

霍尔漂移对阳极层霍尔等离子体加速器 电离效率的影响*

耿少飞[†] 唐德礼 邱孝明 聂军伟 于毅军

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

(2011年3月28日收到; 2011年7月2日收到修改稿)

以洛伦兹变换方法为基础, 分析了阳极层霍尔等离子体加速器中电子的霍尔漂移, 结果表明在交叉场中, 霍尔漂移并不总是存在的, E/B 的比值大于光速时, 霍尔漂移将不存在. 进一步的分析表明, 霍尔漂移也并不总是回旋形式的, 不同的电磁场配置以及不同的电子初始能量将带来不同形式的漂移, 包括回旋形式, 波浪线形式, 甚至直线形式. 电磁场的配置也决定着霍尔漂移的速度, 在很大程度上影响着电子的能量, 这就决定了放电时的电离效率. 对不同电磁场配置进行数值模拟发现, 合理的电磁场比值能够得到更好的电离效率 (对于氩, 这个数值大约为 4×10^6). 不同的气体, 根据其电离碰撞截面与电子能量的关系, 都有不同的合理比值.

关键词: 霍尔漂移, 电离效率, 霍尔等离子体加速器, 数值模拟

PACS: 52.75.Di, 29.25.Ni, 52.65.Rr

1 引言

在直流辉光放电设备中, 磁场的引入可以有效的增大放电的强度, 使等离子体密度得到大幅度的提升. 正交电磁场放电, 即 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 形式的放电, 更是在很多磁控放电装置中存在, 例如 Penning 放电^[1], 磁控溅射设备^[2], 霍尔加速器等^[3,4]. $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 放电的主要特征是存在电子的霍尔漂移, 电子在霍尔漂移过程中同中性原子碰撞发生电离.

阳极层霍尔等离子体加速器的主要放电区域就是电子发生霍尔漂移的区域, 即霍尔漂移是其维持气体放电的主要机理. 这里我们所要关注的问题是: 如何在保证其放电稳定性的基础上提升其放电效率. 这个问题依然要从霍尔漂移机理的角度进行分析.

霍尔漂移放电设备是一个具有较长历史的话题, 较为系统的阐述出现在 Zhurin 所著的关于霍尔推进器的综述中^[4]. 但是其中对于磁场参数的选择

却具有一定的局限性: 只是根据由放电设备的物理尺寸限定的电子回旋半径来给出磁场的大致范围. 此外关于磁场位形对放电的影响也有过讨论^[5-7]. 但是我们知道, 霍尔漂移是电场和磁场共同作用的结果, 我们不能只考虑磁场而忽略电场. 所以我们需要从其他的角度来分析霍尔漂移中不同电场同磁场的匹配值会对放电产生什么样的影响.

既然放电产生的自由电子气是同电磁场相互作用的, 那么可以考虑从动体的电动力学的角度来探讨这个问题. 这在文献 [8] 中有一个很好的开始, 其中描述了使用洛伦兹变换方法来分析正交电磁场中带电粒子的运动情况. 对于正交电磁场来讲, 可以很简单地选择一个洛伦兹参考系, 使得其中的电场为 0, 磁场的方向同实验室磁场方向相同, 这时就可以很简单的得出带电粒子会产生霍尔漂移的结论, 并且依照此方法向下讨论我们能得出传统理论得不到的一些其他结果.

阳极层霍尔等离子体加速器主要用作离子源,

* 国家自然科学基金 (批准号: 10975050) 资助的课题.

[†] E-mail: akpybe@gmail.com

因此其电离效率是比较重要的考察参数. 电离效率是指电离过程中电离出的离子与所使用的电子的数量比值, 即单位数量的电子与中性原子碰撞所产生的离子数目. 因此我们又分析了 E/B 的比值对电离效率的影响. 这对于阳极层霍尔等离子体加速器的设计具有一定的指导意义.

2 霍尔漂移的洛伦兹变换分析 [8]

为了讨论的方便, 我们在这里采用高斯单位制来阐述.

