

740



C.4 824.43
V.15-4

魏宝文 赵红卫 著

离子的喷泉

—— 电子回旋共振离子源



清华大学出版社



暨南大学出版社

(京)新登字 158 号

图书在版编目(CIP)数据

离子的喷泉——电子回旋共振离子源/魏宝文,赵红卫著. —北京:
清华大学出版社;广州:暨南大学出版社,2001.12

(院士科普书系/路雨祥主编)

ISBN 7-302-04961-0

I. 离… II. ①魏… ②赵… III. 电子回旋共振—离子源—普
及读物 IV. TL503.3-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 079817 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

暨南大学出版社(广州天河,邮编 510630)

<http://www.jnu.edu.cn>

责任编辑: 宋成斌

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 **印张:** 5 **字数:** 95 千字

版 次: 2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04961-0/G·231

印 数: 0001~5000

定 价: 12.00 元

本书前言

现今我们已经明白，人类及其周围的每一样东西都是由分子构成，分子是由原子组成，而原子是由原子核与电子构成。每一个原子都像一个小小的太阳系，电子围绕原子核在一定的轨道上运动。原子核包含了原子的绝大部分质量，原子核携带正电荷，而围绕的电子云带负电荷。一切原子是呈电中性的，也就是说，原子核内的正电荷完全被包围它的电子云的负电荷所抵消。当原子核外层电子被剥掉一个或几个后，原子即变成带有一个或几个正电荷的离子。当代物理学家或工业应用领域兴趣之所在，并不是单个的离子，而是由很多离子形成的离子束。自从人们认识清楚原子核结构后，就有了“人工制造”离子束（有时称离子束为束流）的想法，这种产生离子束的装置叫离子源。离子源就像一个喷泉，通过某种机制，源源不断地喷射出具有一定能量和品质的带电粒子束。

早在 19 世纪末，就出现了利用气体放电的原理产生离子的离子源，然而，直到 20 世纪 30 年代，才开始发展真正高性能的离子源，这主要归功于质谱仪、回旋加速器和高效率电磁同位素分离器的研制成功。到了 50 年代，在核物理研究和加速器发展的推动下，离子源发展极为迅速，这期间发明了许多不同种类的离子源，但主要是以产生单电荷态

离子为主，即只能剥掉原子核外层一个电子。60年代后，多电荷态(原子核外层多个电子被剥掉)离子源成为离子源发展的新宠，开始主要是为满足重离子物理研究的需要，但对多电荷态离子源发展起革命性影响的是70年代诞生的电子回旋共振(electron cyclotron resonance)离子源，简称 ECR 源。这种离子源在其最初的发展阶段，并没有引起人们足够的重视，甚至到了80年代初，国际上还有不少人对它持有怀疑，甚至不屑一顾的态度。在近一二十年内，电子回旋共振离子源突飞猛进的发展，使人们刮目相看。可以说，电子回旋共振离子源赋予各种重离子加速器和重离子物理研究新的生命活力。

电子回旋共振离子源是利用一种高频电磁波(微波)中的电场加热电子，使电子具有足够高的能量，这些电子与气体中的原子碰撞，“打掉”气体原子的外层电子而产生多电荷态离子，并利用磁场来约束电子，使电子不能逃逸，有机会获得更高的能量，与更多的原子或离子碰撞，打掉更多的电子，也就是说，产生更高电荷态的离子。电子回旋共振离子源最大的优点是高电荷态离子束流强(离子束流强度可近似理解为离子数目的多少)，电荷态高，有许多原子的外层电子几乎可全部被剥离掉。离子源本身可长期、稳定可靠地工作，没有寿命问题。正因为如此，这种离子源才会如此备受青睐，在各种重离子加速器、原子物理研究、同位素分离、表面物理以及许多工业应用领域有着广泛的应用前景。

