

空心阴极的等离子体源结构方案设计

弥 谦 李鲜娟

(西安工业大学光电工程学院 西安 710000)

摘 要: 通过大量数据分析电磁场对等离子体源性能的影响,采用 ANSYS 有限元分析软件对等离子体源的静态电磁场进行模拟分析,应用 SIMION 静电透镜模拟软件对等离子体源进行粒子运动轨迹仿真验证和改进,最终得出结论管形结构的空心阴极等离子体源结构简单,所得粒子运动轨迹较为均匀,但是粒子出射效率较低。平行结构空心阴极的等离子体源,结构新颖,选用边部向上弯曲的平行圆盘,并在上部放置一个永磁铁,此结构不但能够使得电子从四周逸出而且效率和速度也得到极大提高。

关键词: 等离子体源;离子束辅助沉积;电磁场;数值模拟

中图分类号: TN13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1055

Structure design of the plasma sources

Mi Qian Li Xianjuan

(Xi'an Technological University, School of Optoelectronics Engineering, Xi'an 710000, China)

Abstract: By analyzing large amounts of data of the influence of electromagnetic field on properties of the plasma source, the analog analysis of static electromagnetic field of plasma source, by adopting the ANSYS software of finite element, and the imitation of the particle motion trajectory imitation of plasma source by applying SIMION software of electrostatic lens to imitate, this paper eventually completed the structure design of the plasma sources which is based on the tube type structure of hollow cathode. This structure is simple, and the particle motion trajectories are relatively uniform, but it has lower particle emission efficiency. Hollow cathode plasma source of parallel structure has the new structure, which selects edges bent upward parallel disk, and places a permanent magnet in the upper part. This structure is not only able to make electrons escaping from the surrounding and the efficiency and speed has also been greatly mentioned. This structure not only allows electrons to escape from the surrounding, but also the efficiency and speed has been greatly improved.

Keywords: plasma sources; ion beam assisted deposition; electromagnetic field; numerical simulation

1 引 言

空心阴极等离子体源可用于刻蚀、预清洗和离子束辅助沉积等,同时可提高等离子体表面处理技术。空心阴极的阴极表面包围在管内,由于负辉区内产生的所有离子几乎都能轰击阴极表面,所以这种特殊形式的阴极几何结构会对二次电子发射及阴极溅射产生作用。空心阴极放电具有电流密度大、大量高能电子、维持电压低、带电离子浓度高等特点,被广泛应用于真空镀膜、光谱分析、表面处理等领域,等离子体研究领域的一个分支就是利用空心阴极

放电产生稳定、可控的大面积等离子体^[1],通过流体模型对氩气在管型结构空心阴极中的低气压放电进行二维模拟,同时对粒子运动轨迹仿真验证并改进,结合精密的布气系统^[2]与冷却系统,最终完成等离子体源的管型结构设计。

2 等离子体源基本工作原理

等离子体源的工作原理是以辉光放电和带电粒子在电磁场中的运动为基础的。工作气体由进气管进入离子源内部,沿着配气盘均匀进入离子束源的放电区,通过在

收稿日期:2015-01

阴阳极施加电压发生辉光放电,电离产生电子和离子^[3]。电离后的电子被近似正交的电场和磁场进行束缚,限制电子的运动范围增加了电子与气体原子的碰撞几率,主要是螺旋线形式的轨迹向阳极运动,延长了电子的运动轨迹,与充入的气体原子发生碰撞使其电离。提高气体的离化率,于是在阳极和阴极之间形成一个等离子体区域,其中等离子体在交叉电磁场的作用下从离子源顶端开口引出。

3 管形结构的空心阴极等离子源结构设计

1) 管形结构的空心阴极的放电原理

低温等离子体放电模拟中常用的模拟技术主流的有:粒子模拟、流体模拟、混合模拟,在空心阴极放电领域,应用自恰模型(Monte Carlo 模型和流体模型的混合体),通过将快电子和慢电子与离子进行分别处理,得到了 Ar 气在管型空心阴极放电中的二维模型,并得到管型空心阴极放电特性^[4]如图 1 所示空心阴极剖面。

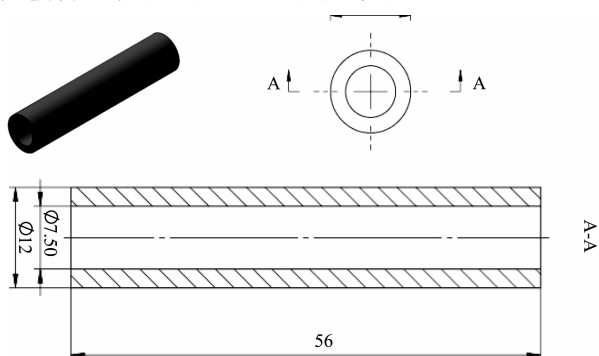


图 1 空心阴极剖面

以 Ar 作为模型气体,模拟了放电电压范围在 150~300 V,气压为 0.5-1 Torr,阴极孔径为 0.30~0.75 mm,阴极筒长为 0.5 cm 的放电条件下的空心阴极放电。

根据大量数据模拟可知:阴极孔径变小,在轴向的 2 个峰值离子密度分布更加靠近阴极管的两端;阴极孔径变大,离子密度降低,由于负辉区未重合沿径向很明显的出现 2 个峰值。

