

电子束与靶作用产生的回流离子诊断方法初步研究^{*}

程 健^{1,†} 张永合¹ 禹海军² 胡绍忠¹

(1 中国科学技术大学 合肥 230027)

(2 中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

摘 要 文章分析和介绍了国际上回流离子诊断的必要性和方法. 针对回流离子主要参数(密度、运动速度、种类等)测量的需要, 具体介绍了激光干涉测量法、法拉第筒测量法、Langmuir 探针测量法、固体径迹测量法的基本原理、特点和局限性, 并进行了具体实验方案的设计和可能实验结果的分析计算, 其中提出了基于探针测量法测量回流离子的基本思想和实现方案. 文章作者基于信息融合技术的基本思想, 在对上述有关离子特性测量方法进行具体分析的基础上, 提出了一个综合诊断方案, 并对可能的结果进行了估计.

关键词 电子束, 靶, 回流离子, 激光干涉, 法拉第筒, 固体径迹探测器, Langmuir 探针, 诊断

Diagnostics based on back-streaming ions produced in beam-target interactions

CHENG Jian^{1,†} ZHANG Yong-He¹ YU Hai-Jun² HU Shao-Zhong¹

(1 *University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

(2 *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

Abstract The need for back-streaming ion diagnostics is addressed, and various experimental methods for its implementation are reviewed. With regard to the main parameters that must be measured (density, velocity, type, and so on), the basic principles, characteristics and limitations of specific methods based on laser interferometry, Faraday cups, Langmuir probes and solid track detectors are analyzed in detail. Their design and the calculation of possible experimental results are described, with particular emphasis on the measurement of back-streaming ions using Langmuir probes. Based on information fusion technology and analysis of the above-mentioned methods, an integrated diagnostic scheme is proposed, and an estimate given of the results that may be expected.

Keywords electron beam, target, back-streaming ions, laser interferometer, Faraday cup, solid track detectors, Langmuir probes, diagnoses

直线感应加速器能够将高能、强流的电子束聚焦成毫米量级的束斑. 如果将这种极高能量密度的电子束打击到韧致辐射靶上, 会产生高剂量的 X 射线^[1]. 但同时, 由于电子束与韧致辐射靶的相互作用, 使电子束聚焦在靶表面毫米量级的局部区域, 因而在此区域沉积的能量密度极高, 会使靶物质蒸发. 蒸发物质的运动方向与电子束的方向相反, 正好与入射的电子束相互作用, 产生回流离子(中性粒子、等离子体、离

子或其混合物). 电子束在等离子体中的运动路径与在真空中是不相同的, 而电子束的聚焦状态是按电子束在真空状态下设计的, 电子束打靶产生的等离子体会使电子束在韧致辐射靶的前面聚焦, 从而导致原定

^{*} 国家自然科学基金委员会—中国工程物理研究院联合基金(批准号:10576032)资助项目

2009-12-22 收到

[†] 通讯联系人. Email:chengj@ustc.edu.cn

在靶面上的焦斑半径变大^[2,3]. 而且由于电子束所产生的等离子体的参数随电子束作用时间长短而变化, 例如, 离子的种类、离子的密度和温度等随时间变化, 使得电子束的焦斑的大小也随时间变化, 从而会降低 X 射线的成像品质. 因此, 要获得优良品质的 X 射线成像, 就必须研究电子束与靶相互作用产生的回流离子的有关参数. 通过回流离子的这些参数及其随时间的变化来了解影响电子束聚焦的因素, 从而找到克服影响聚焦的办法.

电子束是纳秒级的短脉冲, 束等离子体产生后就会按照等离子体自身的基本规律运动. 我们诊断等离子体有关参数, 必须按照等离子体的运动规律来进行. 例如, 束等离子体在产生之时是一团浓密的等离子体, 我们可以采用激光干涉的方法诊断它的密度^[4]和离子的运动速度^[5]; 束等离子体在产生之后会向四周扩散, 采用法拉第筒可以接收到等离子体扩散时的离子流, 从而反推束等离子体的有关参数^[6], 也可以通过信号处理如相关的分析方法来获得离子束的参数^[7]; 在文献^[8]中还介绍了通过高速成像结合法拉第筒来获得有关参数的方法. 因此, 结合实用的诊断设备, 利用实验研究的方法, 通过信号处理的手段获得回流离子(等离子体)的性能参数, 如离子种类、离子运动速度、离子密度, 从而对束靶作用区的回流离子进行诊断研究.