更重要的是，电子回旋共振离子源本身具有无穷的魅力，在近20多年的发展过程中，充满着许多戏剧性的传奇

色彩，极具“魔力”和挑战性，就像许多国外同行常说的那样，电子回旋共振离子源本身就像魔术一样，有时神秘莫测，变化无常，但在某些方面又显得相当简洁，富有规则而较易理解。虽然电子回旋共振离子源的发展已近 30 年，目前在国际上各领域有近二三百台这种离子源在运行，还有更多的正在建造之中，但它的许多基本原理和工作机制至今还不甚清楚。一台高电荷态电子回旋共振离子源的设计、建造，特别是调试，还处于半理论和半经验状态，没有完整的理论可遵循，常常是一系列新的实验现象和实验结果使理论研究者大出所料，目瞪口呆，难于置信，在这方面理论研究远远地落后于实验进展。在电子回旋共振离子源的研制中，无权威可言，只要你不断努力、尝试，总会有新的发现。新的进展使你惊喜万分，但又常常迷惑不解。在国际电子回旋共振离子源领域，没有人敢夸口他的离子源所创束流纪录可保持半年。新的思想、新的结果、新的技术，乃至许许多多的小窍门总是层出不穷；相互竞争激烈，而相互交流勾通又是那么广泛，在不到 20 年内，国际电子回旋共振离子源的学术讨论会就已召开了 14 届。至今，几乎每一台电子回旋共振离子源都能一直正常工作，但是，一台好的离子源和另一台差的离子源相比，其性能和束流指标千差万别。

这里试举一两个例子。在电子回旋共振离子源中，当你向离子源中掺入一种比工作气体较轻的气体时（这种气体一般叫支撑气体，通常的支撑气体是氧气或氦气），你会发现工作物质的高电荷态离子产额可大幅度提高。这种现象叫掺气效应，这种效应是在一次偶然的试验中发现的。现在几

乎所有的电子回旋共振离子源都在使用这种效应以提高高电荷态离子束流强，这种方法看起来是如此之简单，可效果非常明显。但在过去的 15 年里，有许多实验小组都试图从理论和实验上给予解释，然而到目前为止，还没有一种完善的解释能自圆其说，令人信服。又如，在 1995 年之前，几乎所有的电子回旋共振离子源都只用一种频率的微波加热电子，有人曾提出试图把两种不同频率的微波同时馈入到离子源中，用以提高加热电子的效率，这种想法几乎遭到所有“权威”的否定，他们认为不可能。美国贝克利国家实验室的谢祖棋博士，大胆地从实验上做了尝试，出人意料地发现高电荷态离子产额大幅度提高了，但其详尽的物理解释还不甚明确，以至于两年后，有同行用实验重复证实了这个结果以后，国际电子回旋共振离子源先驱者之一的梯姆·昂塔亚(T. Antaya)博士等人在国际会议上感叹：“我真为双频加热担心，物理机制何在？但它又是确定无误的实验事实！”这便是电子回旋共振离子源魔力之所在。这种魔力驱使人们不断地去探索、思考，不断地提出新的思想、新的概念，去揭示其中的奥妙。这也是本书的宗旨之一。电子回旋共振离子源的创始人、法国著名教授理查德·杰勒(R. Geller)曾说过，在 80 年代人们曾流传着这样的一句玩笑：电子束离子源(另外一种多电荷态离子源)的科学家们至少可以理解他们的电子束离子源为什么工作运行得如此糟糕，而可怜的电子回旋共振离子源的科学家总是不明白他们的电子回旋共振离子源为什么工作运行得如此之好！

本书的目的之一是为了表明：凡具备物理学基本知识的

人，都能理解电子回旋共振离子源的基本原理和机制，以及过去 20 年来，科学家们在这一领域内所取得的研究成果和新的发现；都能按照科学家的推理思路、实验手段，以及有时采取的小窍门，去揭示电子回旋共振离子源的奥秘，去领略科学家在实验过程中的创新思维和智慧的火花，去分享科学家在取得这些成果所感受到的那种喜悦和惊讶之情，去了解电子回旋共振离子源在不同领域内的应用前景。尽管电子回旋共振离子源内容丰富又复杂，而且涉及面极广，它涉及到电磁学、等离子体物理、原子物理、表面物理、材料化学、微波技术及束流光学等诸多学科，然而读者一旦对那些十分新奇，或很不熟悉的概念和研究方法逐渐理解以后，就会意识到它并不令人望而生畏；相反，会对那些既可爱又可恨且反复无常的电子和高电荷态离子着迷。