2) 空心阴极管形结构的等离子体源的工作原理如图 2 所示。

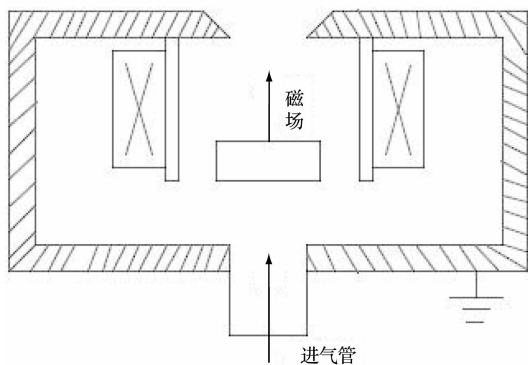


图 2 工作原理示意

3.1 等离子体源的电磁结构设计

等离子体源是一个高度对称的结构,主要包括空心阴极(包括陶瓷绝缘筒)、阳极、阳极保护管、隔热屏、线圈等结构,并由它们构成磁场电场系统、布气系统、水冷系统等主要部分。如图 3 所示为等离子体源的三维设计,图 4 所示为等离子体源的结构示意。

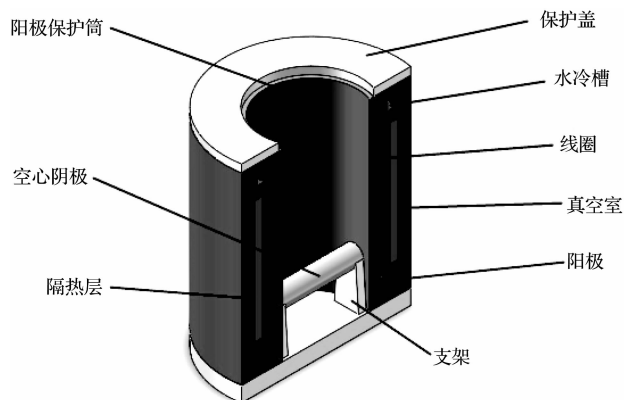


图 3 等离子体源的腔体设计

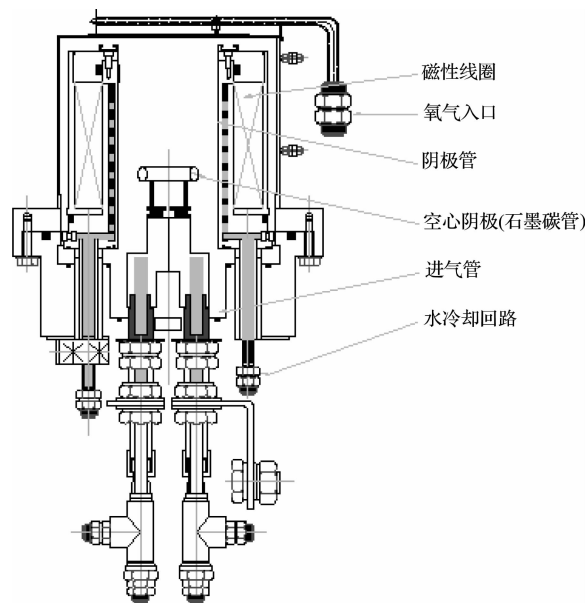


图 4 等离子体源结构示意

1) 电场系统的设计

等离子体源的电场是通过施加在阴阳极的电压形成的,简单地讲空心阴极和阳极共同构成放电室,碳管空心阴极为装置中的核心部件,为了满足空心阴极放电产生的条件 $L > 7R$,碳管内径 R 为 7.4~7.5 mm,长度 L 为 55~56 mm,为了保证放电只发生在碳管内壁与阳极之间,碳管外套了一层陶瓷,空心阴极和陶瓷一起固定在最外面的金属外壳内,金属外壳通过真空器壁接地作为放电极。将电压施加在阳极上,阳极必须是导电不导磁,耐高温材料,为此选择钼。对于空心阴极材料,不仅要求其导磁导电,而且由于放电过程中会有离子轰击阴极,因此阴极材料应具有较高的二次电子发射系数和较低的溅射系数,较

高的二次电子发射系数可以产生更多的电子来加剧放电过程,较低的溅射系数可以避免阴极材料被离子溅射而导致尖端放电或阳极短路^[6]。为此阴极可选低碳钢、不锈钢等,本设计选用石墨碳管。

2) 等离子体源的磁路系统的设计

根据具体应用的需要,等离子体源可以设计成筒状的,一般子来说引出的离子束成锥形的,离子源能工作在低气压的放电模式这是理想状态,在低气压低磁场模式下,放电电压对放电电流的影响比较小,而在低气压高磁场模式下,放电电流随放电电压的增大而增大,所以通过改变阳极电压可以方便地调节放电电流。磁场在离子源放电和维持过程中起着举足轻重的作用,磁场有通电的线圈提供,可以用通、断电流控制,磁性的大小可以用电流的强弱或线圈的匝数来控制,也可改变电阻控制电流大小来控制磁性大小^[6],它的磁极可以由改变电流的方向来控制等。

3.2 电磁场 ANSYS 有限元软件模拟仿真

等离子体源磁场和电场的分布对离子源的放电过程非常重要,并最终影响其整体的束流性质和使用性能。因此,在对等离子体源粒子运动轨迹进行模拟研究前,应先模拟电路,探究出等离子体源的结构和电磁场分布之间的关系,找出二者之间的规律,并结合电场和磁场的要求来对结构进行初步的优化设计。首先要根据 ANSYS 软件的要求为分析该目标体建立一个模型环境,然后改变参数对电磁场进行分析。参数要求如表 1 所示。

表 1 参数要求

极间电压	150~300 V	接地方式	共地
励磁电流	5~10 A	偏压	50~250 V
模型气体	Ar	气压	0~130 Pa
气体流量	Ar:20 Sccm O ₂ :40 Sccm	工作温度	300 K
线圈匝数	60	线圈直径	2 mm
碳管内径 r_1	7.5 mm	外径 r_2	12 mm
管长 L	56 mm	极间距	2 cm
腔体口径	4 cm		