1 回流离子诊断方法及其特点

对于空间离子的特性, 一般的诊断方法有: 采用激光干涉的方法来获得空间离子的密度分布; 利用法拉第筒获得电子或离子的密度和运动速度信息; 利用固体径迹的方法来了解离子的种类和能量特性; 也可以采用 Langmuir 探针测量离子的密度, 但因回流离子持续的时间很短, 需要在传统测量方法的基础上进行改进.

1.1 电子束与靶参数

我们所研究的对象是单脉冲直线感应加速器. 电子束在聚焦之前的直径约 20mm, 经过聚焦后, 在到达靶表面位置时, 其聚焦后的直径收缩为约 2mm. 对应于 20MeV 的设计指标, 电子束的束流强度为 2.5kA, 持续时间约 80ns. 靶材采用钽, 由 40 层 0.03mm 厚的钽薄片层叠夹紧制成.

1.2 激光干涉成像法

激光干涉法是等离子体诊断的一种有效方法. 激光辐射单色性好, 相干长度长, 光强强, 发散角小,

是一种理想的相干光源. 随着激光器的发展, 已经有不同波长的激光器可以作为干涉仪的光源, 因此激光干涉仪可以测定的离子密度范围很宽. 基于等离子体集团运动的物理图像描述回流离子的物理原理, 可以采用激光干涉法来诊断回流离子的特征.

激光干涉实验原理图如图 1 所示.

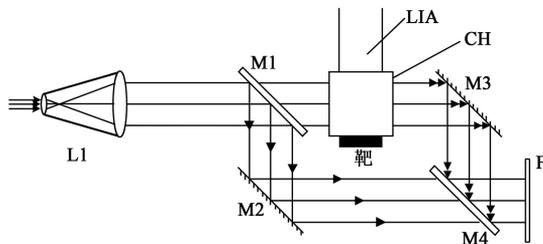


图 1 激光干涉法诊断回流离子原理图(其中 M1, M4 为半透半反镜, M2, M3 为全反射镜, L1 为扩束镜, LIA 为直线感应加速器, CH 为加速器靶前的窗口, F 为高速分幅 CCD 相机镜头)

其工作原理为: 先把一束激光扩束后用光学仪器分成两束, 形成相干光, 然后汇聚形成干涉条纹, 作为背景条纹; 再开动加速器, 聚焦强流脉冲电子束打靶, 形成回流离子, 使得其中一束光通过回流离子, 因光程发生变化, 导致最后的干涉条纹发生变化, 这就是动态干涉条纹. 背景条纹与动态干涉条纹都是通过高速分幅 CCD 相机拍摄出来, 得到条纹的变化在激光截面上的二维分布.

在激光截面上, 条纹移动的数目与回流离子密度间的关系满足下面公式:

$$\delta(r, \theta) = -4.48 \times 10^{-27} \lambda_0 \int_0^l N_e(r, \theta, z) dz, \quad (1)$$

式中 r, θ 分别为等离子体截面上的径向坐标和极坐标, λ_0 为入射光波长, 单位为 nm, 负号表示回流离子密度增加时干涉条纹级次变低.

通过设定分幅相机采样的时间间隔, 可拍得一系列时间点上的干涉条纹图像. 由连续时间点的多幅干涉条纹图像及激光截面单幅干涉条纹图像上离散的条纹移动数目, 采用公式(1)进行计算, 再通过曲线拟合, 就可以得到回流离子密度的时间与空间分布 $N_e(r, \theta, z, t)$.

1.3 法拉第筒测量法

法拉第筒的原理结构见图 2. 法拉第筒由中间绝缘材料隔离的内外两个金属筒构成, 根据测量对象的不同, 可在内外筒之间施加不同极性的高压.