本书另一宗旨是想向读者表明：电子回旋共振离子源是以实验为主，以基本的物理学原理及概念为根据，依靠创新的物理思想，精巧的实验安排，融合现代高科技，以及构思新颖、巧妙机械设计的实用技术。它不是依赖于优美的数学公式和物理方程。相反，简洁、清晰的物理图像和概念，以及对实验现象不断地分析、思考显得更为重要。因此，本书会引导读者沿着最简洁的物理图像和概念而展开其议题，省去了所有复杂的数学方程。另外，本书中所说的离子源主要是指等离子体正离子源和负离子源，本书不作介绍。

书中开头首先简略地勾画出了离子源的概貌，说明离子是怎样在离子源中产生、消失，最后被引出的。然后，再引导读者循序渐进地了解电子回旋共振离子源的基本物理

过程,以及其中所应用的关键技术和方法,并力图说明一些突破性进展的创新思路 and 过程。紧接着把读者引入电子回旋共振离子源的广泛应用领域和目前的发展状况,最后展望将来的发展前景。

在编写本书的过程中,得到了刘占稳研究员的大力协助,在此谨致衷心的感谢。

魏宝文

2000 年 10 月

目 录

1 离子源——带电粒子的“喷泉”	1
1.1 离子源一瞥	1
1.2 离子的产生	6
1.3 离子的消亡	11
1.4 离子的引出	19
2 电子回旋共振离子源	27
2.1 等离子体	27
2.2 磁约束	33
2.3 微波	40
2.4 电子回旋共振加热	49
2.5 ECR 源	57
2.6 ECR 源的实验与发展	81
3 ECR 源的“用武之地”	97
3.1 ECR 源与重离子加速器	100
3.2 ECR 源与治癌	109
3.3 ECR 源与洁净核能源	111
3.4 ECR 源与原子物理研究	113
3.5 ECR 源与高科技工业	114

4 发展与展望	122
4.1 八仙过海各显神通	123
4.2 超导 ECR 源东山再起	124
4.3 $1+ \rightarrow n+$ 工程	127
4.4 呼唤新的突破	130
参考文献	133

1

离子源

——带电粒子的“喷泉”

1.1 离子源一瞥

原子是由原子核和原子核外层电子构成,当原子核外层电子被剥掉一个或几个,即形成了离子。原子是呈电中性的,一个或几个电子被剥离掉后形成的离子带有正电荷。被剥离的电子数目称为电荷态数或电荷态。很多具有一定能量的离子构成了离子束。离子源是用来产生离子束的装置(见图 1.1),离子源就像一个带电粒子的喷泉,通过某种机制,在一个真空容器(称为电离室)内使电子从原子中剥离出来形成由离子和电子组成的一种“电离气体”,在

原子是由原子核和原子核外电子构成。当原子核外电子被剥掉一个或几个，即形成了离子。

这种“电离气体”中充满了带正电荷的离子和带负电荷的电子，但总体上说，正电荷的总量和负电荷的总量是相抵消的，这种电离气体基本上呈电中性，我们称这种电离气体为等离子体。一般在电离室外围，都附加有磁场，磁场具有一定的分布形式，通过磁场约束等离子体迫使等离子体中的电子按一定规律运动，以使电子具有较长时间的寿命，有机会与更多的原子或离子碰撞、电离，产生更多的离子或产生更高电荷态的离子。如果在电离室上施加一正高压，在与之隔离的另一端通过一电极接地或加一负电压，在电离室和电极之间便形成了电场，即电离室和电离室内的等离子体处于高电位，电极处于低电位，在这样的电场作用下，等离子体中带正电荷的离子就会从高电位“跑向”低电位，通过孔或狭缝源源不断地喷射出来，形成离子束。离子束所具有的能量取决于施加在电离室上的高压。

