

等离子体离子源物理与技术

[苏] M. Д. 葛波维奇

科学出版社

53.651

610

C.3

等离子体离子源物理与技术

(苏) M. Д. 葛波维奇 著

万 春 侯 等 译

ZK613/06

5k(13.150)



内 容 简 介

本书对目前各类等离子体离子源的工作原理、特点、水平及正在研究中的问题作了较详细的论述(第二章、第三章、第四章);对离子束的引出、空间电荷的作用及其补偿问题,也作了较系统的讨论(第五章、第六章);最后对气体放电离子源中存在的一个重要问题——不稳定性 and 振荡作了一般介绍(第七章)。

在中译本中,译者补充了少量的总结性参考文献,以便读者进一步查阅有关资料。

本书对从事加速器、受控热核反应、离子注入、同位素电磁分离器等装置离子源方面的工作人员有一定的参考价值。

М. Д. Габович

Физика и техника плазменных источников ионов

Атомиздат, Москва, 1972

等离子体离子源物理与技术

[苏] М. Д. 葛波维奇 著
万 春 侯 等 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1976 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1976 年 4 月第一次印刷 印张: 10 1/2

印数: 0001—6,350 字数: 237,000

统一书号: 13031·427

本社书号: 643·13—3

定价: 1.08 元

译 者 的 话

离子源是产生离子束的装置。随着在工农业生产和科学研究中广泛使用离子束，离子源理论和技术的研究也蓬勃发展起来。目前已研制出的常用离子源，按产生离子的方式有：热阴极弧放电、高频放电、冷阴极潘宁放电、表面电离及火花放电等离子源。离子束流强由 10^{-10} 安以下到数安。制造一个离子源必须解决以下两个问题：

1. 产生一定浓度的某种原子或分子的离子；
2. 把产生的离子引出，形成具有一定能量和一定离子光学特性的离子束。

因此，离子源物理涉及到气体放电、等离子体物理、离子光学等各方面的知识，在技术上还会遇到高温和反腐蚀等问题。这一系列问题是十分复杂的，到目前为止，离子源物理不论在理论上或技术上还存在不少问题，尚在研究中。

目前在离子源方面已经积累了大量经验，有关离子源本身的文章也已发表了近千篇，加上有关方面的文章，数量就更多了。但是，比较系统地全面地论述各类离子源的概况、结构、特点及物理基础等方面的专著，现在仍非常缺乏。本书对气体放电离子源及其物理问题作了较系统的论述。遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，我们翻译了这本书，以供参考。但是本书对气体放电中的其它一些基本过程，像放电等离子体中带电粒子的运动、有磁场时带电粒子的扩散等问题，介绍得比较简单或者没有谈到，对放电等离子体和离子束的不稳定性及振荡特性也写得太简单，对离子束测量方法也讲得

很少。对于其中一些问题，中译本在参考文献内增添了少量的总结性文献，以供查阅。

参加本书译校的有万春侯、方锦清、李公攀、尹崇义、李仁骏、杨怀玺、黄德宝、黄国俊、林治洲、吴铁龙、杜学仁、王静珊等同志。由于我们水平所限，译文有不少缺点和错误，热忱地希望读者批评指正。

序 言^①

目前已很流行的离子源在各种科学和技术领域中得到了日益广泛的应用。离子源的工作原理是基于获得正离子的各种方法,即由电子轰击使气体分子电离,原子在固体表面上电离和气体放电中的电离等等。在本书中只是研究气体放电离子源,更确切地说,只是研究形成等离子体的离子源——等离子体离子源。

本书实际上是1964年出版的《等离子体离子源》一书的增订本。与以前的版本比较,本书增加了关于等离子体离子源中物理过程的知识。实际上,至今还没有等离子体离子源理论,这是因为要建立一个考虑到各部分(阴极区、阳极区和等离子体)相互作用的气体放电理论是很困难的;同时由于结构复杂和表征这些装置的物理过程多种多样,要建立有效的等离子体离子源理论就更加困难了。因此,书中只研究一些简化模型(例如,对于磁场中的直弧放电、电子振荡放电等),这些模型近似地反映了放电的基本特性,并且能够用来定性地解释相应类型离子源的一些特性。

本书补充了近年来发表的各种离子源结构、特性和参数的新资料,特别是在负离子源和多电荷离子源方面。把已知的新旧资料加以整理之后,我们增加了新的一章来讲述难熔元素离子源,这种离子源由于微电子学的发展又引起了人们的注意。