在测量聚焦电子束打靶所产生的负离子密度时, 可采取外筒接地, 内筒接正高压的方法. 通过配合图 3 所示的测量电路, 就可以测出法拉第筒端口

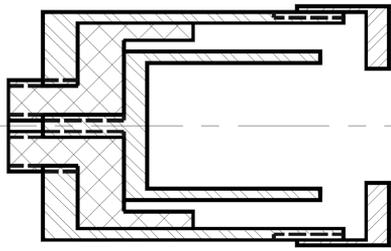


图2 法拉第筒结构示意图

的离子密度. 若测量正离子的密度, 则需外筒接地, 内筒接负高压. 法拉第筒的收集电流信号经负载电阻 R_4 和微分电路转换成电压信号 V_{out} , 通过信号电缆输入示波器.

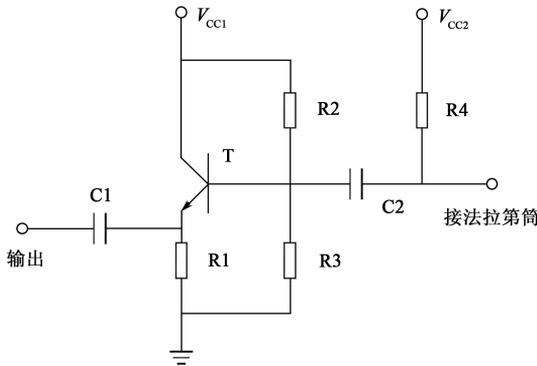


图3 法拉第筒测量电路

通过测量入射进法拉第筒的离子流 I_{in} 可推算被测点的等离子体密度 n_{in} . 入口处的等离子体密度与法拉第筒所测离子流 I_{in} 之间的关系为

$$n_{in} = I_{in} / Ae v \quad (2)$$

其中 A 为法拉第筒的入口面积, e 为电子电荷, v 为离子的速度.

设法拉第筒测量不受空间电荷限制流限制, 只存在单电荷离子, 离子的质量数为 M , 则离子的速度为

$$v = 1.561 \times 10^6 (T_i / M)^{1/2} (\text{cm/s}) \quad (3)$$

式中 T_i 为离子的能量 (eV). 法拉第筒工作电压选用 $V_{cc2} = -1000\text{V}$, 设电子束打靶产生的等离子体为 Ta 等离子体, 则 Ta 离子速度 $v = 4 \times 10^6 \text{cm/s}$.

所测离子流为

$$I_{in} = V_{out} / R \quad (4)$$

R 是等效负载电阻, 约 50Ω .

1.4 探针测量法^[9]

Langmuir 探针因其测量方法简单实用而在等离子体参数测量中获得了广泛的应用, 按照其使用形式的不同又分双探针和单探针. 它是通过在深入等离子体中的静电探针末端施加一锯齿波扫描电压, 测出回路中流过的电流大小, 从而获得伏-安曲

线, 根据该曲线及 Langmuir 探针测量理论, 即可算出等离子体中诸如电子、离子的温度和密度等有关参数. 典型的双探针测量曲线如图 4 所示.

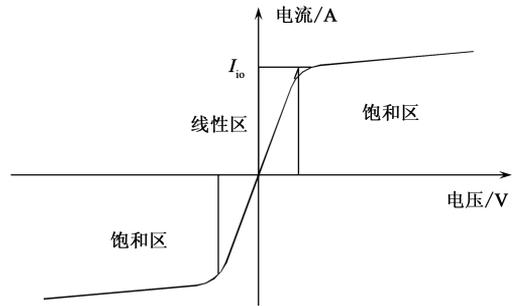


图4 Langmuir 双探针典型测量曲线

电子温度(单位: 电子伏特)可以表示为

$$kT_e = \frac{eI_{io}}{2 \frac{dI_D}{dV_D}} \quad (5)$$

式中 I_{io} 为饱和离子电流值, 对应过零点切线与饱和区切线的交点对应的电流值; e 为电子的电荷量, $e = 1.6 \times 10^{-19}$; $\frac{dI_D}{dV_D} |_{I_D=0}$ 为“伏-安”特性曲线过零点时的斜率.