对于在正交电磁场中的带电粒子来讲, 我们可以找到一个洛伦兹参考系 K' , 使得 K' 系相对于实验室系 K 的速度为

$$\mathbf{u} = c \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}. \quad (1)$$

那么在 K' 系中电磁场将会变为

$$\mathbf{E}' = \gamma \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{u}}{c} \times \mathbf{B} \right) = 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{B}' = \frac{1}{\gamma} \mathbf{B} = \left(\frac{B^2 - E^2}{B^2} \right)^{1/2} \cdot \mathbf{B}, \quad (3)$$

γ 是洛伦兹变换因子. 这样变换之后, 在参考系 K' 中, 电场为 0, 磁场大小出现了变化, 但磁场的方向不变. 所以带电粒子会在 K' 中做封闭圆周运动. 在实验室参考系 K 中, 就要叠加上坐标系 K' 本身的运动, 这样带电粒子的封闭圆周运动会被拉伸成回旋漂移形式, 而速度 \mathbf{u} 则是导向中心的漂移速度. 见图 1 所示.

带电粒子的漂移速度大小为 $u = c \frac{E}{B}$, 因此 $|E| < |B|$ 是形成霍尔漂移必需的条件. 同样我们也能在 (3) 式中看到 $|E| < |B|$ 的要求. 而 $|E| > |B|$ 意味着漂移速度大于光速, $|E| > |B|$ 在物理上是可以成立的, 但是速度大于光速则是没有物理意义的.

如果 $|E| > |B|$, 则应选用另一参考系, 在这一参考系中, 只剩下电场, 磁场为 0, 粒子的速度不断增长, 呈现双曲线特征的运动, 霍尔漂移也将不存在. 这样的情况并不常见, 例如, 对于 100 高斯的磁场来讲, 电场的阈值为 100 statvolt/cm, 即 3000 V/mm. 在我们感兴趣的范围内, 这样的情况很难遇到.

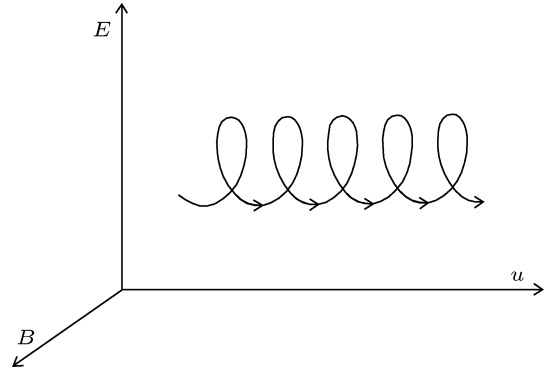


图 1 交叉场中带电粒子的霍尔漂移

3 霍尔漂移的不同方式

参考系变换方式提供了一种较为方便的途径来分析霍尔漂移过程中带电粒子的运动. 因为带电粒子在 K' 系中的运动是封闭的圆周, 圆周的上、下两个位置速度相同但方向完全相反, 如果叠加上 K' 系的漂移速度 u , 那么就会出现一个恒定的速度差, 为了分析这个速度差, 我们人为地在带电粒子运动轨迹上定义上止点和下止点 (见图 2).

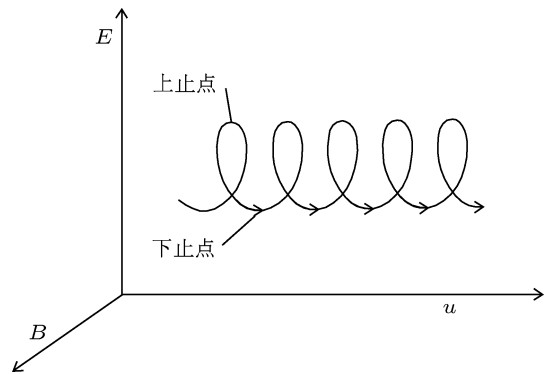


图 2 上止点和下止点的定义

上止点的速度最小, 下止点的速度最大, 如果假定下止点的速度为 v , 那么在 K' 系中, 对应位置带电粒子的速度为 $v - u$, 再回到实验室系中, 叠加上 K' 系的漂移速度 u , 会得到上、下止点的速度分别为

$$\begin{aligned} v - u - u &= v - 2u, \\ v - u + u &= v. \end{aligned} \quad (4)$$

这样就可以知道上止点和下止点之间有着恒定的速度差 $2u$. 同时上止点的速度 $v - 2u$ 也带来讨论, $v - 2u > 0$ 和 $v - 2u < 0$ 将会是不同的运动

状况. 为了讨论这样的运动, 我们使用二维 Particle in Cell 程序 XOOPIC^[9,10] 来进行模拟判断.