为了使读者在使用本书时更为方便,我们另列了一章,介绍气体放电一些基本过程的简单知识。

① 序言略有删节(用符号①②…加的注为译者注)。

目 录

译者的话	v
序言	vii
绪论	1
1. 气体放电离子源发展简述	1
2. 对离子源的要求。离子源的参数	7
3. 离子源设计中出现的主要物理技术问题	11
第一章 等离子体离子源中一些基本过程的简单知识 ..	14
§ 1.1 有效截面。平均自由程长度	14
§ 1.2 电子轰击引起的激发、电离和分子离解	16
§ 1.3 离子-原子碰撞	21
§ 1.4 负离子的形成和破坏	23
§ 1.5 带电粒子的复合。电荷在固体表面上的中和。原子在 表面上的复合	26
§ 1.6 在离子轰击下固体表面发生的现象	29
第二章 等离子体离子源(基本物理过程、结构、性能和参 数)	31
§ 2.1 等离子体离子源的分类	31
§ 2.2 热阴极离子源	32
§ 2.3 冷阴极离子源	114
§ 2.4 高频放电离子源	134
第三章 从等离子体离子源引出束的质谱及电荷成分 ..	153
§ 3.1 决定氢离子束成分的各种过程	153
§ 3.2 由各种离子源引出束的质谱	157
§ 3.3 多电荷离子的等离子体源	163

§ 3.4	负离子的等离子体源	176
§ 3.5	用离子源获得快中性粒子	189
第四章	难熔元素的等离子体离子源	191
§ 4.1	用途和特点	191
§ 4.2	离子源的主要参数	192
§ 4.3	由加热形成工作物质蒸汽的离子源	193
§ 4.4	在放电作用下形成工作物质蒸汽的离子源	204
第五章	离子的引出和离子束的初成形束的传输和束的研究	211
§ 5.1	等离子体聚焦	211
§ 5.2	引出离子的三种方法和离子束的初成形	212
§ 5.3	由靠近离子源引出孔的等离子体表面引出离子。皮尔士和准皮尔士系统	215
§ 5.4	由离子源内部的等离子体边界面引出离子	226
§ 5.5	从渗透到真空中的等离子体边界面引出离子	231
§ 5.6	小能量离子束的形成	240
§ 5.7	束在自身空间电荷作用下的发散	243
§ 5.8	负带电粒子在中和离子束空间电荷及其它方面的应用	251
§ 5.9	初始热速度的影响。发散度概念	260
§ 5.10	各种使用离子束装置的例子	266
§ 5.11	离子束电流的测量。大功率离子束接收器	271
第六章	等离子体从离子源向真空渗透从离子源等离子体逸出离子的能量	277
§ 6.1	电子速度为麦克斯韦分布的等离子体向真空逸出	277
§ 6.2	等离子体从电子振荡离子源向真空逸出	283
§ 6.3	关于渗透等离子体的边界面	288
§ 6.4	由离子源等离子体逸出离子的能量。快离子准中性束的获得	290

第七章 等离子体的振荡特性及它们对等离子体离子源 与中和离子束内各种过程的影响	296
§ 7.1 离子源中电子束与等离子体的集体相互作用	296
§ 7.2 不同类型放电中的各种振荡过程和引出离子束的调 制	298
§ 7.3 中和离子束内的集体过程	308
参考文献	312

绪 论

1. 气体放电离子源发展简述

在上世纪末与极隧射线发现的同时,出现了气体放电离子源。然而,到二十世纪三十年代,才开始发展高效率离子源。特别是核物理领域的研究,促进了这些装置的进一步改进。很自然,在建立第一批人工分裂原子核的装置时,利用了早已知道的极隧射线离子源^[1-11],这种离子源得到的质子含量不算坏(大约50%),直到很晚还认为这种离子源工作简单、可靠。

这类离子源中发生的放电根本不同于辉光放电;特别是通过极隧引出了较大的离子流可以证实这点。在这里起主要作用的是 β 过程,即离子与气体原子碰撞的电离,而不是对维持辉光放电有关键意义的 γ 过程(离子轰击阴极时打出电子)。由于径向聚焦离子的电场作用结果,放电室中产生轮廓鲜明的放电“刷”。尽管在 Oliphant 和 Rutherford^[1]的工作之后,在改善放电“刷”区域的离子聚焦方面作了一些改进,但由于这些离子源的非生产气体耗率较大,引出离子的能量散度较大^[11],因而逐渐地被其它更完善的离子源所代替。只有到1949—1950年,在 Kamke 的工作中^[8,9]才对极隧射线离子源内发生的现象作了详细分析,那时已经出现了更为合理的质子源。

