

氧负离子潘宁源的实验研究

于金祥, 闫继锋, 宋执中, 任晓堂, 王忠义

(北京大学 重离子物理研究所, 北京 100871)

摘要: 文章涉及用袖珍永磁潘宁源产生毫安级氧负离子束的实验研究。给出了磁场、不同阴极材料及源的离子发射孔对引出氧负离子束的影响。目前, 该类型离子源已成功地用于正负氧离子同时加速的 1 MV ISR-RFQ 加速器上。

关键词: 负氧离子; 永磁; 潘宁离子源

中图分类号: TL503.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2005)03-0248-04

Experimental Investigation on a Negative Oxygen Ions Penning Source

YU Jin-xiang, YAN Ji-feng, SONG Zhi-zhong, REN Xiao-tang, WANG Zhong-yi

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The present work concerns in the experimental study on producing mA order of negative oxygen ions with a pocket permanent magnet Penning source. The dependence of negative oxygen ion current on the magnet field, cathode materials and geometry of the source were given. The source was used currently in 1 MV ISR-RFQ accelerator, in which O^+ and O^- were simultaneously accelerated.

Key words: negative oxygen ions; permanent magnet; Penning ion source

为了提高 RFQ 加速器束流负载能力和开发其在氧离子注入方面的应用, 开展了用 RFQ 加速器同时加速同荷质比正负离子的理论和实验研究^[1], 并进行了毫安级正、负氧离子产生的实验。由于氧气, 尤其是氧原子的强氧化性, 使得采用热阴极的各种离子源在用氧作为工作气体时, 源的寿命极短, 不适宜用来产生正、负氧离子。微波离子源 (ECR 源) 虽可产生强流氧离子, 但难于用它产生强流氧负离子。通用的

铯溅射负离子源 (SNICS 源) 氧负离子的产额也仅为 100 μA 量级。为此, 经过对各种离子源进行比较, 最终选用了永磁冷阴极潘宁源^[2]作为产生正、负氧离子的实验用源。其中, 产生正氧离子采用永磁边引出潘宁源, 产生负氧离子采用袖珍永磁端引出潘宁源。目前, 这两种离子源均可产生毫安级正、负氧离子, 正、负氧离子比均可达 80% 以上。为增加氧负离子的产额, 对氧负离子潘宁源进行了改进。

收稿日期: 2003-09-09; 修回日期: 2003-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19975005)

作者简介: 于金祥 (1941 -) 男, 辽宁西丰人, 教授, 加速器专业

1 源及实验装置

用于产生氧负离子的永磁端引出溅射潘宁源示于图 1。源的外廓尺寸为 $\phi 80 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$, 质量 1.6 kg。源的磁场由 $\phi 21 \text{ mm} \times 18 \text{ mm} \sim \phi 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的 SmCo 磁钢产生, 不同尺寸磁钢均可在对阴极和阴极之间产生

0.10 T 的平均约束磁场。磁感应强度从对阴极 K1 到阴极 K2 逐渐下降, 呈单端发散型。因此, 在阴极表面存在与表面平行、强度大于 0.01 T 的横向磁场, 这一磁场可有效抑制电子从阴极孔逸出, 通常在引出束流中电子成分仅占 30% 左右。因此, 无须在离子源内安装减少引出束中电子成分的磁过滤器。两阴极间距 6 mm, 阴极 K1 尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 其上开有 $\phi(2 \sim 4) \text{ mm}$ 的离子发射孔; 对阴极 K2 为 $\phi 8 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆盘。

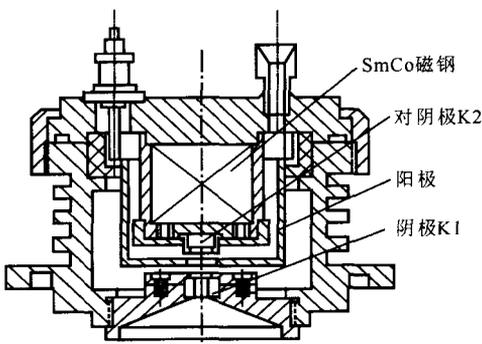


图 1 袖珍永磁端引出潘宁离子源

Fig. 1 Pocket end extraction Penning ion source with permanent magnet

实验在负离子源实验台上进行。该试验台依次由引出单元、磁过滤器、单透镜、总流法拉第筒、磁分析器及分析流法拉第筒等组成。其中, 磁过滤器的作用为滤除引出束中所含的电子, 其横向磁感应强度约 0.02 T。

