

文章编号: 1007-4627(2002)02-0281-04

## HIRFL-CSR 实验环内靶系统\*

蔡晓红, 卢荣春, 曹柱荣, 杨 威, 马新文, 詹文龙

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

D. K. Torpikov, D. Nikolenko

(俄罗斯新西伯利亚 Budker 核物理研究所, 630090)

**摘 要:** 兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的内靶系统, 是用于为实验环内的物理实验提供厚度为  $10^{11}$ — $10^{13}$  atoms/cm<sup>2</sup> 的团簇靶和极化靶. 采用超声喷气技术获得团簇粒子束, 采用 Stern-Gerlach 方法获得极化氢束和极化氘束.

**关键词:** 重离子冷却储存环; 内靶; 团簇; 极化原子束

**中图分类号:** O562 **文献标识码:** A

### 1 引言

在储存环中, 离子束以大约每秒  $10^6$  圈的速度在环内循环运动. 在内靶处, 离子束打靶后将受到散射, 产生一定的角度离散, 并损失能量. 通过与电子冷却装置中高品质电子束的共向运动, 打靶后离子束的角度离散和能损得到补偿, 从而可以继续在内环运动. 离子束轰击内靶的频率即等于离子束在环内的循环频率——每秒  $10^6$  圈. 储存环的内靶实验具有如下特点<sup>[1]</sup>:

(1)高亮度 亮度正比于靶厚、环内离子数和打靶频率. 每秒  $10^6$  圈的打靶频率是储存环内物理实验独有的优点, 为高亮度实验提供了保证.

(2)高精度 内靶的本底真空度在  $5 \times 10^{-9}$  Pa, 为进行高精度物理实验创造了条件.

(3)高灵敏度 高亮度和超薄的内靶为探测小几率事件和较重的碰撞产物提供了可能.

(4)可方便地进行各类符合测量, 研究相关物理事件.

(5)可用于产生和制备处于某一特定激发态的离子束, 为态相关的碰撞研究提供了条件.

内靶装置是兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)实验环的一个重要插入件, 它位于实验环的一个直线段. 为满足不同物理实验的需

求, 内靶可以有两种工作模式: 非极化靶运行模式和极化靶运行模式, 分别为实验环内的物理实验提供厚度为  $10^{11}$ — $10^{13}$  atoms/cm<sup>2</sup> 的非极化靶和极化靶. 非极化靶是一个团簇靶, 用于获得包括氢、氮、惰性气体和甲烷等小分子的气体薄靶. 极化靶采用 Stern-Gerlach 方法<sup>[2]</sup>获得极化氢束和极化氘束, 通过优化六极磁场的梯度分布及其它相关参数, 在碰撞点处, 极化内靶能达到  $2 \times 10^{11}$  atoms/cm<sup>2</sup> 的厚度, 极化氢束的极化度可达到 +0.90 或 -0.90, 极化氘束的矢量极化度可达到 +0.95 或 -0.95.

本文将阐述 HIRFL-CSR 实验环内靶系统的设计、技术参数、泵的选择以及真空系统的布局等.

### 2 内靶的设计

除了必须为实验探测器留有足够大的空间, 以满足大立体角探测的需要之外, 实验环的内靶系统还必须满足如下 3 个条件: 内靶系统的运行不能破坏实验环的本底真空度  $5 \times 10^{-9}$  Pa; 所布局的差分抽气系统不能影响环的接收度; 内靶必须能够承受大功率束流的连续轰击. 上述 3 个条件中, 对内靶限制最为苛刻的是 UHV 真空环境和大功率束流的连续轰击. 后一因素排除了采用薄膜靶作为储存环内靶的可能性.

收稿日期: 2002-03-13; 修改日期: 2002-03-20

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10134010); 德国科技部 WTZ 国际合作项目

作者简介: 蔡晓红(1965-), 女(汉族), 重庆人, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事原子物理实验研究.

由于上述限制, HIRFL-CSR 内靶系统采用了超声喷气原子束技术. 该内靶为一个与离子束运动方向相垂直的一个原子束, 其产生装置包括喷气级、靶室和收集级(见图 1). 喷气级用于产生原子束, 靶室用于离子束与原子束进行碰撞, 收集级用于收集原子束, 防止气体回流. 对于团簇靶, 其喷气级是一个团簇粒子束源, 而极化靶的喷气级则是一个极化原子束源. 在 HIRFL-CSR 内靶系统中, 喷气级可以互换, 改变内靶运行模式时, 只需要更换喷气级. 团簇靶和极化靶公用靶室和收集级. 为了在线监测极化模式运行时原子束的极化度, 在收集级末端还放置了一台极化计. 图 1 是团簇靶的装置图, 当需要改变为极化靶运行模式时, 只需将图 1 中的团簇粒子束源更换为极化原子束源.