三十年代,为了降低离子源的工作电压,开始用热阴极弧放电来作离子源^[12-17]。这些离子源用了较大的放电电流^[13],

限制了放在引出孔道近旁的阳极大小^[15]，引进了有负电位的吸极，这个吸极上有用来从等离子体中引出离子的孔道^[13,14]。尽管采取了这些措施来加强放电和更好地利用所获得的离子，但还没有产生合理的实用结构，却为研制出新型的高效率离子源——毛细管弧离子源打下了基础^[18-27]。

这类离子源的工作原理是增加放电管收缩处的等离子体浓度。Tuve 等人的工作^[18,20]为研制毛细管弧离子源打下了基础。后来，研究了它的结构和运行问题，改进了引出离子的方法，找到了提高质子含量的途径。这种离子源能够得到毫安数量级的离子流。但是，气体利用系数不高，质子含量低（低于 20%），弧燃烧不稳定，放电着火困难以及毛细管弧离子源特有的其它一些缺点，都限制了它的应用。必需改善离子源参数，特别是必需降低气体的非生产耗率，促使人们去寻找提高电离效率的新方法。

其中一种方法就是应用气体磁控管系统^[28-32]，这种系统的特点是沿着磁场和阴极方向形成离子——电子束，Слущкин 及其同事^[29-31]首先研究了这种方法。虽然后来别的研究者，特别是 Перович 及其同事^[32,33]也研究了这种系统，但它在技术上的可能性至今还没有充分弄清。其它方法——利用电子振荡来人工加长电子路程，能够降低工作气压。人工加长电子路程的条件，已有人专门地研究过，例如在 Корсунский 等人的工作中^[34,35]。利用磁场可以产生对电子振荡特别有利的条件。虽然很早就已经知道这样的系统^[36]，但是晚得多才研制出这类离子源的实用结构^[37-44]。

在这样的系统中，快电子被磁场约束在阴极和对面的反射器之间作多次振荡，于是沿着轴向形成电位“沟”，离子沿着电位沟朝装置的两端方向运动，特别是朝着输出孔道方向运动。但在一些情况中，例如在回旋加速器的离子源中，却是

在垂直于磁场的方向引出离子。由于工作气压较低,有电子振荡的系统还可以用来作为研制大功率离子泵的基础^[45,46]。Морозов 及其同事、Семашко、Kistemaker、Ковальский 等研究过的这些系统,能够在气体利用系数高达百分之几十以上的情况下得到较大的离子流。虽然放电是在有利于原子氢复合的金属壁之间进行,但是从这类大功率装置中引出的离子束内,质子含量有时可以达到很高的数值(50—80%)。不但如此,由这种大功率离子源引出的离子束中,很难得到小的质子含量。只有对其中发生的现象作了精细的分析之后^[47],才得到了分子离子占优势的大功率离子束。许多类似的系统,特别是 Морозов、Семашко、Маков、Jones 和 Zucker、Пасюк 等人研制的离子源,不仅是大功率的氢离子源,而且是很好的多电荷离子源和用来分离稳定同位素的离子源^[43,48—52]。这些离子源的各种工作状态——有电子振荡或没有电子振荡,是按物理过程有利还是不利来确定的^[43,47]。

Незлин、Жаринов、Райко 等人对电子补偿离子束空间电荷过程的研究^[53—60],在实践上是很重要的。离子发动机系统中离子束空间电荷中和的研究工作(参见,例如[61, 62]),就与上述的研究紧密相关。

在一些离子源中,其中包括 Lamb 和 Lofgren^[63] 以及 Плешивцев 等人^[64,65]研制的大功率离子源,在没有电子振荡的情况下,利用了均匀的或不均匀的磁场来箍缩等离子体。这种被磁场准直的电弧,早先曾用作回旋加速器的离子源^[66—68]。至于毛细管弧离子源和磁型离子源,其缺点是必须使用热阴极,因而就限制了它们的连续工作寿命。这个情况就成了发展潘宁放电冷阴极离子源的原因^[69—76]。这种装置结构简单,工作持久可靠。但是它们不能提供较大的离子流(特别是在连续工作状态下),而当放电电流较小时,引出的离子束

中质子含量又很低。此外,从它们引出的离子束调制度也较大。在 Рейхрудель 及其同事的工作中^[77-81],详细地研究了用作离子泵、小功率离子源和电子源的低气压潘宁放电。