1) 等离子体源的数值模拟求解过程

利用 ANSYS 对电场和磁场进行数值模拟需要进行前端处理、分析求解和后端处理。

2) 等离子体源对磁场的基本要求

磁场是等离子体源正常工作的基础,影响着离子源的工作性能,所以磁路设计是线性离子源设计的核心^[7]。由等离子体源工作原理可知,线圈在适当电压的作用下,在腔体内部形成稳定的磁场分布,等离子体电离后在磁场作用下形成锥形的离子束流,如果等势与磁力线有一定夹角,直接造成电子在磁力线方向获得分向速度,电子就有可能直至阳极,磁场降低了对电子的约束,从而导致电离效率降低,同时导致离子源的性能降低。所以,在确保离子源正常工作所需要的磁场形状与大小的前提下,磁路设计还应尽量优化离子源性能和结构。

离子源能正常工作,其磁场的强度必须能使等离子体加速飞向真空室顶端;等离子体源大部分磁通应集中在放电室;磁场在极间相同位置磁通密度应保证尽量均匀,避免磁场波动太大造成的放电不稳定^[8]。

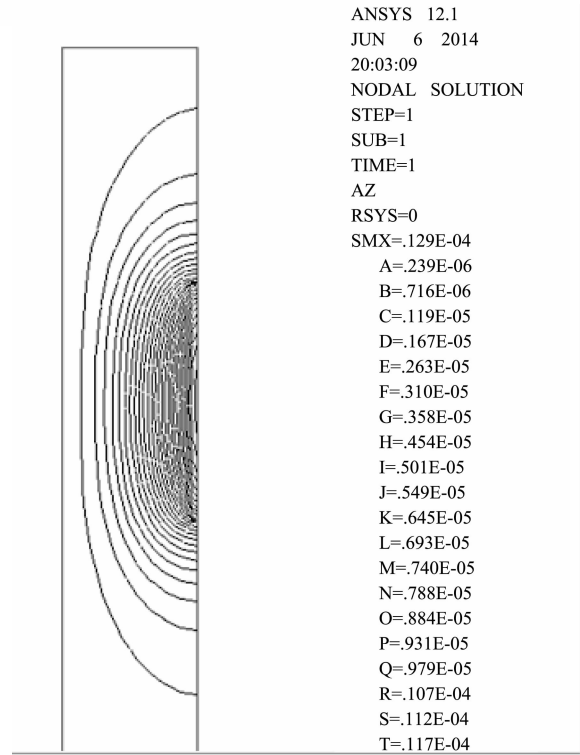


图 5 增大阳极长度的磁力线分布

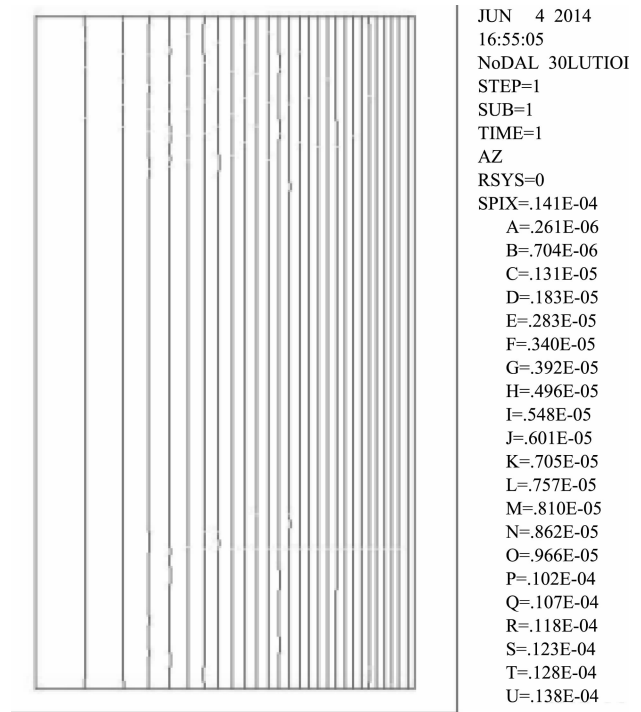


图 6 腔体内部的磁力线分布

设定空气的磁导率为1,线圈为包漆铜线,磁导率同样设为1,线圈直径2 mm,线圈匝数60,线圈励磁电流5 A,线圈面积为 $0.002 \times 0.12 = 2.4 \times 10^{-4}$,匝数60,电流等于5 A,密度等于 $60 \times 5 / (2.4 \times 10^{-4}) = 2\,500\,000$,画阴阳极几何模型,由于对称,只需要画一半施加电流密度,模拟的磁力线分布如图5和6所示,磁感应强度如图7所示。图5所示增大阳极长度的磁力线分布,中间约1/3长度为腔体内磁力线分布在区域,图6腔体内部的磁力线和线圈轴线近似平行。

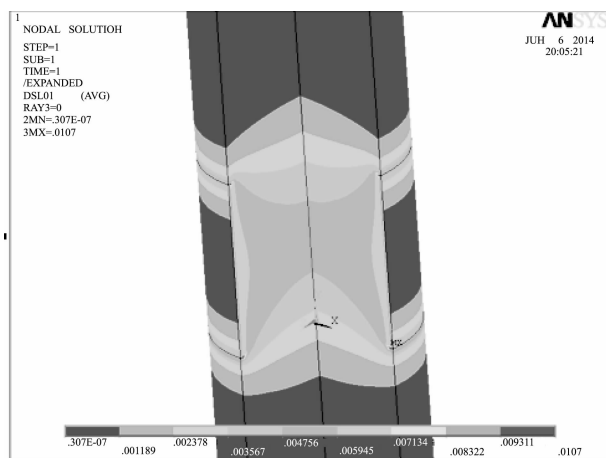


图7 磁感应强度

电流为5 A时可以看出线圈内部空间磁感应强度是 $B=0.004\,8 \sim 0.005\,9$,电流改为10 A的磁感应强度随着电流增加2倍,可以看出线圈内部空间磁感应强度2倍放大到 $B=0.009\,5 \sim 0.012$ 如图8所示。