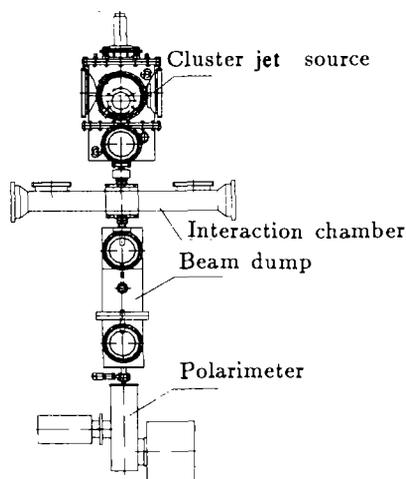


图 1 团簇靶装置图

## 2.1 团簇靶

目前国际上有多台团簇内靶正在运行<sup>[3]</sup>, 比如, 安装在德国 Jülich 的 COSY-11 质子储存环上<sup>[4]</sup>和安装在瑞典 CELSUS 储存环上的团簇内靶. 团簇内靶的原理是将气体在喷嘴内部的扩散过程控制在适当的温度, 从而形成团簇粒子束. 一般情况下, 单个团簇颗粒中包含有  $10^3$ — $10^4$  个原子.

团簇靶的喷气级包括 1 个喷嘴及 4 个孔径不同的准直光栏(skimmer). 喷嘴与第一个光栏构成差分抽气系统的第一级, 第一个光栏与第二个光栏构成差分抽气系统的第二级, 第二个光栏与第三个光栏构成差分抽气系统的第三级, 第三个光栏与第四个光栏构成差分抽气系统的第四级.

一定压力的靶气体充入喷嘴, 喷嘴外部为真

空, 在喷嘴内部, 气体原子逐渐得到加速, 将喷嘴冷却到适当温度, 将形成团簇粒子. 为了达到理想的团聚效果, 喷嘴的温度应等于给定气压下气体饱和蒸汽所对应的温度. 采用 GM 制冷机可以将喷嘴冷却到所需的温度, 温度可以在 10—300 K 的范围内变化. 一般情况下, 气流量为  $1\ 000\ \text{Pa} \cdot \text{l/s}$  时, 可以获得比较理想的团聚效果. 由于团簇粒子的质量较大, 忽略团簇粒子与残余气体碰撞引起的衰减, 团簇粒子束的强度分布可以表示为

$$\frac{dI}{d\Omega} = \frac{\Omega}{\pi \cdot \text{tg}\theta^2},$$

这里  $\theta$  是团簇束的张角. 根据上式我们可估算出, 当气流量为  $1\ 000\ \text{Pa} \cdot \text{l/s}$  时, 在距离喷嘴 60 cm 处可以获得厚度大约为  $10^{13}\ \text{atoms/cm}^2$  的团簇束.

团簇靶可用于获得包括氢、氮、惰性气体和甲烷等小分子的气体薄靶, 靶的厚度一般在  $10^{13}\ \text{atoms/cm}^2$  量级.

## 2.2 极化靶

获得极化原子束的方法一般有两种, 一种方法是在多极磁场(如四极场、六极场等)中进行态选择, 另一种方法是利用光学泵浦技术<sup>[5]</sup>进行态选择. 多极磁场选择方法是运用 Stern-Gerlach 原理将不同磁量子数的原子相互分开, 同时附加适当频率的交变场, 以实现向所需量子态的跃迁. 这种方法可以获得纯度很高的高极化度极化原子束. 目前运行的极化原子束源大多都利用多极磁场选择方法. 俄罗斯科学家在电子储存环 VEPP-3 上首先成功地将极化原子束作为储存环的内靶, 在此之后, 美国印地安那 IUCF 储存环以及荷兰 NIKHEF 的 AmPS 储存环也先后使用了极化原子束内靶<sup>[2]</sup>. 极化内靶已成为电子储存环上研究强子结构及其相互作用的重要工具. HIRFL-CSR 的极化内靶将采用多极磁场选择方法, 它将是目前国际上第一台安装在重离子储存环上的极化原子束内靶.