1950 年作者提出了利用大功率脉冲冷阴极弧放电来做离子源^[82,83]。曾经研制出了一种实验室装置,其中最初的潘宁放电过渡到了电流至 200 安培的大功率脉冲弧放电。原来这种离子源可以把氢几乎完全离解和引出较大的离子流。近几年来在许多工作中^[84-91]研究了各种形式的冷阴极脉冲离子源。特别值得指出的是有中空阴极的脉冲离子源^[92,93],以及由 ПЛЮТТО 及其同事研制的真空火花脉冲离子源^[84]。

1950—1951 年间,在冷阴极离子源^[82,83]中首次实现了从渗透到真空中的等离子体扩展边界面引出离子。这种方法后来在各种离子源中成功地用来形成大功率的离子束^[63,84,94-100]。对这个方法的改进,可以指出的有:从磁化外等离子体发射体表面引出离子的方法^[64,65,101],以及从用网栅固定下来的渗透等离子体表面引出离子的方法^[102]。

除了强流离子束的等离子体源外,还有在很低气压下工作的各类离子源。在这些仪器中,我们仅指出最近由 Спивак、Зинченко 等人研制出的离子源^[103,104]。

高频离子源^[105-122]得到了广泛应用,例如在静电加速器中。很早就提出过用高频放电来做离子源的想法^[32],然而只是在 Thonemann 的工作^[109,110]之后这种离子源才得到了广泛应用,这时通过提高质子含量从而改善了这种离子源的参数。取得这种成功,是由于从放电室中移走了金属部分,把带有离子束输出孔道的负吸极插入等离子体中从而提高了离子引出效率,以及在恒定磁场作用下强化了靠近吸极的等离子体。在这类离子源的研制过程中,详细地研究了所谓等离子体聚焦。

在过去十年中,高频离子源不断得到改进,目前它们能够

给出原子离子含量大于 90% 的最纯束。在连续工作的装置中^[111-114]引出的离子束流达到了几十毫安,而在脉冲高频离子源中达到了几百毫安^[115-117]。特别是 Сербинов 的工作^[105,112,119-122],对发展连续工作的高频离子源作出很大贡献。

被放电管收缩区限制的等离子体中,除了电流密度提高之外,还可以形成双电层,基于这种工作原理的离子源,已应用得很广泛。电子在这种层中得到加速,在阳极附近形成电离增强的区域。Ardenne^[123]提出了单等离子体离子源。单等离子体离子源中离子从收缩区的阳极端引出,即从粒子浓度最大的区域引出。Ardenne、Демирханов 和 Fröhlich 研制出了双等离子体离子源^[97,123,124]——等离子体二次箍缩的离子源,在这种离子源中,等离子体在收缩之后又被不均匀的强磁场箍缩,成为电离度很高和绝对浓度很大的介质。近几年来出现了许多双等离子体离子源的新结构:电子振荡的双等离子体离子源^[125],用铁氧体的双等离子体离子源^[126]等等。特别是 Kelley 及其同事对大功率双等离子体离子源的研制^[120,127]。许多双等离子体离子源能够得到有最大初始电流密度的大功率离子束和电子束,这种离子源的特点是离子束的调制度相当小和离子的能量散度很小。

在最近二十年中,每年发表的制造和研究离子源的文章不断增加。在离子源发展的决定性阶段——1952—1953 年期间,已经研究出了制造满足各种技术要求的装置的基本原理。然而在以后的年代中,继续进行了紧张和有成效的工作,来改进这些装置和研究其中发生的物理现象。现在的离子源,能引出大约 1 安培的束流^[63-65,99,117,128-130],而离子源引出孔处的离子流密度为 100 安培/厘米²^[131]。已研制出了各种类型的离子源,使得我们能够选择最合适的离子源来解决每一项具体任务。在大功率的连续离子源中,磁型离子源(有振荡和

无振荡的)和双等离子体离子源特点是有高的参数。在流强比较小的离子源中,高频离子源的质量比较好。

冷阴极离子源在运行上有重大的优点。

目前面临着离子源发展的新阶段,其特点是不仅要进一步提高引出的离子流,而且还要扩大这些装置的用途^①;负离子等离子体源、难熔金属离子源、快中性粒子源(参见 Ehlers, Морозов, Гусев, Фогель, Корсунский, Хижняк 等人的工作^[52, 390, 423-426, 440, 441])获得了日益增多的应用。新技术的发展对离子源的发展有重大影响:寻找控制热核反应的途径、发展加速技术和加速技术新方向的出现、离子和等离子体发动机的研制^②、各种工艺应用^[132-142]。在理论上和实验上研究成形中和输运中的离子束特性,具有重大的实际意义,尤其是考虑到离子束最终相体积的那些研究(参见 Капчинский, Steenbergen, Тепляков, Кузнецов 等人的工作^[494, 495, 611, 648])。

