

文章编号: 1002-2082(2004)01-0005-04

# 聚焦慢速高荷态重离子束微束斑X射线源

王凯歌<sup>1,2</sup>, 王雷<sup>3</sup>, 王鹏业<sup>1</sup>, 牛慈笨<sup>2</sup>

(1. 中科院 物理研究所 软物质实验室, 北京 100080; 2. 中科院 西安光学精密机械研究所

光电子部, 陕西 西安 710068; 3. 西安应用光学研究所 第8研究室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 利用电子束离子源(EBIS)或者电子束离子陷阱(EBIT)产生的慢速高电荷态重离子束轰击金属靶面, 离子束与靶面作用并复合辐射特征X射线; 并将高荷态离子束采用离子光学系统会聚为微细束后再与靶面作用, 能够辐射出微米甚至亚微米级、纳米级的微束斑X射线。本文介绍这一新型微束斑X射线源的结构、机理及其特性等。

**关键词:** 微束斑X射线源; 电子束离子源; 电子束离子陷阱; 离子光学聚束系统

**中图分类号:** O434.1

**文献标识码:** A

## X-ray Source with Micro-beam Produced with Slow Highly Charged Ions

WANG Kai-ge<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, WANG Peng-ye<sup>1</sup>, NIU Han-ben<sup>2</sup>

(1. Institute of Physics, CAS, Beijing 100080, China; 2. Xi'an Institute of Optics &amp; Precision Mechanics,

CAS, Xi'an 710068, China; 3. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The electron beam ion trap (EBIT) and the electron ion source (EBIS) are new instruments for the study of X-ray produced by very highly-charged ions when they interact with free electrons. Some of the design and physics features of EBIT/EBIS are described, and the characters of the X-ray produced with them are described too. Micro-focal X-ray can be taken out if focusing the ion beam with the ion-optical system.

**Keywords:** microfocal X-ray source; electron beam ion source; electron beam ion trap; ion-optical focusing system

## 引言

微束斑X射线源因其亮度高、束斑小, 在X射线显微学、X射线CT以及数字X射线成像等领域有着广阔的应用前景<sup>[1~3]</sup>。例如, 对直径仅有几个微米的聚合物纤维表面和内部进行结构成像, 对活体生物细胞进行全息成像, 对生物化学动力学反应过程进行监测以及进行材料的无损探伤研究等等。因此, 对微束斑X射线源的研究倍受人们的重视。从上世纪30年代末开始, 科技工作者就一直在努力摸索研制细微束斑的高亮度X射线源<sup>[4~5]</sup>。

目前, 产生细微束斑X射线源的方法一般有同步辐射源法、激光等离子体X射线源法及普通X射线管与各种聚焦X射线光学元件组合等方法。但是, 它们要么结构庞大、造价昂贵、操作不便, 要么所聚X射线焦斑偏大、结果不理想等等, 使这些方法的应用受到一定的限制<sup>[6~7]</sup>。因此, 研制高效灵便的微细束斑X

射线源仍是目前相关X射线光学的前沿课题之一。本文简要介绍一种由聚焦慢速高电荷态重离子束轰击金属靶面产生微束斑X射线源的新方法。

由于离子质量大, 它除带有电荷外, 本身还有能级结构, 因此具有一定能量的离子束入射到金属固体靶面将发生非常复杂的效应。一般将这些效应归结为两方面: 一方面是固体表面及内部发生的因晶格扰动而产生的缺陷以及原子错位等各种变化; 另一方面是固体表面将发射背散射离子、二次离子、电子以及X射线等各种粒子。由于速度较慢的重元素多荷态离子(SHHI)速度较小, 因此其动能相对也小。但是, 它的原子序数比较高, 离子具有的势能比较大, 这样, 重离子轰击金属箔靶辐射产生的X射线与普通离子束或电子束与箔靶作用产生的X射线相比具有X射线转化效率高等显著优点。如果将这些X射线加以利用, 将是非常有意义的高效X射线源。假如采用离子光学