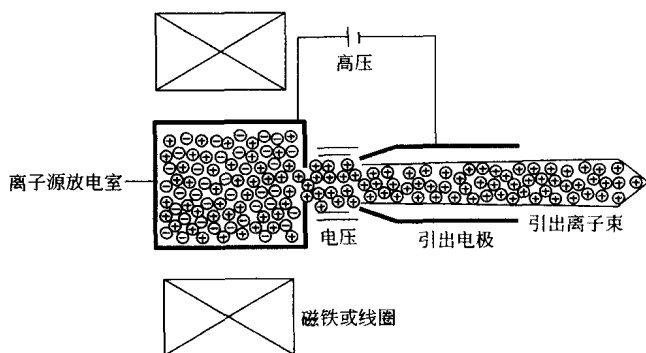


图 1.1 离子源示意图

引出离子束束流强度的大小与等离子体中电子和离子

离子源中离子的电荷态主要取决于等离子体中电子的能量、离子的寿命和等离子体的密度。

的密度及温度(即热运动的能量)、电离室外施加的磁场分布、放电机制、电离室内的工作气压、引出孔或缝的大小、施加的高压、引出电极的形状等诸多因素有关。离子源中离子的电荷态主要取决于等离子体中电子的能量、离子的寿命和等离子体的密度。可以说,一台离子源的性能根本上是由电离室内等离子体的性能决定。而等离子体的性能与下列因素密切相关:产生等离子体的放电机制;其中的原子物理过程;周围的磁场和电势分布;放电室表面状况及伴随所发生的相关效应;放电室内工作气压;为加工离子源所涉及到的尖端技术和工艺。

从离子源中引出的离子束必须在真空管道中传输,管道内真空度必须足够好,一般要求它的密度比大气密度的十亿分之一还要小,即空气要尽量少,否则管道内剩余气体的原子会与离子束中的离子“碰撞”,使离子从剩余气体的原子中俘获电子而损失掉。从离子源中喷射出来的离子并不是都沿着或平行于管道中心轴线运动,而是与中心轴线成一定的夹角,也就是说,从离子源中出来的离子有一定的发散度,如果没有外界力的作用使其改变方向,则随着传输距离的增加,许多离子一定会打到管道壁上损失掉。要使带电粒子束传输较远的距离,必须尽可能地使离子靠近中心轴线,即需要聚焦。在这一点上,离子束与光束很类似,为了防止发散,要利用透镜聚束。聚焦离子束的透镜一般都是利用电场或磁场使带电粒子在横向(垂直于离子束传输方向)受一定的作用力,而迫使带电粒子靠近中心轴线。

从离子源中喷射出的离子束一般是由不同种类,不同电

从离子源中引出的离子束必须在真空管道中传输,真空度必须足够好,一般要求它的密度比大气密度的十亿分之一还要小。

荷态离子构成的混合束。例如离子源要产生氧离子,从外界要供给离子源氧气,电离室内除了有大量的氧原子外,还有真空中残余的氮、氢、二氧化碳等原子或分子,通过电离产生等离子体,等离子体中既有氧离子,还有氮、氢、碳等离子。经过高压电场加速后,所有带正电荷的离子都有可能从引出孔中跑出来,这样引出的离子束中有各种各样的离子,而对“用户”来说,需要的只是某一种离子。因此,必须对从离子源中引出的混合束进行分析、筛选,选择出所需要的离子,然后再输送给“用户”。综上所述,可以看出,离子源系统一般是由离子源源体、引出部分、聚焦透镜、分析选择部分和测量部分组成。如图 1.2 所示,此图以产生优化 O^{5+} 为例,经分析选择后,离子源系统提供 O^{5+} 离子束。 O^{5+} 表示氧原子的 5 个电子被剥离。