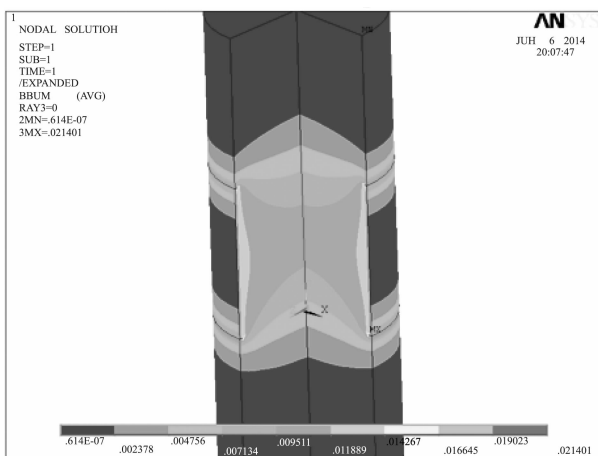


图8 电压为10 A的磁感应强度

10 A阳极改为2 mm厚铁磁性物质结果,可以看出阳极外磁场强度大大增强,阳极铁磁性物质屏蔽了内部的磁场如图9所示。

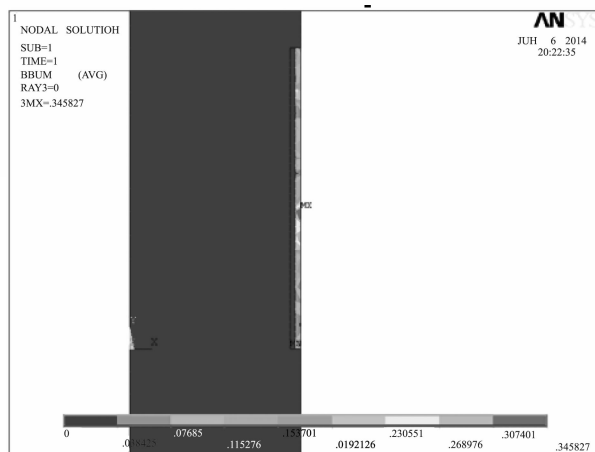


图9 阳极铁磁性物质的磁感应强度

3) 等离子体源对电场的基本要求

等离子体源的电场分布对气体辉光放电、等离子体的产生、等离子体的引出加速等过程都有影响,要求输出电压、电流能够易于控制且能和电源协同工作^[9],相比较于一般离子源的磁场,该类离子源的电场分布影响因素较少,不同的放电室结构就表现出不同的电场分布。

线性离子源对电场的基本要求包括:1)施加的电压最小值应足够大来保证放电;2)电场的分布要求均匀,且能与磁场尽量处处正交。

等离子体源电场模拟仍采用前面对磁场进行初步优化后的尺寸进行建模,定义材料属性,节电常数设为1,不同的是由于模型中阳极接地施加0 V的电压,而阴极电压设置-150 V和-300 V,得到对磁场优化后的等离子体源结构进行电场模拟后的电位分布如图10和11所示,极间电压设置为300 V时,极间距离分别取1.5 cm和3 cm的电场强度分布如图12和13所示。

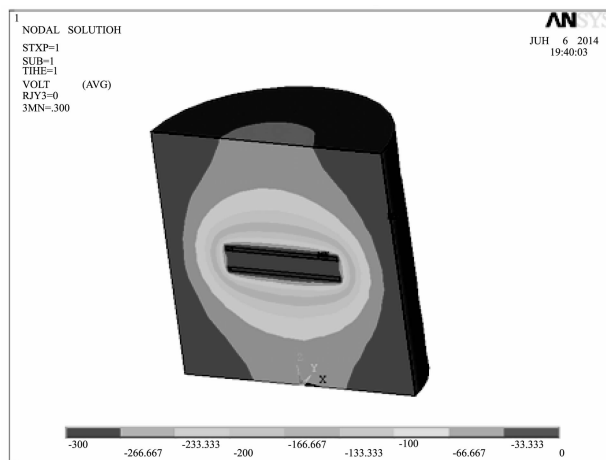


图10 电位(阴极电压-150 V)

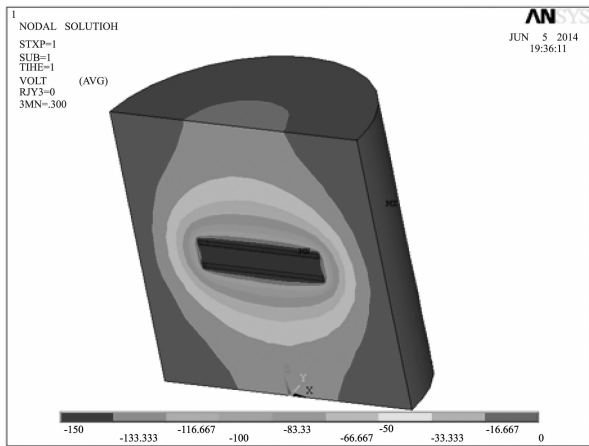


图 11 电位图(阴极电压-300 V)