2 氧负离子产生机理

负离子的产生通常包括发生在放电室空间和电极表面两种过程^[3]。对于本工作的离子源而言, 这两种过程兼而有之, 且均不可忽略。

2.1 空间过程

由于永磁端引出溅射潘宁源的气体放电形式为有磁场约束的冷阴极辉光放电, 维持冷阴

极辉光放电的电子流主要由离子轰击对阴极 K1 产生。并且, 这一电子流在磁场约束下在对阴极和阴极间振荡, 并与工作气体氧频繁碰撞, 使气体电离, 形成富含分子离子的低温等离子体。电离形成的正离子向两个阴极 (K1、K2) 运动, 而阴极附近的电子能量约为 0 至数十电子伏, 这一能量范围非常适于电子与氧分子或氧分子离子碰撞形成氧负离子的空间过程。随着电子逐渐靠近阴极, 其能量逐渐降低, 负氧离子主要通过氧分子离子的离解复合 (即 $\text{O}_2^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{O}^- + \text{O}^+$) 形成。在冷阴极端引出潘宁放电中, 实验表明, O_2^+ 离子成分约占各种正氧离子成分 (O^+ 、 O_2^+ 、 O_3^+) 之和的 80% 以上, 因此, 这种离子源非常容易在两个阴极附近通过空间过程形成负氧离子。

2.2 阴极表面

在永磁冷阴极端引出潘宁源中, 氧粒子碰撞阴极表面形成氧负离子。根据阴极材料的不同, 有反射俘获 ($\text{O}^+ \text{O}^-$, $\text{O} \text{O}^-$) 和表面负电离 ($\text{O} \text{O}^-$) 两种过程。由于氧的电子亲合势 ($E_{\text{ea}} = 1.465 \text{ eV}$) 较大, 当具有一定能量的 O 、 O^+ 及 O_2^+ 等粒子轰击阴极表面时, 可俘获阴极表面层电子, 形成负离子并反射出阴极表面。而表面负电离, 在入射粒子的电子亲合势与阴极材料的逸出功可相比拟时, 有较大的表面负电离系数。这一点可通过选择适当的阴极材料来实现。

3 实验结果分析

3.1 磁场影响

由于该源采用 SmCo 磁钢产生磁场, 离子源磁场的改变只能通过更换不同尺寸的磁钢来实现。随着磁钢的直径和长度尺寸的增加, 两阴极间的磁感应强度逐渐增强, 磁场分布同时有所改变。本工作先后试验了 5 种不同尺寸的磁钢, 其中部分实验结果列于表 1。

由表 1 可见: 在一定的放电电流下, 随着磁场的增强, 在不同引出电压下引出的离子流强均显著增加。这一点可由两阴极附近磁场增强而使被约束在其邻域的电子密度增加导致氧负离子形成几率增大来解释。如果固定引出电压, 改变放电电流, 随着磁场增强, 引出氧负离子流强也有显著增加。

表 1 氧离子流强 I_t 随磁场的变化关系Table 1 O^- current I_t as a function of magnet field

| 引出电压 V_{ex}/kV | 不同磁场下的 $I_t/\mu A$ | | |
|---------------------|---|---|---|
| | $\phi 21\text{ mm} \times 17\text{ mm}$ | $\phi 25\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ | $\phi 25\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ |
| 2.5 | 105 | 160 | 165 |
| 5.0 | 240 | 550 | 600 |
| 7.5 | 420 | 790 | 1 200 |
| 10.0 | 580 | 1 050 | 1 580 |
| 12.5 | 750 | 1 280 | 1 820 |

注:实验条件为放电电流 $I_d = 100\text{ mA}$, 阴极孔 $\phi 8\text{ mm}$ 及进气最佳

3.2 阴极材料

在冷阴极端引出潘宁离子源中,放电是由阴极 K1 和 K2 被离子轰击产生的二次电子来维持的。阴极的二次电子发射系数大,不仅放电易于形成和稳定,而且负氧离子的产额也高。但在氧放电时,许多在其它气体放电时性能良好的阴极,如钛、锆、钨等,由于氧的强氧化作用,已不能使用。因此,在氧放电时,阴极材料不仅要有好的二次电子发射系数,还要抗氧化,