当原子处于磁场中时, 其能级的简并将部分或完全消除, 从而发生精细结构劈裂. 如果在外加磁场的同时, 再施加一个 RF 交变电场, 当交变电场的频率满足关系

$$\omega = \frac{E_j - E_i}{\hbar}$$

时, 可以发生从精细结构能级  $E_i$  向  $E_j$  的跃迁. 采用

上述原理, 我们可以选择出所需状态的极化原子束. HIRFL-CSR 极化内靶也采用了这样的原理(见图 2). 在图中, 黑矩形块表示原子束的状态, 左侧第一列表示初始状态的原子束是不同状态的混合(总磁量子数  $m_1 = -1, 0, +1$ ), 不表现出极化. 采用一组六极磁铁, 可以将电子磁量子数  $m_e$  不同, 但  $m_1$  相同的原子聚焦在一起(左起第二列), 同时施加一个频率适当的交变场, 使得处于  $m_e = 1/2, m_1 = 1$  状态的电子向  $m_e = -1/2, m_1 = -1$  的状态跃迁(左起第三列); 再采用一组六极铁, 将  $m_e = -1/2, m_1 = -1$  的原子束与  $m_e = 1/2, m_1 = -1$  的原子束聚焦在一起(左起第四列), 同时, 外加一个交变场, 使处于  $m_e = 1/2, m_1 = 0$  状态的电子向  $m_e = -1/2, m_1 = 1$  的状态跃迁(左起第五列); 最后, 采用一个弱交变场, 使得处于  $m_e = 1/2, m_1 = -1$  状态的电子向  $m_e = 1/2, m_1 = 0$  的状态跃迁, 使得处于  $m_e = -1/2, m_1 = 1$  状态的电子向  $m_e = -1/2, m_1 = 0$  的状态跃迁(最后一列), 最后获得具有单一磁量子数  $m_1 = 0$  的原子束. 原子束在  $z$  方向的极化度为

$$P_{zz} = 1 - 3n_0,$$

这里,  $n_0$  是处于状态  $m_1 = 0$  原子的相对比例.

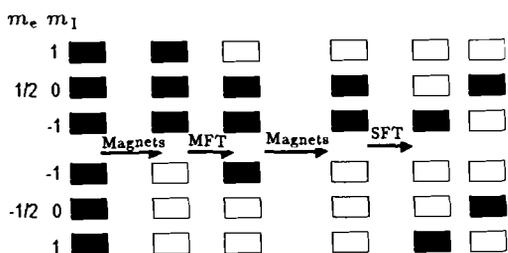


图 2 采用多极磁场获得极化原子束的示意图

在极化原子束靶中, 磁铁的多极度越高, 接收度越大. 考虑到高多极度的多极磁铁加工难度比较大, HIRFL-CSR 的极化内靶采用六极磁铁实现对不同磁量子数原子的选择.

极化原子束源主要由 RF 放电级、喷嘴级、5 组六极磁铁 (SM1, SM2, SM3, SM4 和 SM5), 3 组 RF 交变电场区 (中场区 MF, 强场区 SF 和弱场区 WF) 组成. RF 放电级用于将充入的气体分子碎裂为单个原子. 采用 GM 制冷机可以将喷嘴冷却到所需的温度. 六极磁铁可以采用永久磁铁或超导磁铁, 超导磁铁的磁场强度可以达到 6T, 基本可以保证在原子束的传输过程中强度没有衰减, 从而可以

获得较强的极化原子束. 但由于超导磁铁造价较高, 运行时需要适时添加液氮, 运行维护的工作量很大, HIRFL-CSR 极化内靶将采用永久六极磁铁. 目前, 采用先进的工艺, 永久六极磁铁可以做成所需的特殊极面形状, 磁场强度最高可以达到 2 T. 采用永久磁铁时, 在原子束的传输过程中, 其强度将发生衰减, 采用永久磁铁所能达到的极化靶厚度约相当于采用超导磁铁所能达到的靶厚的 1/3. 通过优化系统的相关参数, 在碰撞点处, HIRFL-CSR 的极化内靶能达到  $2 \times 10^{11}$  atoms/cm<sup>2</sup> 的靶厚, 极化氢束的极化度可达到 +0.90 或 -0.90, 极化氖束的矢量极化度可达到 +0.95 或 -0.95.

### 3 内靶的真空系统

HIRFL-CSR 内靶的运行不能影响实验环的本底真空度 ( $5 \times 10^{-9}$  Pa). 这对内靶的真空系统提出了很高的要求, 它必须满足如下 3 个条件: 对氢和氦等轻气体有足够的压缩比; 对不同靶气体都能达到所需的抽速; 不能有油污染. 超高真空 (UHV) 分子泵可以同时满足上述 3 个条件. 为了对氢和氦等轻气体有足够的压缩比, 将采用两个分子泵串联运行的方式. HIRFL-CSR 团簇内靶的真空系统布局如图 3 所示, 极化内靶的泵布局与此类似. 我们