收稿日期: 2003-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69878033)

作者简介: 王凯歌(1970-), 男, 陕西富平人, 中国科学院物理研究所博士, 主要从事微束斑X射线源及其在生物、医学等方面的应用和生物物理学方面的研究。

系统将高电荷态离子束压缩聚焦为微米级甚至更小焦斑的离子束后,再轰击金属箔靶,那么,聚焦离子束与金属靶面复合辐射的X射线束将具有微米甚至纳米量级的微小束斑。

### 1 慢速高电荷态离子的产生

聚焦慢速高电荷态重离子束轰击金属靶面产生微束斑X射线的基础,即关键技术就是产生慢速高荷态重离子束。20世纪70年代发展起来的电子束离子源(EBIS)<sup>[8~10]</sup>和电子束离子陷阱(EBIT)<sup>[11~12]</sup>等设备能够产生慢速高电荷态重离子束,它们甚至可以将任何一种气体或低电荷态离子转变为高电荷态离子<sup>[13~14]</sup>。

电子束离子源与电子束离子陷阱起初主要是用来研究高电荷态离子的内部结构、离化过程以及相互之间作用机理等性质的仪器。世界上第一台电子束离子源是前苏联Dubna联合核研究所于1970年研制成功的<sup>[8]</sup>。电子束离子陷阱是80年代后期发展起来的,它在电子束离子源的基础上,对其结构进行了比较大的改进,使仪器结构更加紧凑,性能更加先进。

目前,全世界处于正常工作状态的电子束离子源和电子束离子陷阱共有8台。尽管两者在外观结构上有比较大的区别,但它们的主要设计原理是一致的。电子束离子陷阱的工作原理如图1所示。

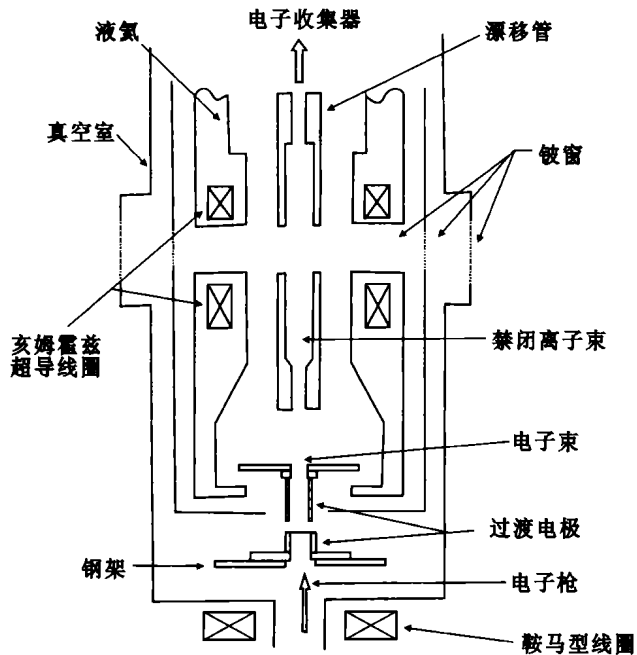


图1 电子束离子陷阱结构原理图

Fig.1 Configuration sketch of EBIT

仪器结构的关键部分是禁闭离子束的电磁场陷阱(电子束离子源与电子束离子陷阱相同),也叫离子陷阱,即仪器在金属圆柱形的漂移管内形成的轴向、

径向两个方向的电磁场。径向陷阱由电子束空间电荷电场和外磁场共同形成,轴向陷阱是由作用在电子束穿过的金属圆柱形漂移管上的电场或磁场产生。其中,静电场形成的陷阱深度通常为100~300 V。磁场陷阱的分布则不同,在电子束离子源中一般是4~5 T,在电子束离子陷阱中一般是3 T。正常工作时安装在仪器底部的电子枪发射出高能电子束,进入陷阱中并被亥姆霍兹超导线圈产生的磁场绝热地压缩,使其电流密度高达6000 A/cm<sup>2</sup>,电子能量达30~150 keV。陷阱内本底存在的低电荷态离子在如此高密度、高能量的电子束连续猛烈作用下,其核外电子将不断地被剥离、电荷态不断地升高。