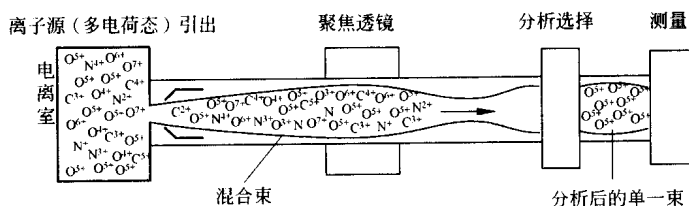


图 1.2 离子源系统基本组成部分

说到这里,我们对离子源的全貌已有了一个初步的认识。离子源虽小却“神通广大”,应用颇广。离子源广泛地应用于原子物理、等离子体物理、等离子体化学、核物理等基础学科的研究中,如各类粒子加速器、质谱仪、同位素分离器、火箭推动器、受控热核聚变研究等尖端科研领域,都需要使

离子源系统一般是由离子源源体、引出部分、聚焦透镜、分析选择部分和测量部分组成。

用离子源。与此同时,它还被大量地用于许多工业应用领域,如材料表面处理、离子注入、离子刻蚀、离子打孔等。这里试举一例,在工业中从离子源中出来的带电粒子束被用来处理石油钻井或各类车床上使用的各种钻头,经离子束处理过的钻头,其硬度和耐磨性能都大幅度提高。近几年来,离子源产生的离子束还被用来辐照育种,以提高农作物的产量,并增强其抗旱、抗倒伏能力。

由于应用领域广泛,各领域又对离子源特性提出了不同的要求,这就决定了离子源类型的多样化。据不完全统计,目前主要类型已超过 100 多种。但无论什么类型的离子源,首先可归结为解决两个主要的物理技术问题:

① 寻找适当的方法来形成所需要离子的具有一定密度的等离子体,同时要求这个密度和中性原子密度之比最大,即要求最大的电离度。

② 寻找在最大工作物质利用率下,最大限度地引出所形成离子的方法,以及寻找最好的方法来形成具有所需离子光学特性的离子束。

另外,对离子源还有以下的基本要求:

① 从离子源中引出的离子束强度要达到要求的大小,并具有最佳的离子光学特性。

② 离子源系统应能提供具有单一成分的离子束,即具有单一质量和电荷态的离子。离子束中不希望混杂有其他成分,因为它们会“玷污”所需要的离子束。

③ 产生的离子束应具有预定的平均能量和允许的离子速度散度。

具有一定能量的电子与原子碰撞时,原子外层电子会获得足够的能量,完全脱离原子,形成带正电荷的离子,即发生电离。

④ 离子源应工作稳定,不希望离子束强度有较大的漂移。

⑤ 需要在最小工作物质消耗率下,得到一定强度的离子束。

⑥ 希望所消耗的功率最小。

⑦ 离子源能够提供的离子种类应越多越好。

⑧ 离子源应该具有较好的长期稳定性和可靠性,且须有足够长的连续工作寿命。

1.2 离子的产生

中性原子怎样才能变成带有一定电荷的正离子? 这是离子源的核心问题。我们知道,当原子中的电子从外界获得能量时,可以从低能级跃迁到高能级,这种原子称为受激原子。当这种能量大到一定数值时,原子中的外层电子就可逃脱原子核的束缚,变成自由电子,我们说这是原子被电离成自由电子和正离子。原子被电离的方法很多,可以通过电子与原子之间碰撞;原子和原子之间碰撞;光对原子作用;电子或离子作用在固体表面;固体电极表面电场非常强时,也会由表面释放出电子,产生电离。这里重点介绍一下被很多离子源采用的最常用的电离机制——电子碰撞电离。

当一个具有一定能量的电子碰撞一个气体原子时,电子的动能有一部分就传给了原子。如果电子的动能不是足够大,电子传给原子的能量很少,原来静止的原子几乎不动,运动的原子其运动方向也不会有明显的改变,只是电子改变了