电子密度 N_e (单位: 电子数/ m^3) 为

$$N_e = \frac{I_{io}}{0.61eS \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}} \quad (6)$$

式中 S 为探针截面积, 一般为裸露探针丝长度与其周长的乘积, 单位为 m^2 ; m_i 为被测等离子体中离子的质量, 等于工作气体原子量与氢离子质量的乘积; kT_e 为被测等离子体中电子的温度. 由 N_e 可得到离子密度 N_i (单位: 离子数/ m^3): $N_i = N_e / Z$ (Z 为单个原子内电子电荷数).

电子束打靶产生的回流离子持续时间很短, 一般仅几十 μs , 而且处于快速运动状态 ($1-3\text{mm}/\mu\text{s}$), 采用传统锯齿波扫描的方式是不合适的. 根据双探针测量曲线的特点, 若在线性区和饱和区分别取两个固定电压值的测量点, 在探针上施加固定的电压, 用高速示波器记录下该四组双探针上的电流波形, 则在每一时刻, 均可根据四组探针测得的电流值确定出饱和离子流和曲线过零点的斜率值, 从而计算出离子的密度. 上述方法只有满足以下假设条件才有效: 四组探针所在位置的等离子体的密度基本相等, 而且是一致变化的. 在实际打靶实验中, 对于一个均匀对称结构的靶而言, 基于束线对称分布测量探针, 上述假设应该是可以满足的.

1.5 固体径迹测量法^[10]

固体径迹探测技术是用不同能量的各种重带电

离子照射各种材料,并在不同蚀刻剂中进行蚀刻,然后观察其径迹,来获得离子特征参数的一种实验方法.只有辐射损伤密度大于某一数值时,这种离子的径迹才能被蚀刻,即各种探测器材料都存在确定的记录重带电离子阈值,此阈值只与材料的性质有关,而与离子的种类无关,不同的材料有不同的阈值.因此必须选择一种对所测量的离子种类灵敏的合适材料,经照射后才能达到蚀刻要求.

目前固体径迹法已经广泛地应用于核子学、固体物理学、地质学、化学、宇宙射线物理学、考古学、地质年代学、天文物理学,以及安全防护剂量学等领域,它具有很多优势.一定探测材料对应一定探测阈值,对于电子,甚至质子、 α 离子都不灵敏.

在利用固体径迹法测量电子束打靶产生的回流离子实验中,一般用得比较多的是由聚碳酸酯材料构成的 CR39 探测片,它具有不受低温、高温($100\text{ }^{\circ}\text{C}$)和紫外光辐照影响,并可耐 10^{-4} Pa 低压等方面的优点.

在国内外相关研究人员利用 CR39 片进行的一些实验中,通过实验设计和具体实验,将实验后的探测片,在一定时间内经过一定温度和浓度的 NaOH 溶液的蚀刻,再通过金相显微镜或电子显微镜的观测,可获得探测片的蚀刻径迹.对电子束打靶产生的回流离子探测而言,传统的一些固体径迹方法并没有获得满意的探测结果.

随着半导体技术的发展,利用半导体材料进行各种离子特性的探测已成为重要的发展方向并已得到了较为广泛的应用,如高能物理、天体物理实验中离子径迹的测量,核医学领域中数字影像的获取.

半导体探测器的特点是:好的位置和能量分辨率,线性范围宽,时间响应快,体积小和辐射硬度低等.

典型的半导体探测器是硅微条探测器,其制作工艺比较复杂,特别是应用于离子探测领域的,基本上是属于定做性质的,成本很高.

基于电子束打靶产生的回流离子特性和单晶硅材料的特点,我们考虑使用单晶硅片作为回流离子的检测片.对溅射有回流离子的检测片,采用能谱分析的方法,获得回流离子种类、密度等特征信息;通过多点采样分析,可以获得一定范围内的分布信息;通过分层分析,可以进一步获得离子的能量信息.