由图可看出电位从阴极到阳极逐渐升高,且变化均匀,电场矢量图如 12 所示,电场矢量从阳极指向阴极,和磁力线垂直方向如图所示。在对放电室结构进行研究后发现,电场强度的大小与分布与放电室的结构有关^[10],主要是阴阳极距离等参数。

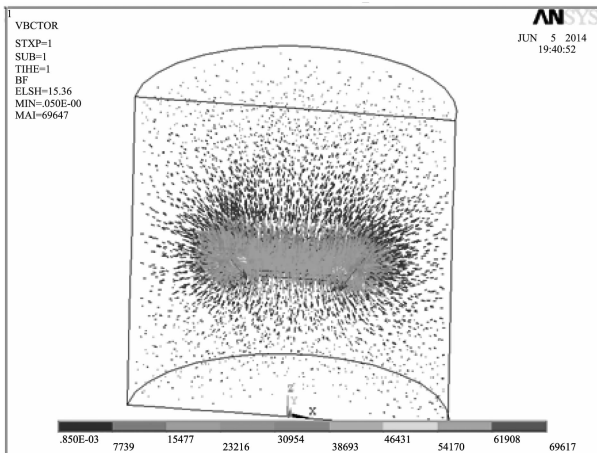


图 12 电场矢量(极间距 1.5 cm)

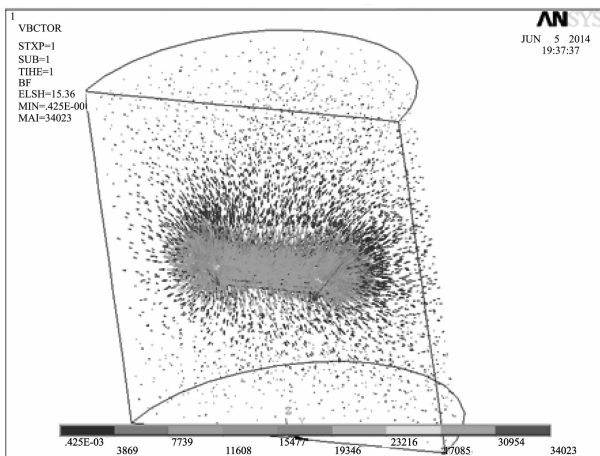


图 13 电场矢量(极间距 3 cm)

由电位图可以看出 300 V 时结果只是数值不一样,电

位差变为了 150 V,电场强度矢量方向变化不大,数值增大了 2 倍,这和赖建军等应用的自恰模型中的电场分布得出的结果完全符合。

在对放电室结构进行研究后发现,电场强度的大小与分布与放电室的结构有关,主要是阴阳极距离等参数。阴阳极之间的电场强度与阴阳极距离有关,距离越小,电场强度越大。阴阳极的距离太大,电场就会减弱;而距离太小不利于装配,且容易发生放电短路,所以设备的故障排除和清洗也是非常重要的^[11]。

以上是对阴极进行改进的等离子体源进行的简单磁场和电场分析,虽然二者的分布都有变化,但是无法直接判断出这种改进对等离子体源束流有何影响,因此,粒子模拟是很必要的。

3.3 SIMION7.0 静电透镜模拟软件模拟粒子运动轨迹

采用计算机模拟,可以对放电的物理过程有更深入的理解,同时无需很高的成本和大量的时间降低研究成本^[12]。为此在 ANSYS 仿真的基础上进行等离子体源的放电过程的粒子模拟。

首先根据离子源工作原理应用经典透镜模拟软件建立模拟模型,在建模时阳极和阴极加一定的偏压,阴极位于阳极筒中心,距离阳极之间的距离为 2 cm,内径 $r_1=7.5$ mm,外径: $r_2=12$ mm,管长: $L=56$ mm,阳极长为 12 cm,腔体顶端口径为 4 cm。设置离子数目为 500,离子种类为氩离子,通过运行模拟软件可得到离子源在此工作条件下的粒子运动轨迹如图 14 和 15 所示。

