探测范围是 1—125nm, 能量分辨率为 0.014nm; 当光栅为 1200 槽/mm 时, 探测范围是 1—62.5 nm, 能量分辨率为 0.008 nm. 它的性能达到国际同类产品的先进水平, 而造价仅是进口的三分之一. 谱仪与靶室几何安排如图 1 所示.

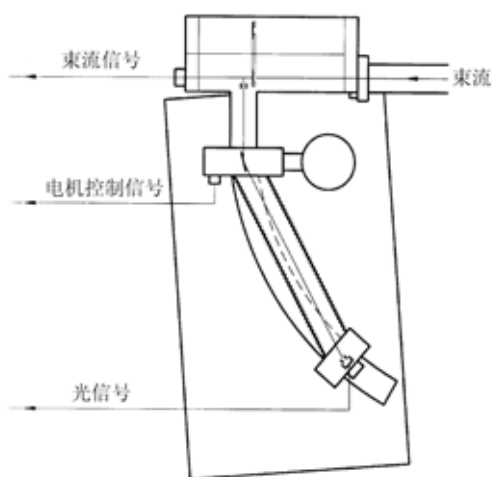


图 1 2.2m 掠入射 GIM-957 真空紫外到软 X 射线谱段光谱仪和靶室

建成束箔靶室,内装有可两维运动的靶轮.靶轮平面垂直束流方向,靶片可平移以测能级寿命.靶轮可围绕自身的轴心旋转以换靶片.

采用单光子探测技术,建成独立的束箔光谱测量在线数据获取系统,其特点是束流归一、微机控制、多路定标方式获取、全自动数据获取.

### 3 中重元素高剥离态原子光谱测量

我们已经成功地测量了 $S^{15}$ , Br, Cu, Ni, Ge和Ti的高离化原子光谱,获得了好的物理结果.以溴为例,在本院束箔实验系统上(光栅 600 刻线/mm),在 90MeV和 130MeV的能量下,测得丰富谱线,其中 24 条归类为Br的类镁离子,其中 19 条是首次给出的实验值,并由此首次给出 14 条新能级的实验值,以前只有 5 条.130MeV Br的束箔光谱,如图 2 所示(11—24nm),详见文献[6].Ge的类Ne离子也有若干新谱线给出<sup>[7]</sup>.

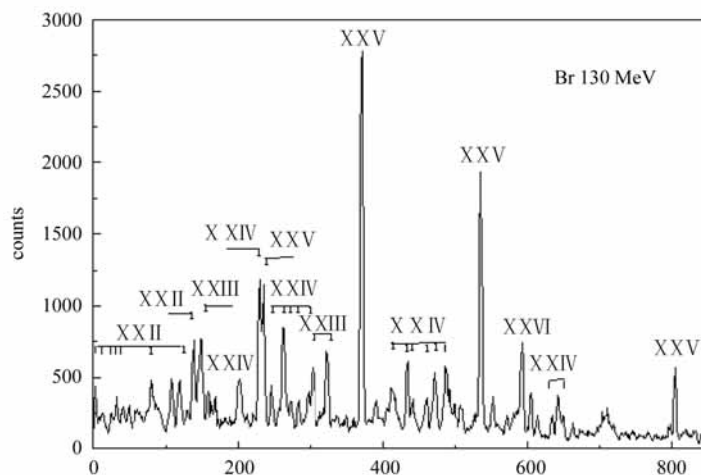


图 2 130MeV Br 的束箔光谱 (11—24nm)

对束箔光谱学实验研究而言,小加速器能量低,不能形成高剥离态,大加速器虽然可获得高剥离态,但由于束流弱(低于 50nA),做不成束箔实验.而我们的端压为 13 MV 的 HI-13 型串列加速器,其特点比小加速器能量高,比大加速器束流强(多半高于 50nA),有开展束箔光谱学研究的优势.将来除了测量光谱外,还将开展能级寿命测量,并采用 CCD 固体阵列探测器技术.

作者感谢兰州近物所王友德、马新文、刘惠萍同志参加实验并介绍了他们的很多实际经验;感谢瑞典 Lund 大学 I. Martinson 教授和 C. Jupen 博士在数据分析中给予的宝贵指导;感谢还给予原子能院串列加速器室的运行组和离子源组提供了强而稳定的束流.特别感谢于敏先生给予本课题的关注和丁大钊院士给予的支持.

### 参考文献(References)

- 1 ZENG Xian-Tang. Spectroscopic Studies of Highly Ionized Atoms-New Results for the Ne, Mg, Mn, Fe, Co, Ga and Ge Isoelectronic Sequences, Doctoral dissertation, Lund University, 1999.12
- 2 Martinson I. In : Treatise on Heavy-Ion Science **5**, D. A. Bromley ed. Plenum, New York, 1985, 425—492
- 3 曾宪堂等. 原子与分子物理学报, 1998, **增刊**: 81—84
- 4 卢启鹏. 光学精密工程, 1998, **6**(5): 91—96
- 5 曾宪堂等. 原子与分子物理学报, 1998, **增刊**: 61—62
- 6 ZENG X T, DU S B et al. Physica Scripta, 2000, **61**: 464—467
- 7 DU S B, ZENG X T et al. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2000, **33**: 3725—3728

## Spectroscopic Studies of Highly Ionized Atoms by Means of Beam-Foil Technique\*

ZENG Xian-Tang<sup>1)</sup> DU Shu-Bin LI Jing-Wen JIANG Li-Yang

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** Experimental equipments for spectroscopic studies of highly ionized atoms by means of beam-foil technique has been set up at the terminal voltage 13MV tandem accelerator in China Institute of Atomic Energy (CIAE), and measurements of spectra have been carried out for elements S, Br, Ge, Ni, Cu and Ti.

**Key words** highly ionized atoms, beam-foil technique, grazing incidence, spectrometer, transition lines, energy level

---

\* Supported by National Natural Science Foundation of China, Science Foundation of Nuclear Industry, Science Foundation of the Chinese Academy of Engineering Physics and the Chinese Research Association of Atomic and Molecular Data (CRAAMD)

1) E-mail: xtzens@iris.ciae.ac.cn