2 多信息融合技术及其应用

上述 4 种物理实验方法,每种方法只能给出整

个回流离子特性中的部分信息,要想充分了解回流离子的种类、运动速度、密度等特征参数,需要将上述 4 种方法所获得的实验结果进行综合分析,亦即融合处理.

在激光干涉加分幅相机所获得的系列干涉图像中,每一位置干涉条纹移动量的大小,反映的是激光束穿过整个回流离子区域空间及其密度分布积分的结果,在这里,区域空间大小及其密度分布均是未知的,显然,仅仅通过一种方法的实验结果是不能够确定多个未知量的.

通过法拉第筒测量系统给出的输出信号曲线,可以反映出法拉第筒所在测量点的离子密度随时间的变化.实验时,在同一平面的不同位置放置多个测量用法拉第筒,用多通道数字存储示波器进行多路信号的记录,对多路记录的信号进行分析,可以确定该平面内的离子密度分布及其随时间的变化,同时可以计算出离子的运动速度,但对于离子的种类和非离子的密度及其分布反映不出来.

探针测量与法拉第筒测量的作用类似,但探针的尺寸可以做得更小,两者的测量结果可以相互验证.

对溅射有回流离子的单晶硅片,采用能谱分析的方法,可以获得采样点打到硅片表面的回流离子种类、相对密度等特征信息.其中包括能够区分出离子和非离子相对比例的多少,但不能给出绝对值的多少.

显然,上述 4 种测量方法有各自的特点和局限性.假定回流离子全部打到单晶硅检测片上,且每次的实验结果基本上是一致的,将单晶硅检测片的能谱分析结果与法拉第筒的测量结果进行对照分析,我们可以给出在整个回流脉冲周期内确定截面上回流离子的时间积分分布,但不能给出时空分布.要给出回流离子的时空分布,还需结合干涉图像中干涉条纹的移动信息,同时假定离子的时空密度是按照法拉第筒的测量结果分布的,非离子的时空密度是综合单晶硅检测片的能谱分析结果与法拉第筒测量结果的时间积分分布的.

3 综合实验方案的设计

针对上述实验研究工作的要求,要想在一次实验中同时进行多种不同实验方法的实施,需要针对具体研究对象的结构特点,进行实验方案的合理设计工作.

图 5 是直线感应加速器束靶作用区的结构示意图,要同时采用多种方法测量回流离子的特征参数,

除了考虑物理特性的测量要求,还需要兼顾现有设备结构的允许能力.经直线加速到达聚焦线圈作用区的高能电子束束径约 20mm;聚焦后至焦点位置,理想情况下,束径 < 2mm;聚焦线圈轴向中心距焦点距离为 270mm,而接管的内径仅为 60mm.

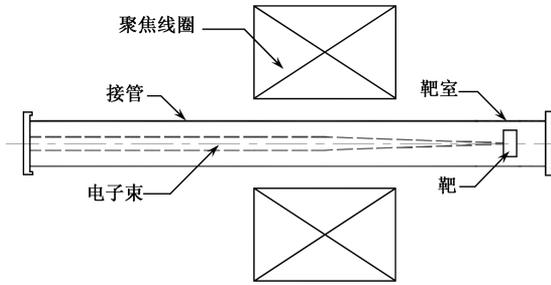


图5 直线感应加速器束靶作用区结构

激光干涉法测量等离子体(或离子)密度的下限约为 10^{21} m^{-3} ,首先需要了解电子束打靶后在束靶作用区产生的回流离子的密度特性,其次再进一步了解其他区间的回流离子的密度特性,因此激光干涉测量的窗口应选择在束靶作用区位置.

电子束打靶后,受靶面的限制,靶材在瞬间经历溅射、蒸发、电离、回流乃至复合等各种过程后,各种离子在整个半球空间内向外散射,法拉第筒的测量口需正对打靶的聚焦点,才能对某一确定散射角度的回流离子进行测量,同时不能对正向电子束产生干扰.基于图5的结构,法拉第筒只能考虑摆放在聚焦线圈的左右位置.若在左侧,影响聚焦线圈的拆装,可测量的回流离子散射角度很小,而且离子的渡越时间超出了研究工作所关注的范围;若在右侧,则要灵活得多,但离子的信号很强.