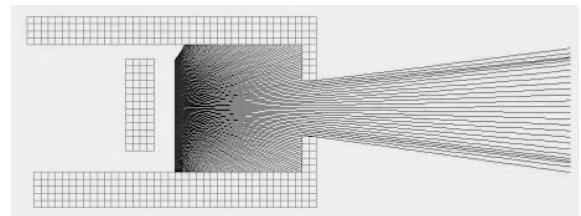


图 14 150 V 粒子运动轨迹 1

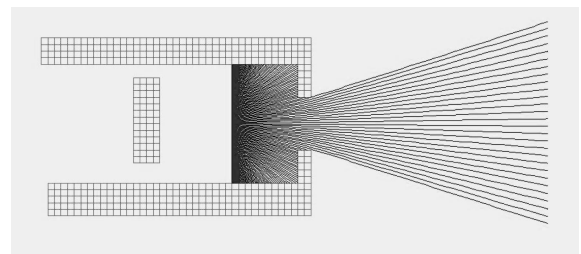


图 15 300 V 粒子运动轨迹 2

对比上面两幅粒子运动轨迹图可知,电压为 300 V 时粒子运动轨迹更均匀稳定,辐照面积也更大,模拟效果更理想。

4 平行结构的空心阴极等离子源结构设计

1) 平行结构空心阴极的等离子体源的工作原理示意如图 16,腔体结构示意图如图 17 所示。

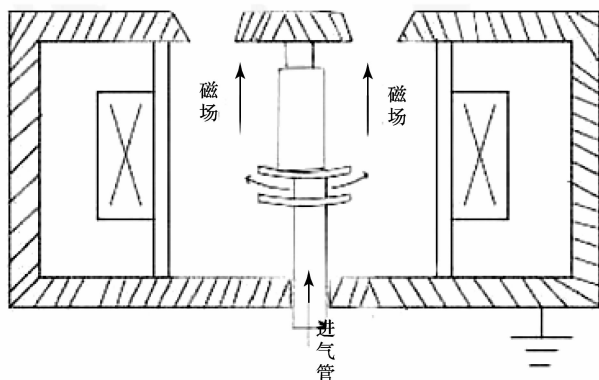


图 16 工作原理示意

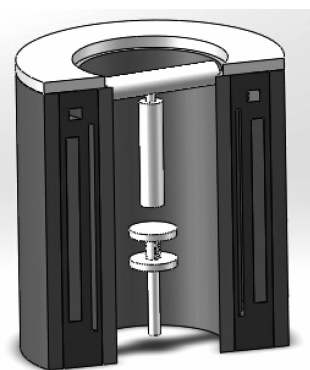


图 17 腔体结构示意图

2) 平行结构空心阴极的等离子体源结构示意图如图 18 所示。

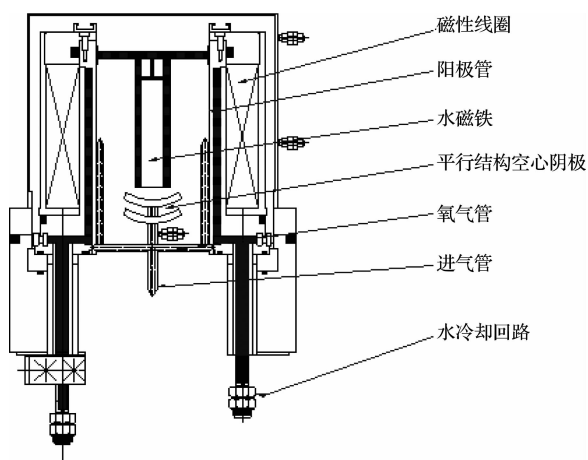


图 18 结构示意图

3) 磁仿真

设定空气的磁导率为 1, 线圈为包漆铜线, 磁导率同样设为 1, 线圈直径 2 mm, 励磁电流 5 A, 施加电流密度, 线圈面积为 $0.002 \times 0.14 = 2.8 \times 10^{-4}$, 匝数 70, 电流等于 5 A, 密度等于 $70 \times 5 / (2.8 \times 10^{-4}) = 1\,250\,000$, 永磁体相对磁导率 5.4, 矫顽力 150 000, 画阴阳极几何模型, 由于对称, 只需要画一半施加电流密度, 模拟的磁力线分布如图 19 和 20 所示, 磁感应强度如图 21 和 22 所示。