在模型中取电场 2×10^4 V/m, 磁场 100 G ($1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$), 漂移速度为 2×10^6 m/s, 带电粒子选择为电子, 取下止点速度为 5.56×10^6 m/s, 得到图 3 所示的电子图像.

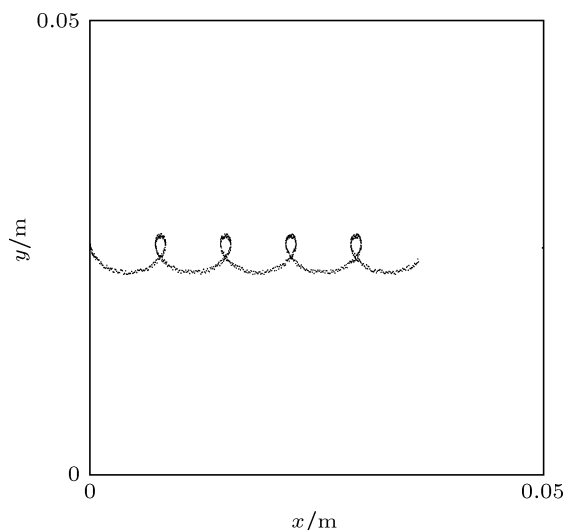


图 3 电子的回旋漂移

图 3 中的情况是 $v - 2u > 0$ 的状态, 电子可以跨过上止点, 做出回旋形式的漂移. 但是如果我们取下止点的速度为 3.7×10^6 m/s, 这样恰好对应着 $v - 2u < 0$ 的情况, 图 4 为其得到的电子图像. 可以看到电子并不能跨过上止点, 漂移轨迹也不会是回旋形式的, 而是波浪线形式的.

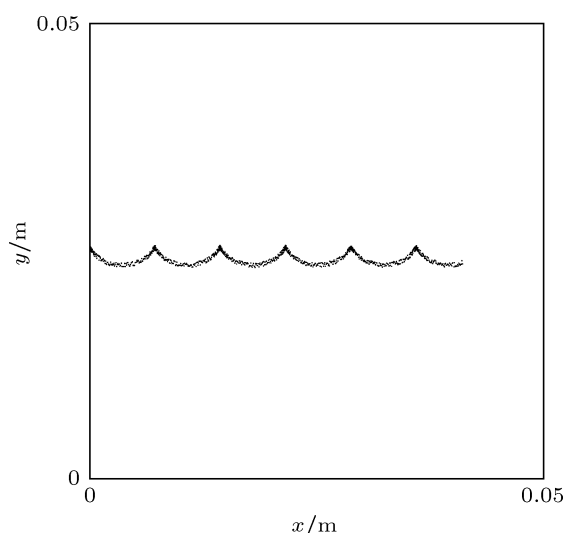


图 4 电子的波浪线漂移

当然还有更极端的情况, 即 $v = u$ 的时候, 漂

移将是一条直线, 如图 5 所示. 从实质上讲, 这是波浪线漂移的一种特殊形式. 交叉场速度选择器所依据的正是带电粒子的直线形式的霍尔漂移.

因此, 漂移并不总是回旋式的, 漂移的形式可以完全由电磁场来确定, v 和 $2u$ 的比较是漂移形式的判断方式.

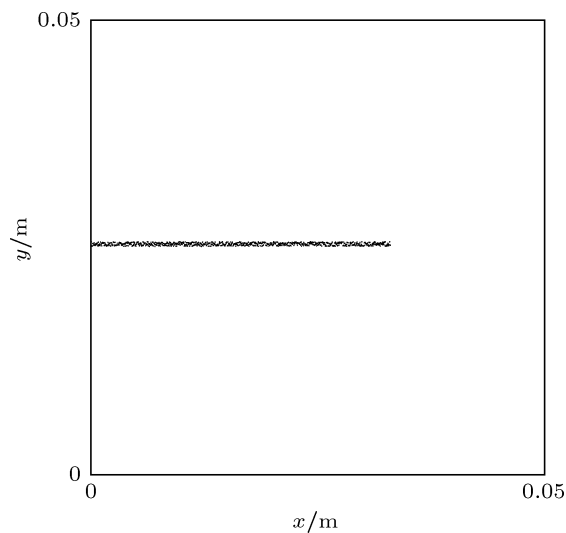


图 5 电子的直线漂移

4 电磁场对电离效率的影响

由前面的讨论可以看出, E/B 的比值影响着霍尔漂移的形式, 同时, 因为霍尔漂移的速度由 E/B 决定, 因此也在很大程度上决定了电子的能量.