为了形成高质量的电磁场陷阱,在电子束离子源中组成陷阱的漂移管有时多达10个,每个漂移管的外径为8 cm,内腔直径为5 mm。图1中所示的电子束离子陷阱的离子束漂移管中间部分的直径是10 mm,两端是3 mm。电子束离子陷阱或电子束离子源对漂移管内的电磁场陷阱工作条件要求很严格,陷阱内必须保证超高真空工作环境,在理想状态下,电子束离子陷阱漂移管内真空度<10<sup>-12</sup> Torr;管内轴向磁场分布需具有很高的稳定性和均匀度,阱内电子束也要保证高能量、高密度,它是决定慢速重离子最终电荷状态的关键因素。

进入陷阱、被高强度压缩的电子束一般采用层流电子枪来发射。电子枪安装在仪器的底端,发射电流在100 mA左右。也有使用LaB<sub>6</sub>阴极电子枪的,此时电流可达350 mA,甚至更高。

陷阱内被高度电离化的离子可以是注入的低电荷态离子,也可以是阱内气体电离后的离子。一般采用金属蒸汽真空电弧(MEVVA)产生低电荷态离子,它沿系统对称轴安装在电子收集器上方。当提取电压为10~60 kV时,离子束电流大于1 A,初始离子束直径约为2 cm左右。1986年Brown等人研制成功微金属蒸汽真空电弧(Micro-MEVVA)<sup>[15]</sup>,使整个微离子源直径只有1.5 cm,长仅为6 cm,当提取电压为15 kV时,离子束电流为15 mA,初始离子束直径只有1 mm。

电子束离子陷阱内的电子束收集器长20 cm,内径为9 cm,它的上方安装有离子束抽取器。抽取器电极上的电压相对于收集器一般为-2 kV左右,其作用一方面是阻止电子束逸出,另一方面是加速并提取离子束,使其逸出收集器。

电子束离子陷阱和电子束离子源涉及的关键技术有:(1) 超高真空工作环境。漂移管内真空度必须

维持在  $10^{-12}$  Torr, 这样的真空环境不但可以冷却离子, 维持其高电荷状态, 而且可以阻止高电荷态离子的退化。(2) 高亮度的电子枪产生高束流、高能量的电子束。当电子束进入漂移管陷阱内时被强烈地压缩, 形成电流密度高达  $10^3$  A/cm<sup>2</sup> 量级的电子束, 并对其中的低荷态离子进行连续撞击, 不断使其电离至高荷态离子。(3) 高精度的对中技术。电子枪、漂移管、收集器等部件必须精确地沿轴线方向安装。要求在电子束离子陷阱整个长度 2 cm 内, 轴向磁场的变化小于 0.02%; 在电子束离子源的总长 120 cm 内, 轴线偏差在 0.005 cm 内; 在中间段沿轴向磁场强度的变化范围控制在 0.1%, 陷阱内径向场的波动范围在 0.01%; 电子枪到陷阱的这段距离内, 机械安装轴线与磁场中心轴线的偏差应小于 0.003 rad。(4) 工作环境的维持与保证。漂移管、亥姆霍兹超导线圈等四周被液氦包围, 即它们的工作环境稳定温度是 4 K。