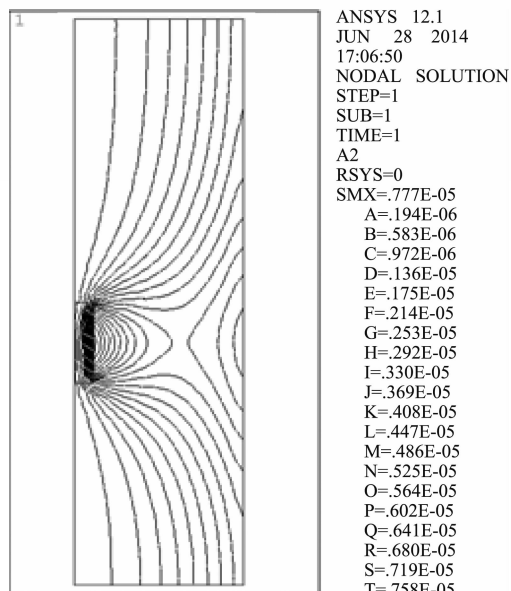


图 19 磁力线分布

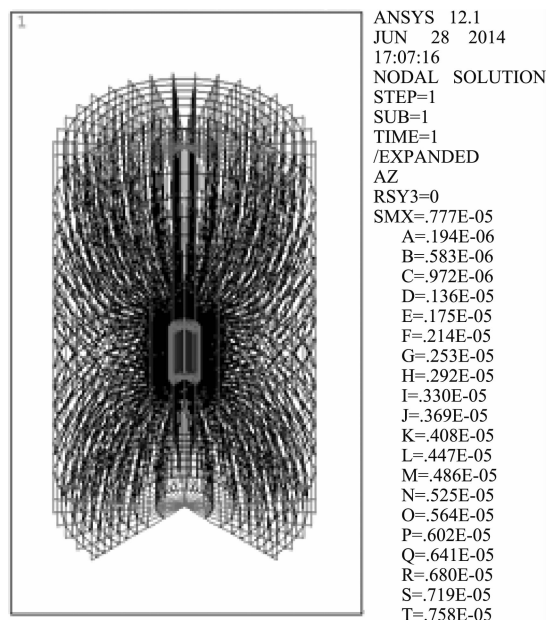


图 20 5 A 磁力线分布

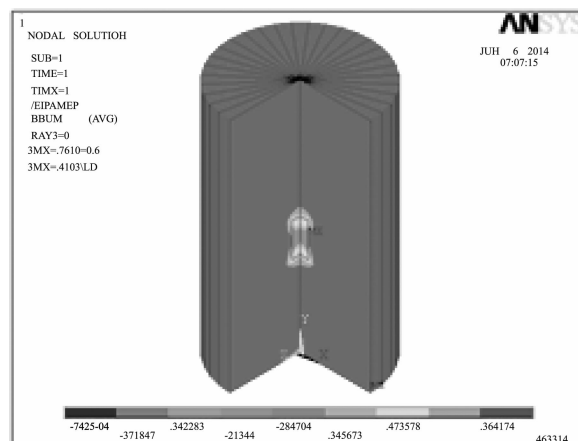


图 21 5 A 磁感应强度

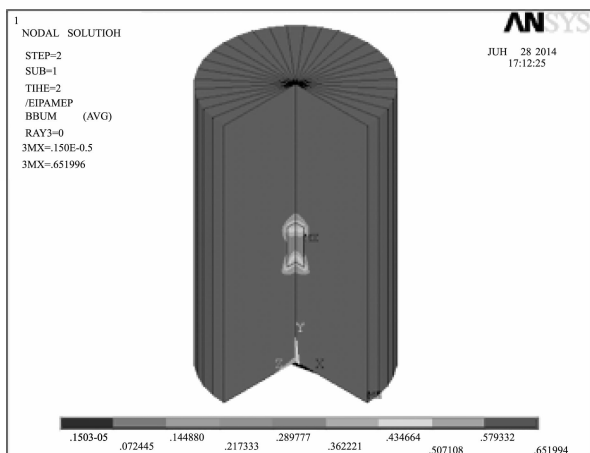


图 22 磁感应强度

由图 19 和 20 可看出,腔体内部的磁力线除阴极周围外,都是竖直方向且分布均匀,在阴极两端面,磁力线有水平趋势。电流为 5 A 时可以看出线圈内部空间磁感应强度 $B=$

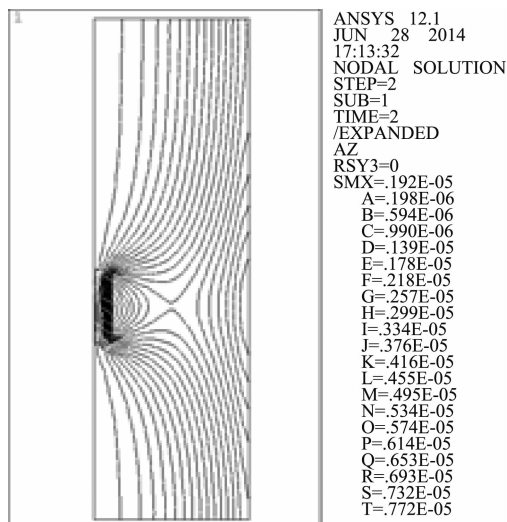


图 23 10 A 时磁力线分布

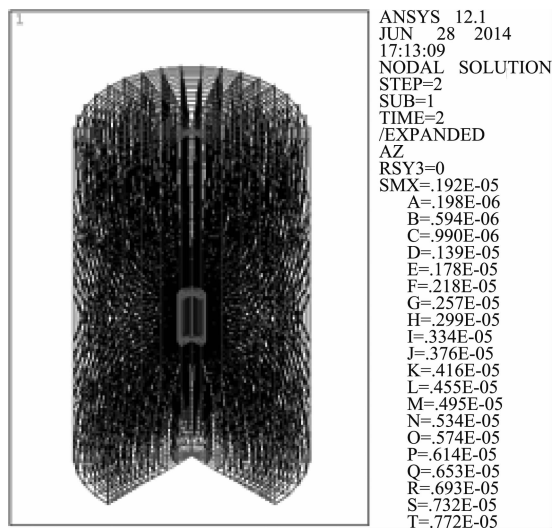


图 24 10 A 时磁力线分布

0.10~0.20, 电流改为 10 A 的磁感应强度如图 22 所示, 可以看出线圈内部空间磁感应强度变化并不大, $B=0.12\sim0.21$ 。

10 A 时磁力线分布如图 23 和 24 所示。

由 5 A 和 10 A 的磁力线分布可知, 10 A 时磁通密度更大, 磁力线方向更平行于腔体的中心轴, 即更能与电场形成正交的场分布。

上图分别为永磁铁为 10 mm×50 mm, 电流取 10 A 时的磁力线分布和磁感应强度, 与前面两图对比可知, 加长永磁铁, 磁通密度会减小, 而磁感应强度变化不大, 0.2 T 左右。