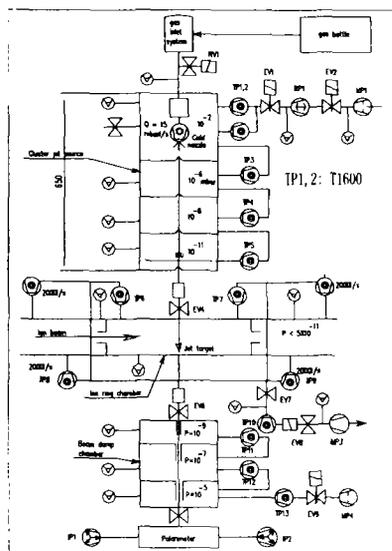


图 3 HIRFL-CSR 团簇内靶真空系统布局图

根据气体动力学计算了团簇靶各级的气压分布以及所需抽速, 计算结果如表 1 所示. 由表 1 可以看到, 采用合理的泵布局, 可以在靶室内得到  $10^{-9}$  Pa 量

级的真空度. 考虑到表 1 是计算结果, 在安排泵的抽速时要留有余量.

表 1 团簇靶喷气级气压分布

	抽速/(l · s <sup>-1</sup> )	气压/Pa
喷嘴级	1 500	2.3
第一差分级	1 500	5.3 × 10 <sup>-4</sup>
第二差分级	500	1.2 × 10 <sup>-6</sup>
第三差分级	500	7.2 × 10 <sup>-9</sup>
第四差分级	500	1.4 × 10 <sup>-9</sup>

为了优化真空系统的布局, 获得两级分子泵串联的实验数据, 我们采用两级分子泵串联进行了极限真空实验. 将 Varian 550 l/s 分子泵接在极限真空测试罩上, Alcatel 70 l/s 分子泵串接于 Varian 泵进气口处, 作为 Varian 泵的前级, Leybold Eco-Dry M15 干泵作为 Alcatel 泵的前级. 将测试罩在

200℃烘烤 48 小时, 然后在常温保持 48 小时后, 系统的真空度达到了  $6.28 \times 10^{-9}$  Pa, 关掉 Alcatel 泵, 系统的真空度下降到  $5.08 \times 10^{-8}$  Pa. 由此可见, 串联分子泵将系统的真空度提高了接近一个量级. 由于真空度为  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  Pa 时残余气体的主要成分是氢气, 串联分子泵的确有效地提高了对氢气的压缩比. 在实际的内靶真空系统中, 我们将进一步改善系统的连接, 在串联的两个分子泵之间采用 CF 法兰和金属密封, 同时适当提高烘烤温度, 有望进一步提高系统的真空度.

## 4 结束语

HIRFL-CSR 实验环内靶系统目前进行机加工和部分工艺设计的优化, 预计 2003 年二季度完成团簇靶的加工, 2004 年三季度完成极化靶的加工.

## 参 考 文 献:

- [1] Ekström C. Internal Target for Storage Rings[J]. Nuclear Physics, 1997, **A626**: 405c.
- [2] Isaeva L G, Lazarenko B A, Mishnev S I, *et al.* High Field Superconducting Sextupole Magnets[J]. Nucl Instr and Meth, 1998, **A411**: 201.
- [3] Schmidt H T, Cederquist H, Schuch R, *et al.* A Design Study for an Internal Gas-jet Target for the Heavy-ion Storage Ring CRYRING[J]. Hyperfine Interaction, 1997, **108**: 339.
- [4] Dombrowski H, Grzonka D, Hamsink W, *et al.* The Münster Cluster Target for the COSY-11 Experiment[J]. Nuclear Physics, 1997, **A262**: 427c.
- [5] Poelker M, Coulter K P, Holt R J, *et al.* Laser-driven Source of Spin-polarized Atomic Hydrogen and Deuterium[J]. Nucl Instr and Meth, 1995, **A364**: 58.

## HIRFL-CSR Internal Target System\*

CAI Xiao-hong, LU Rong-chun, CAO Zhu-rong, YAGN Wei, MA Xin-wen, ZHAN Wen-long  
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

D. K. Torpoko, D. Nikolenko

(Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russian Federation)

**Abstract:** The structure and the design of the HIRFL-CSR internal target system is reported. The HIRFL-CSR internal target can operate in two modes: cluster target mode and polarized target mode. The cluster target may provide the gas target of H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, noble gases and small molecular gases with a density of  $\geq 10^{13}$  atoms/cm<sup>2</sup>, and the polarized target may provide polarized H and D beams with a density of about  $2 \times 10^{11}$  atoms/cm<sup>2</sup>. The target polarization is expected to be +0.90/−0.90 for hydrogen beam, and the vector polarization is expected to be +0.95/−0.95 for deuterium beam.

**Key words:** heavy ion storage ring; internal target; cluster jet; polarized atomic beam

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10134010); WTZ project of BMBF, German Governmen