离子由低荷态向高荷态的变化取决于以下 3 方面的因素: 入射电子束的能量  $E$ , 漂移管内电子的密度以及离子被禁闭在陷阱内的时间长短。阱内离子具有的最高电荷态可以通过调节以上参数达到最佳状态。实验证明, 影响离子最终电荷态的 3 个因素中电子束具有的能量大小所起的作用最大。电子束离子陷阱对电子束离子源的改进主要体现在: (1) 电子束离子陷阱内的离子具有的最高电荷态高于电子束离子源内离子所具有的最高电荷态; (2) 在电子束离子陷阱内, 离子保持高电荷态的时间可以长达 5 h, 远远大于在电子束离子源内离子维持高荷态的时间等。

## 2 X 射线的产生

在电子束离子陷阱或电子束离子源的漂移管内积聚有大量的重离子, 这些重离子连续不断地受到高密度、高能量的电子束轰击, 核外电子不断地被剥离, 电荷态不断提高, 能量也不断提高, 最终被提取器抽取。如果将提取器抽取的这些高荷态重离子引导至金属箔靶, 离子束与靶面相互作用就可以复合辐射一定波长的特征 X 射线。

复合辐射是指当自由电子被  $n$  次电离的原子(即离子)所俘获, 俘获了电子的离子跃迁到  $(n-1)$  次电离原子的束缚态, 而被俘获电子的多余能量以及原子的电离能以光子形式发射出来。

离子束和金属箔靶相互作用, 在靶表面和内部将发生复杂的多种物理反应, 使许多不同类型的粒子从表面逸出, 这些粒子有背散射离子、二次离子、电子、X 射线光子等, 依其不同的物理机理, 它们出射的几

率不同。其中, X 射线的激发截面与电子束与物质相互作用激发特征 X 射线的几率相当, 但本底韧致辐射大大减小。当重离子慢速入射时, 虽然会对靶面带来不利, 但 X 射线激发截面将会非常大。

高荷态的离子与金属箔靶作用复合辐射的 X 射线主要是特征 X 射线。入射离子对靶面材料原子内层电子的激发截面可由离子与电子间的 2 体碰撞理论计算。其中, K 层的激发截面是<sup>[16]</sup>

$$\sigma_K(E_P) = Z_P^2 \cdot \frac{1}{E_K^2} \cdot f\left(\frac{m_e E_P}{M E_K}\right) \quad (1)$$

式中,  $Z_P, M$  分别是入射离子的电荷数和质量;  $E_K, m_e$  分别是电子的束缚能和质量;  $E_P$  是入射离子的能量。其它壳层的碰撞截面大小由(1)式乘以相应壳层总电子数与 K 层电子数的比值可得到。

入射金属箔靶表面的离子数越多, 复合辐射特征 X 射线的质量就越高。在电子束离子陷阱或电子束离子源中, 电荷态离子的提取产额主要由以下几种因素决定: 从背景气体中冷却离子的有效性, 由于背景气体污染、电荷改变等导致离子高电荷状态的退化率, 高荷态离子引起的电子束电荷中和等。

利用慢速高电荷态重离子束入射金属靶面产生 X 射线, 突破了传统电子束 X 射线源的限制, 其优越性可以简单地归纳为:

1) 离子束与靶面材料相互作用, 复合辐射 X 射线的产额高达 5%, 甚至更大。(与之相比较, 电子束撞击阳极靶面产生 X 射线时常用的 X 射线光管的辐射产额在  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  量级, 并且阳极发热现象是一个很严重的问题)。

2) 不同于 X 光管产生的 X 射线光谱, 含有韧致谱线; 离子束与靶材料复合辐射的 X 射线光谱完全由入射离子的特征谱线组成。

3) 慢速高荷态重离子束与箔靶表面作用范围以及散射效应与电子束与箔靶表面作用相比要小得多。事实上, 离子的辐射去激放电仅仅发生在箔靶表面几 nm 范围内。

4) 选择合适的人射慢速高荷态离子束种类, 可以获取所需波段的 X 射线, 其光子能量可高达 100 keV。

## 3 微细束斑 X 射线的产生<sup>[17]</sup>

微细束斑 X 射线源在工业、材料、医疗、自然科学等方面的应用与研究中有更为现实的需求。由于慢速高电荷态重离子束与金属靶面相互作用产生的 X 射线有多方面的优点, 因此, 如果利用其产生细微束斑