而六硼化镧(LaB_6)则两者兼具。为此,选用六硼化镧及常规材料铝、铁、石墨、铜及其组合作为对阴极和阴极(表 2,表 3)。显然,由单一金属或石墨作对阴极和阴极材料时的引出负氧离子束流都偏小。实验后观测到这些电极表面氧化严重。由于两个阴极的表面被不易发射电子的疏松氧化物覆盖,使进入阴极区邻域的电子减少,从而导致负氧离子的产额下降。在 LaB_6 对阴极与其它材料为阴极的组合中,尽管阴极仍被氧化,但对阴极完好。加之 LaB_6 阴极的逸出功(2.3~2.7 eV)较低,在氧放电过程中,由于离子轰击、溅射,除了在放电室空间含有 La 及其化合物成分外,还可在阴极 K1、K2 形成 $La + LaO$ 薄层,这一薄层的作用与铯溅射负离子源中的铯原子层的作用相仿,可降低阴极 K1、K2 表面层材料的逸出功,这不仅使阴极 K1、K2 的二次电子的发射作用增强,有助于空间产生氧负离子的过程,而且也有助于表面负电离过程。因此,在采用 LaB_6 阴极的永磁潘宁源中,无须注铯亦可产生毫安级的氧负离子。

表 2 不同阴极材料 I_t 与 V_{ex} 变化关系Table 2 Extracted O^- total current I_t vs. V_{ex} at different cathode material

| V_{ex}/kV | 不同阴极材料的引出总束流 $I_t/\mu A$ | | | | | | |
|-------------|--------------------------|---------|---------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| | Fe + Fe | Al + Al | Cu + Cu | $LaB_6 + Cu$ | $LaB_6 + C$ | $LaB_6 + Fe$ | $LaB_6 + Al$ |
| 2.5 | 21 | 39 | 48 | 68 | 145 | 69 | 140 |
| 5.0 | 46 | 86 | 100 | 240 | 415 | 290 | 400 |
| 7.5 | 64 | 122 | 170 | 470 | 700 | 670 | 850 |
| 10.0 | 82 | 140 | 200 | 800 | 870 | 1 050 | 1 250 |
| 12.5 | 90 | 150 | 210 | 990 | 1 000 | 1 400 | 1 550 |

注:工作在最佳进气条件下,放电电流 $I_d = 100\text{ mA}$

表 3 不同阴极材料 I_t 随 I_d 的变化关系Table 3 Extracted O^- total current I_t vs. I_d at different cathode material

| I_d/mA | 不同阴极材料的引出总束流 $I_t/\mu A$ | | | | | | |
|----------|--------------------------|---------|---------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| | Fe + Fe | Al + Al | Cu + Cu | $LaB_6 + Cu$ | $LaB_6 + C$ | $LaB_6 + Fe$ | $LaB_6 + Al$ |
| 30 | 11 | 55 | 32 | 410 | 220 | 820 | 700 |
| 50 | 26.5 | 72 | 62 | 600 | 430 | 1 100 | 950 |
| 80 | 63 | 120 | 94 | 860 | 820 | 1 320 | 1 450 |
| 100 | 90 | 150 | 210 | 990 | 1 000 | 1 400 | 1 550 |

注:工作在最佳进气条件下,引出电压 $V_{ex} = 12.5\text{ kV}$

3.3 阴极发射孔

永磁端引出冷阴极潘宁离子源在引出正离子时,其阴极孔径实验优化为 $\phi 3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。引出负离子时,由于负离子被居于放电柱中心的密集电子流排斥,负离子一般集中在放电柱外围。该源放电柱直径由观察阴极溅射形貌可以确定,通常放电柱直径为 6 mm 左右。因此,为引出较强的氧负离子束,阴极孔孔径应适当增大。为验证这一点,在维持离子源稳定放电的前提下,将阴极孔尺寸从 $\phi 2 \text{ mm}$ 变到 $\phi 4 \text{ mm}$,在 $I_d = 50 \text{ mA}$ 及不同的 V_{ex} 下,孔径大的阴极引出的氧负离子流强也大。但当阴极孔为 $\phi 2 \text{ mm}$ 、 $\phi 3 \text{ mm}$ 时,随着引出电压的增加,引出氧负离子流强呈饱和趋势或增势变缓。当阴极孔为 $\phi 4 \text{ mm}$ 、 V_{ex} 从 0 升至 12.5 kV 时,氧负离子流强随之显著增加(图2)。但在较大放电电流下,如 $I_d = 80 \text{ mA}$ 时,采用 $\phi 4 \text{ mm}$ 阴极引出孔引出的氧负离子流强较阴极孔为 $\phi 3 \text{ mm}$ 时的小。这可能是由于大孔径、强放电使发射面变差所致。