Langmuir 探针测量等离子体(或离子)密度范围一般在 $10^{16} - 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 之间,对于脉冲等离子体,密度可以更高些,而这正好弥补激光干涉测量范围的不足部分,同时可以与法拉第筒测量结果相互验证.由于探针头尺寸可以做得比较小(不大于 5mm),因此可以通过可调节的卡环固定在靶前的任意位置.

固体径迹测量片若单独使用,可固定在靶前的任意位置;若与其他测量手段同时使用,则以不能影响其他测量手段的使用为前提.

基于上述设计思想的综合实验方案设计结构如图6所示,其中激光干涉测量窗口在靶室的左右位置;法拉第筒测量采用组合结构,可实现对多点的同时测量,通过靶室前端上下窗口放置,并可根据测量需要进行具体测量点位的调整;固体径迹测量片可根据测量目的,固定在激光干涉测量窗口以外的位置,若与法拉第筒同时使用,则需放置在法拉第筒前

端,以免遮挡法拉第筒,当然在这种方案中,法拉第筒会对固体径迹测量产生局部遮挡效应,但不会影响主要测量效果.

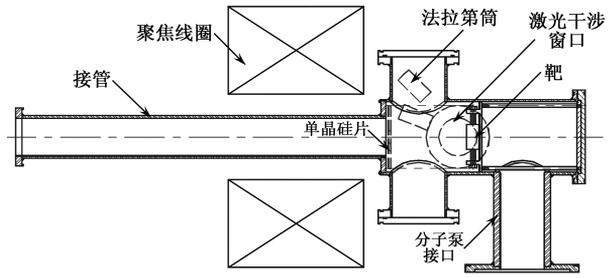


图6 综合实验方案设计结构

参考文献

- [1] 石金水,刘承俊,邓建军等.强激光与离子束,1996,8:209[Shi J S,Liu C J,Deng J Z *et al.* High Power Laser and Particle Beams,1996,8:209(in Chinese)]
- [2] Sampayan S *et al.* Experimental investigation of beam optics issues at the bremsstrahlung converters for radiographics applications. In:Proc.1998, Linear Accelerator Conf, 1998
- [3] Houck T,McCarrick J,LLNL *et al.* The effect of trapped backstreaming ions on beam focus and emittance in radiographic accelerators. In:Proceedings of the 1999, Particle Accelerator Conference, New York,1999. 2755-2757
- [4] Sampayan S, Buckles R, Caporaso G *et al.* Beam-target interaction experiments for bremsstrahlung converter applications. In:Proceedings of the 1999, Particle Accelerator Conference, New York,1999. 1303-1305
- [5] Woodcock B K, Freearge T G M, Hancock G. Laser measurements of ion velocities in plasmas. The Institution of Electrical Engineers,25 Feb. 1997. 1-3
- [6] Guethlein G, Houck T, McCarrick J *et al.* LLNL, Livermore, CA 94550, USA, Faraday Cup Measurements of Ions Backstreaming into a Electron Beam Impinging on a Plasma Plume,XX International Linac Conference, Monterey, California,1999
- [7] Artimov A S. Correlation method of measurements of ion beam parameters. In: Proceedings of the 1993, Particle Accelerator Conference, 17-20 May 1993. 2169-2171
- [8] Sampayan S,Buckles R,Caporaso G *et al.* Beam-target interaction experiments for multipulse bremsstrahlung converter applications. In:Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago,2001. 330-332
- [9] 项志遛,俞昌旋.高温等离子体诊断技术(下册).上海:上海科学技术出版社,1982[Xiang Z L, YU C X. High Temperature Plasma Diagnostic Technology, (Volume II). Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1982(in Chinese)]
- [10] 谢一冈,陈昌,王曼等.离子探测器与数据获取.北京:科学出版社,2003. 7[Xie Y G, Chen C, Wang M *et al.* Particle detector and data gain. Beijing:Science Press, 2003. 7(in Chinese)]