X射线将非常有意义。将慢速高电荷态重离子束通过光学系统聚焦成微米甚至更小的细微束,然后再与金属箔靶表面作用,复合辐射出的特征X射线束斑更小,可达微米级,甚至纳米级。

会聚离子束的离子光学系统结构如图2所示。其中2个四电极透镜和2个小孔光阑组合成会聚系统的

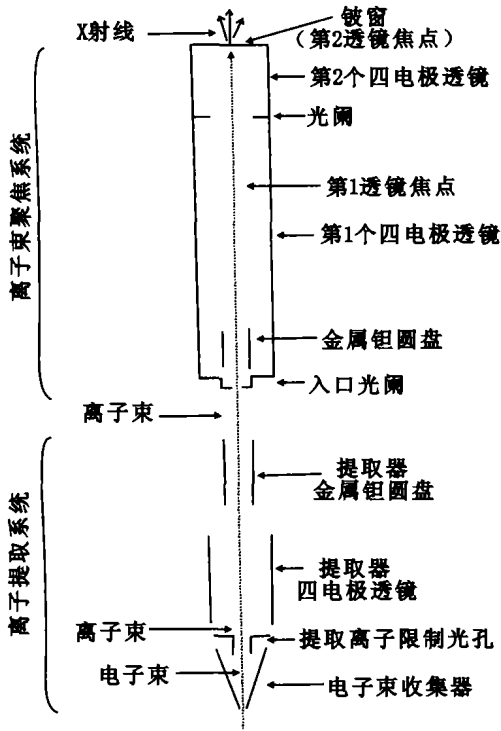


图2 离子束聚焦系统原理图

Fig. 2 Configuration sketch of ion beam focusing system

主体。2个四电极透镜对离子束进行压缩聚束,聚束效果决定于离子束所具有的初始能量以及2个四电极透镜的聚焦能力。入口光孔决定被会聚离子束束斑的最初大小和位置,它由1个中间有直径为0.5mm小孔的金属钽圆盘构成。第2个四电极透镜前放置的小孔光阑主要是限制离子束的离散,因为伴随透镜聚焦能力的提高,离子束焦斑的像差也会急剧增加。

聚束系统的体积大小主要取决于两个小孔光阑的位置距离。

#### 4 慢速高荷态重离子束微束斑X射线源的特点

早期人们研制电子束离子陷阱与电子束离子源的目的主要是利用它们在产生高荷态离子的过程中辐射出X射线。人们通过对X射线光谱的探测、分析,研究高电荷态离子的内部结构、运动过程、变化机理等物理现象与物理规律。此外,也利用它为粒子加速器,尤其是同步加速器提供高电荷态离子束<sup>[18~20]</sup>。

抽取电子束离子陷阱或电子束离子源内的慢速

高荷态重离子束,将其会聚成微米级,甚至更小的束斑后再与金属箔靶复合产生X射线。与电子束X射线源等相比较,除了前面讲过的特点外,还有慢速高荷态重离子束产生的微细束斑X射线,仅包含入射箔靶的离子束特征谱线。谱线干净,谱线仅由入射离子的类型和所带电荷状态决定。而聚焦电子束轰击箔靶产生的微束斑X射线谱含有韧致谱线,并且X射线谱线由靶面材料和入射电子能量等共同决定。更为重要的是慢速高荷态离子束产生的微细束斑X射线亮度很大。从下面的统计数字可以看出,在漂移管中处于陷阱中的电子数数目可达 $2.5 \times 10^8$ ,它们使低荷态离子或背景气体的离子达到高荷态的离子数多达 $3.5 \times 10^6$ ,并且离子束在箔靶表面复合为X射线的产额大于5%,复合过程中不存在靶面严重发热等问题。