最后应该注意到,本书中所讨论的等离子体离子源,它们一般是这样来使用的,即在等离子体边界面上电荷相应分开之后,束离子在等离子体外的电场中获得能量。这种离子束成形方法,能够比较容易地使离子获得较大的能量,但它的缺点是,从离子束成形的时刻起,离子束的空间电荷就对束的发散产生影响。除了用这种方法来获得已加速的离子束外,还有另一种方法,无需预先分开电荷,直接在等离子体内加速离子流^[143]。对在等离子体内加速离子方面,特别是 Морозов 作出了重大贡献,他的工作也为“等离子体光学”奠定了基础^[144]。为了使等离子体中的自由离子束和离子流得到聚焦,采用的

① 还可参见如: J. Kistemaker, *Particle Accelerators*, **3** (1972), 55.

② 还可参见如: G. R. Brewer, et al., *Proc. IRE*, **49** (1961), 1789.
Proceedings of the Symposium on Ion Sources and Formation of Ion Beams, Brookhaven National Laboratory, 1971.

相应透镜,其效果超过一般的电透镜或磁透镜。有一种直接在等离子体内加速离子的系统,称为非等温系统^[143],它与存在电子压力梯度有关,并且在从潘宁放电引出的等离子体内得到了实现。

气体放电离子源方面已经发表了大量的评论性文章^[105,107,108,123,145—158,520,582,607]。

2. 对离子源的要求。离子源的参数

在科学和技术领域中,越来越广泛地应用等离子体离子源。可以指出,目前应用等离子体离子源的有下列主要领域:

- 1) 核物理领域研究用的带电粒子加速器;
- 2) 向磁捕集器补充快离子的带电粒子注入器;
- 3) 制造离子发动机;
- 4) 电磁分离同位素装置;
- 5) 各种科学研究:离子束与等离子体或与固体表面相互作用的研究^[140,159],高温化学的研究,固体表面的微分析^[160];
- 6) 各种工艺过程:固体加工^[137—142],半导体合金化^[140,159],金属表面纯化,固体表面形成金属薄膜^[161],或者从这个表面消除薄膜等等。

当然,所列举的每一种应用都对离子源提出了特殊的要求。例如,在静电加速器中所用的离子源,并不需要离子束电流很大,但要求有较长的寿命。要求寿命较长的重要性,是由于这种加速器内离子源照例放在压缩气体中的高压电极下,要更换或修理离子源就必须打开一次发生器,这是我们很不希望的。相反,在串列加速器中,离子源不处在高电位,这就便于能量输入、离子源的冷却、拆卸和修理。负离子源适合这种加速器的特殊要求,负离子被加速后在电荷交换室中剥掉两个电子,然后以正离子形式再被加速。

在迴旋加速器中,离子源通常处在强磁场内,空间也受到限制,并在垂直于磁场的方向引出离子。因此,离子源应该采用强迫冷却,阴极要有足够的强度,否则阴极在加热电流和外磁场相互作用下就可能变形。从外部的离子源沿磁场方向把离子引入迴旋加速器,接着使这些粒子的轨道改变 90° [162],这样就消除了离子源处于极间空间时存在的许多限制。在迴旋加速器中也可以加速负离子 [163]。在同步迴旋加速器(稳相加速器)中有可能用脉冲离子源,特别是可能用冷阴极脉冲离子源。

获得超铀元素的方法之一是用多电荷离子轰击各种靶。所以研制电荷数 Z 较大离子的强流离子源是重要的课题,但也是很困难的任务。

在离子源是带电粒子注入器组成部分的一些情况下,它应该给出电流很大的离子束,例如安培数量级。制造这种注入器的离子光学系统要特别精密。所以在一系列的情况下,降低从离子源中引出离子的“温度”,就可能成为迫切问题。当用等离子体离子源向受控热核聚变的磁捕集器中注入离子或快中性原子时,对离子流的大小就产生了类似的或者更难满足的要求。例如,在这两种情况下当获得流强约 1 安培的离子束时,消散离子源放电室内或各个电极表面上直接产生的热就成了问题。在加速器中常常要求的是质子源,而在向磁捕集器中注入离子的情况下,就需要大功率的氢分子离子源或快中性激发原子的源。

电磁分离难熔元素同位素用的离子源,其结构与别的离子源有重大区别,例如,不能用容易输入的气体作这种离子源的气体放电介质,而要用难熔元素的蒸气,为了获得难熔元素的蒸气,有时必须把整个离子源维持在高于 2000°C 的温度。一系列的重要技术应用,都需要特殊的难熔元素离子源,特别