在阳极层霍尔等离子体加速器中, 电子与中性粒子的碰撞主导着等离子体的产生. 而电子与中性粒子的碰撞概率同气压和碰撞截面相关, 而碰撞截面完全由电子能量决定. 电子与中性粒子的碰撞截面与能量之间的关系需要通过实验来进行测定, 这方面的工作已经有近一个世纪的历史^[11-14]. 对于氙气, 电子与氙气原子碰撞产生一阶电离的碰撞截面在不同方式的实验中有着几乎相同的数据^[15]. 这里我们使用了文献 [15] 以及文献 [16] 的实验结果, 他们的实验结果在测量范围上是不同的, 但是测量得到的数据差别不大, 如图 6 所示.

由电子能量与碰撞截面的关系图可以看到, 电子在 80—100 eV 之间时, 碰撞截面达到最大, 在阳极层霍尔等离子体加速器中, 电子自身很难有这么大的能量, 但是电磁场产生的漂移可以使电子以足够高的速度运动, 从而得到足够的能量. 这时, 磁场

的强度不能太大,太大的磁场强度会使得漂移速度降低,而能量正比与速度的平方,因此下降更快.

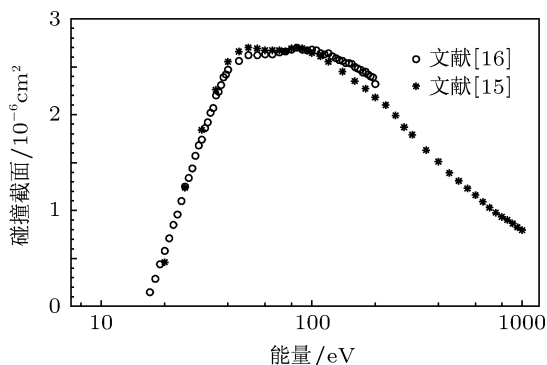


图6 电子能量与产生 Ar⁺ 的碰撞截面的关系^[15,16]

通过数值模拟我们发现如果电场为 80000 V/m, 磁场 200 G, 那么如果电子以 0.05 eV 的能量进入此区域后, 最终的平均能量是 92 eV, 在我们所要求的范围内.

为了验证这样的推测, 我们使用 XOOPIC 建立数值模型, 在其中加入 Monte Carlo 碰撞电离机理, 设定气压 0.005 Torr (1 Torr = 1.33322×10^2 Pa), 在 50 mm 的距离上施加 4000 V 的电压, 分别施加 200 G 和 400 G 的磁场, 观察 5000 个时间步长过程中, 电离得到的离子数量的对比. XOOPIC 中对氩使用的原始碰撞截面为文献 [17] 中的数据, 为此我们对 XOOPIC 的 Monte Carlo 碰撞机理中 Ar 气体的碰撞截面进行了修改.

阳极层霍尔等离子体加速器通常是作为离子源来使用的, 因此对于结果数据, 我们考察的角度主要是离子的产率. 由表 1 中的计算结果可以发现, 在上述条件下, 200 G 磁场下的电离效率要明显优于 400 G 磁场的情况, 并且后者由于磁场较大, 会在空间中约束大量的残留电子, 这会使得空间电势产生难以控制的畸变. 因此我们认为, 单从电离效率的方面考虑, 对于氩来讲, 理想的交叉电磁场的比值大约为 4×10^6 .

需要注意的是, 在实际的放电装置中, 由于受到设备尺寸的限制, 磁场的选择还要考虑到回旋半径与设备尺寸的比较. 另外不同的气体, 碰撞截面

与电子能量的关系是不同的, 所以不同的气体应该进行不同的讨论.

表 1 计算结果的对比

磁场强度/G	电子数量 (计算空间留存)	离子数量
200	4.44×10^8	4.15×10^8
400	8.53×10^8	2.44×10^8

5 结论

以洛伦兹变换为出发点对交叉场中电子的运动进行分析, 很容易便得到了电子会进行漂移的结论. 并且发现漂移并不是永远存在的, 当电场的强度太大以致于漂移速度大于光速时, 漂移是不存在的, 取而代之的是双曲线运动.

在一般的情况下, 电子的漂移也并不总是简单的回旋式漂移, 根据电磁场条件以及电子能量的不同, 也会出现波浪线式的漂移, 甚至会出现直线式的漂移.