利用慢速高荷态重离子束产生的微细束斑X射线有广泛的应用<sup>[21]</sup>。比如,在生物物体的显微成像中目前已经取得的最好的图像分辨率为 $20 \mu\text{m}$ ,X射线光子能量为3keV。如果改进电子束离子陷阱(电子束离子源)的相关部件,减小慢速高荷态离子束的束斑,将大大提高所成图像的分辨率。若忽略慢速高荷态离子在箔靶表面的扩散,甚至可以得到具有衍射极限的X射线成像分辨率。伴随新技术的不断发展和采用,利用慢速高荷态重离子束产生微细束斑X射线的质量将会更高、效能将会更好,其应用前景将会更广阔。

#### 参考文献:

- [1] A Pogany, D Gao, S W Silkins. Contrast and resolution in imaging with a microfocus X-ray source[J]. Rev Sci Instrum, 1997, 68(7):2774-2782.
- [2] F H Seguin, P Burstein, P J Bjorkholm, et al. X-ray computed tomography with  $50 \mu\text{m}$  resolution[J]. Appl Opt, 1985, 24(23):4117-4123.
- [3] J Lehr, J B Sibarita, J M Chassery. Image restoration in X-ray microscopy: PSF determination and biological applications[J]. IEEE Trans on Image Proce. 1998, 7(2):258-263.
- [4] W Ehrenberg, W Spear. An electrostatic focusing system and its application to a fine focus X-ray generator[J]. Proc Phys Soc, 1951, B64(5):374-378.
- [5] 伊. 皮涅斯(前苏联)著, 何举译. 细聚焦X射线管及其在结构分析中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1963.
- [6] Wang kaige, Niu hanben. Study of the X-ray source with micro-beam[J]. SPIE, 4224:101-104.
- [7] 王凯歌, 牛憨笨, 等. 微束斑X射线源的边界元法(BEM)分析[J]. 光电子·激光, 2001, 3. (下转第38页)

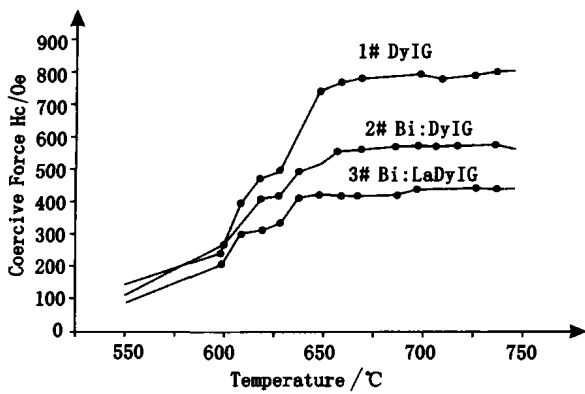


图5 磁光晶体的矫顽力随晶化温度的变化曲线

Fig. 5 Variation of coercivity with crystallized temperature in MO crystal

Oe 之间。为了使晶体形成较完全,并取得最大法拉第效应,晶化温度一般取650 C,故该晶体材料的矫顽力在350~600 Oe 之间。根据通电螺线管中磁场公式

$$H = \mu_0 n i \quad (7)$$

取  $H = 600 \text{ Oe}$ ,  $n = 10 \text{ 匝}$ ,  $\mu_0 = 15$ , 则脉冲电流  $\leq 4 \text{ A}$ 。考虑磁光晶体的磁滞效应为  $\mu\text{s}$  量级,其光纤开关激发脉冲如图6 所示。