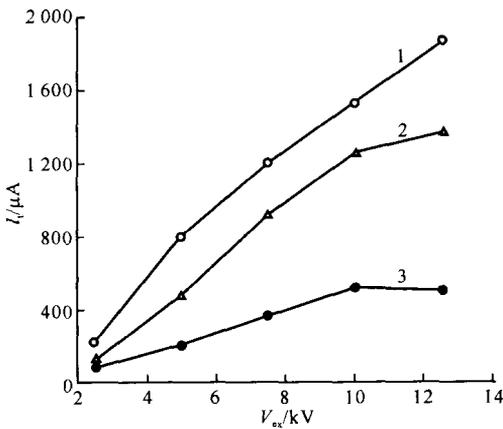


图2 阴极发射孔变化时引出氧负离子流 I_t - V_{ex} 关系

Fig. 2 Total negative oxygen ion current I_t vs. extraction V_{ex} voltage at different cathode apertures
1——阴极孔径 $\phi 4 \text{ mm}$; 2——阴极孔径 $\phi 3 \text{ mm}$;
3——阴极孔径 $\phi 2 \text{ mm}$

多次实验表明:经改进的离子源在 12 kV

左右的引出电压下,由该源可引出 2 mA 的氧负离子束。通常 O^- 离子比大于 80% , O_2^- 、 O_3^- 各占百分之几,其比率随放电和进气条件的变化而稍有变化(表4)。引出总流 I_t 与引出电压 V_{ex} 之间的关系为 $I_t = kV_{ex}$, 式中, k 为常数,而在采用 LaB_6 对阴极时, k 值一般在 $1.4 \sim 1.6$ 之间变化。

表4 O^- 、 O_2^- 、 O_3^- 离子百分比随放电电流强的变化关系

Table 4 Percent of O^- , O_2^- and O_3^- ions vs. discharge current I_d

| I_d / mA | 分析流强/ μA | | | 离子百分比/ % | | |
|-------------------|---------------------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | O^- | O_2^- | O_3^- | O^- | O_2^- | O_3^- |
| 30 | 18.39 | 1.69 | 2.13 | 82.8 | 7.6 | 9.6 |
| 50 | 18.53 | 1.32 | 2.20 | 84.0 | 6.0 | 10.0 |
| 80 | 18.89 | 1.02 | 2.71 | 83.5 | 4.5 | 12.0 |
| 100 | 14.65 | 0.77 | 2.70 | 80.8 | 4.2 | 15.0 |
| 120 | 13.92 | 0.68 | 2.39 | 81.9 | 4.0 | 14.1 |

注:气压为 $2.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$

4 结束语

由于源的低气耗、低功耗,并可引出 mA 级的氧负离子束,它已被用于同时加速正负离子的 1 MV ISR-RFQ 加速器中。显然,通过加大系统真空抽速和引出电源功率,优选阴极材料及其组合方式、适当提高放电强度、加大阴极发射孔和提高引出电压,由这种离子源引出更强的氧负离子束是可行的。

参考文献:

[1] 于金祥,陈佳洱,任晓堂,等. FRQ 加速器同时加速同荷质比正负离子的理论与实验研究[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(1): 34 ~ 40.
[2] Yu Jinxiang, Ren Xiaotang, Song Zhizhong. Progress of Pocket PIG Ion Sources With Permanent Magnet at Peking University [J]. Rev Sci Instrum, 1994, 65(4): 1 337 ~ 1 339.
[3] 张华顺. 离子源和大功率中性束源[M]. 北京: 原子能出版社, 1987. 257 ~ 270.