电磁场决定的漂移速度很大程度的影响着电子的能量, 而由电子能量决定的碰撞截面又决定着碰撞概率, 因此对于氩来讲, 如果我们能使电子的平均能量在 80—100 eV 之间, 就能得到最大的电离效率. 所以我们认为对于阳极层霍尔等离子体加速器来讲, 电磁场应该存在着最佳匹配值. 通过数值模拟, 我们发现, 当电磁场的比值在 4×10^6 左右时, 电子的平均能量为 92 eV, 此时的电离效率明显优于其他的电磁场配置. 但是本文的数据仅仅是针对氩, 如果是其他种类的工作气体, 那么就要根据其相应的电离碰撞截面数据另作讨论.

但是需要讨论的是, 在实际的放电中, 等离子体中的电场并不是均匀的, 只有在鞘层中才能存在 10^4 量级的电场. 对于阳极层霍尔等离子体加速器来讲, 其电离区域的电场正是在我们所讨论的量级上. 因此本文的讨论对其磁场的选择具有一定的指导意义.

- [1] Roth J R 1995 *Industrial Plasma Engineering* (Vol. 1): *Principles* (Bristol: IOP Publishing) p204
- [2] Roth J R 2001 *Industrial Plasma Engineering* (Vol. 2): *Applications to Nonthermal Plasma Processing* (Bristol: IOP Publishing) p85
- [3] Morozov A I, Esinchuk Yu V, Tilinin G N 1972 *Sov. Phys. Tech. Phys.* **17** 38
- [4] Zhurin V V, Kaufman H R, Robinson R S 1999 *Plasma Source Sci. Technol.* **8** R1
- [5] Keidar M, Boyd I D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 121501
- [6] Dorf L, Raitses Y, Fisch N J 2006 *Phys. Plasmas* **13** 057104
- [7] Tang D L, Zhao J, Wang L S, Pu S H, Cheng C M, Chu P K 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 123305
- [8] Jacson J D 1998 *Classical Electrodynamics* 3rd Edition (Hoboken: Wiley) p586
- [9] Verboncoeur J P, Langdon A B, Gladd N T 1999 *Comp. Phys. Comm.* **87** 199
- [10] Geng S F, Tang D L, Zhao J, Qiu X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5520 (in Chinese) [耿少飞, 唐德礼, 赵杰, 邱孝明 2009 物理学报 **58** 5520]
- [11] Hughes A L, Klein E 1924 *Phys. Rev.* **23** 450
- [12] Compton K T, Van Voorhis C C 1925 *Phys. Rev.* **26** 436
- [13] Smith P T 1930 *Phys. Rev.* **36** 1293
- [14] Bleakney W 1930 *Phys. Rev.* **36** 1303
- [15] Straub H C, Renault P, Lindsay B G, Smith K A, Stebbings R F 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1115
- [16] Wetzel R C, Baiocchi F A, Hayes T R, Freund R S 1987 *Phys. Rev. A* **35** 559
- [17] Rapp D, Golden P 1965 *J. Chem. Phys.* **43** 1464

The influence of Hall drift to the ionization efficiency of anode layer Hall plasma accelerator*

Geng Shao-Fei[†] Tang De-Li Qiu Xiao-Ming Nie Jun-Wei Yu Yi-Jun

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

(Received 28 March 2011; revised manuscript received 2 July 2011)

Abstract

The Hall drift of electrons in anode layer plasma accelerator is analyzed based on Lorentz transformation. It is shown that Hall drift does not exist always in the cross-field. If the ratio of E to B is larger than light speed, Hall drift will disappear. The further analysis shows that the Hall drift is not always in the form of gyration. It is also in the forms of wave and straight line, depending on electric-magnetic field configuration and initial energy of electrons. The electric-magnetic configuration determines the speed of drift, and then affects electron energy. This can determine the ionization efficiency in discharge. A numerical simulation using the Particle-in-Cell method is performed. The result indicates that a nice ratio of E and B will produce high ionization efficiency (for argon, this value is about 4×10^6). This value will change with working gas according to the ionization cross section determined by electron energy.

Keywords: Hall drift, ionization efficiency, Hall plasma accelerator, numerical simulation

PACS: 52.75.Di, 29.25.Ni, 52.65.Rr

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10975050).

[†] E-mail: akpybe@gmail.com