### 3 结束语

本文对磁光晶体应用于光纤无源开关中的具体

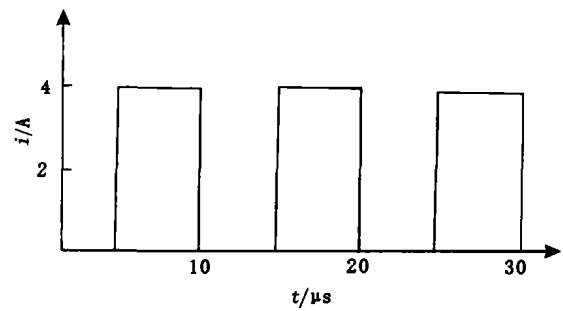


图6 光纤开关激发脉冲

Fig. 6 Excitation pulse in fiber switch

参数进行了理论和实验研究,发现掺Bi的DyIG磁光薄膜材料可作为磁光开关晶体应用于0.5~1.5  $\mu\text{m}$  波长范围,光纤开关可用小于4 A,脉冲宽度为5  $\mu\text{s}$  的脉冲电流作驱动力。

#### 参考文献:

[1] M Abe, G Gomi. Mo recording on garnet films[J]. J Magn Mater, 1990,84:222-228.  
 [2] J P Krumme. Bismuth substituted iron garnet films prepared by RF diode sputtering[J]. IEEE Trans Mag, 1984,20:983-985.  
 [3] M Abe, M Gomi. Oxide films for MO applications[J]. J Magn Soc Japan, 1987,11:299-304.  
 [4] J L Deschanvers. Growth of Bi-substituted YIG thin films for MO applications[J]. J M M M, 1991, 101: 224-228.

(上接第8页)

[8] E D Donets. Electron beam ion sources and associated physics at JINR[J]. Nucl Instrum Methods, 1985, (B9):522-525.  
 [9] J P Briand, P Charles, J Arianer, et al. Observation of the KLL dielectronic recombination in highly stripped argon ions[J]. Phys Rev Lett, 1984, (8):617-620.  
 [10] R W Schmieder, C L Bisson, S Haney, et al. San-dia super-EBIS[J]. Rev Sci Instrum, 1990, 61(1): 259-261.  
 [11] R E Marrs, M A Levine, D A Knapp, et al. Measurement of electron-impact-excitation cross section for very highly charged ions[J]. Phys Rev Lett, 1988, (17):1715-1718.  
 [12] M A Levine, R E Marrs, J N Bardsley, et al. The use of an electron beam ion trap in the study of highly charged ions [J]. Nucl Instrum Methods, 1989, (B43):431-439.  
 [13] E Beebe, J Alessi, A Herscovitch, et al. Development of an electron-beam ion source for a relativistic heavy-ion collider preinjector[J]. Rev Sci Instrum, 1996,67(3):878-880.  
 [14] D Schneider, D DeWitt, M W Clark, et al. Ion-collision experiments with slow, very highly charged ions extracted from an electron-beam ion trap[J]. Phys Rev, 1990, A42(7):3889-3895.  
 [15] I G Brown, J E Galvin, R A MacGill, R T Wright. Miniature high current metal ion source[J]. Appl Phys Lett, 1986,49(20):1019-1021.  
 [16] 姚宗熙,郑等修,封学民,等.物理电子学[M].西安:西安交通大学出版社,1991.  
 [17] R E Marrs, D H Schneider, J W McDonald. Projection X-ray microscope powered by highly charged ions [J]. Rev Sci Instrum, 1998,69(1):204-209.  
 [18] P Beiersdorfer, A L Osterheld, M H Chen, et al. Indirect X-ray line formation processes in highly charged barium[J]. Phys Rev Lett, 1990, 65:1995-1998.  
 [19] J R Henderson, P Beiersdorfer, C L Bennett, et al. Polarization of X-ray lines from heliumlike scandium as a probe of the hyperfine interaction[J]. Phys Rev Lett, 1990,65:705-708.  
 [20] D Schneider, M W Clark, B M Penetrante et al. Production of high-charge-state thorium and uranium ions in an electron-beam ion trap[J]. Phys Rev, 1991, A44(5):3119-3124.  
 [21] J V Porto, I Kink, J D Gillaspay. Direct imaging of highly charged ions an electron beam ion trap[J]. Rev Sci Instrum, 2000,71(8):3050-3058.