4) 电场分析

图 25 和 26 分别是电压为 150 V 时的电位和电场强度。

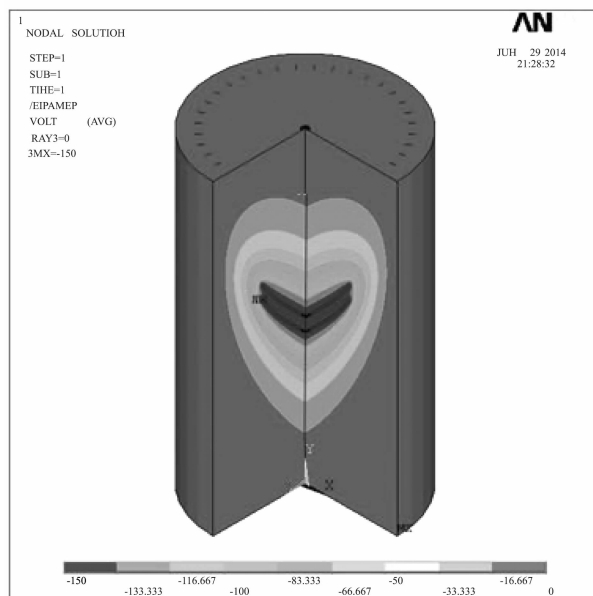


图 25 150 V 电位

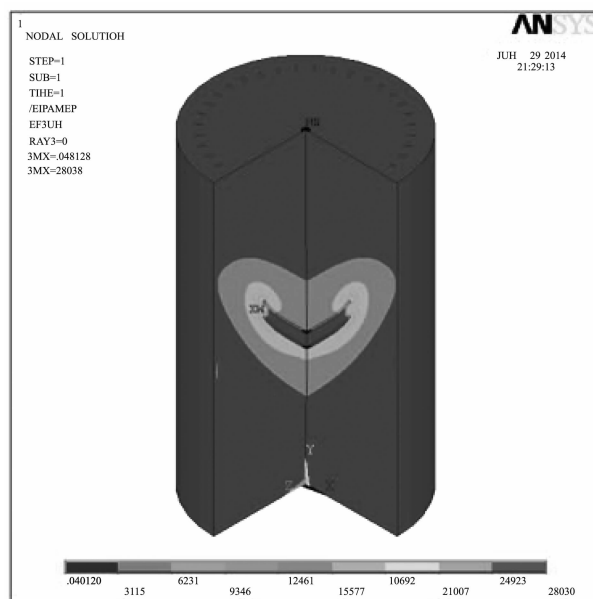


图 26 150 V 电场强度

图 27 和 28 分别是电压为 300 V 时的电位和电场强度。

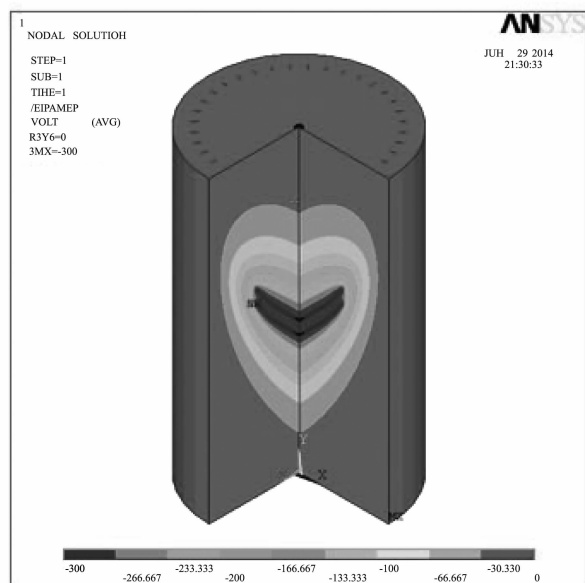


图 27 300 V 电位

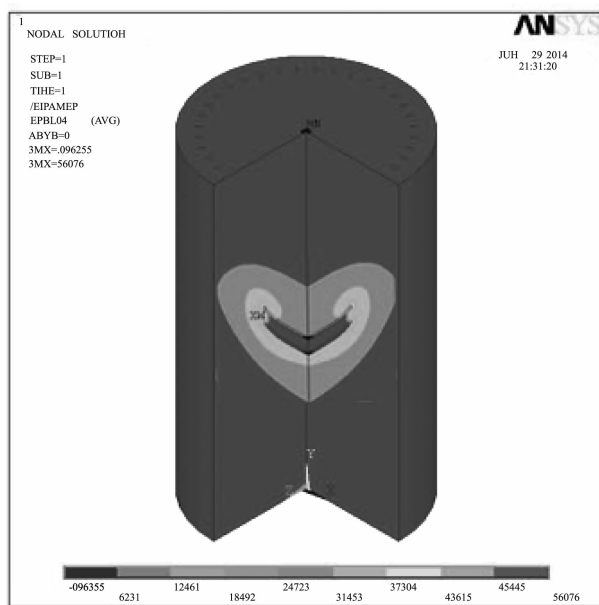


图 28 300 V 电场强度

由上图比较可知,电位从阴极到阳极逐渐升高,且变化均匀。电场强度云图中数值增大了 2 倍,所以 150 V 时的电场更加稳定。

电压为 150 V 时的粒子运动轨迹如图 29 所示,电压为 300 V 时的粒子运动轨迹如图 30 所示。

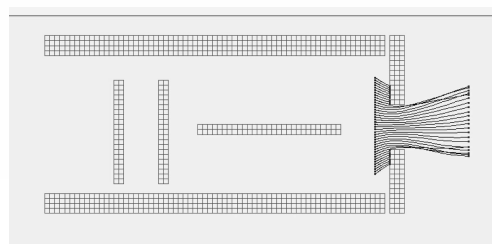


图 29 150 V 粒子运动轨迹

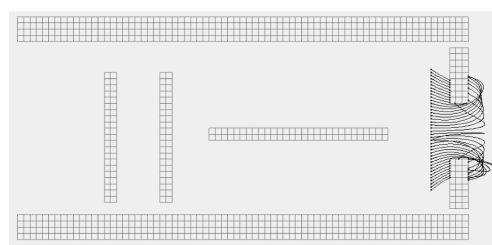


图 30 300 V 粒子运动轨迹

根据等离子体源对电磁场的设计要求,对于平行结构空心阴极的等离子体源,电流为 5 A,电压为 150 V 时,磁场强度取值合理,正交场更加稳定,粒子运动轨迹更加理想。

5 结 论

通过上述研究,所做工作及得到的结论如下:

1) 管形结构的空心阴极等离子源:结构简单,所得粒子运动轨迹较为均匀,但是粒子只能从碳管端逸出,出射效率较低,且反应气体从真空室顶端供给并不能达到最大的气体离子化率。

2) 平行结构空心阴极的等离子体源:结构新颖,选用边部向上弯曲的平行圆盘,并在上部放置一个永磁铁,此结构不但能够使得电子从四周逸出而且效率和速度也得到极大提高。Ar 和 O₂ 从低端的一个管子通入,不但增加 O₂ 离子化率而且简化装置的整体结构。由于增加了永磁铁,所以磁场强度比原来的结构增大约 10 倍,这更好的满足了等离子体源磁场对于电子和离子的拉莫半径的要求。

参 考 文 献

- [1] 何寿杰,欧阳吉庭,何锋,等. 低气压氩气空心阴极放电自脉冲特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(7): 1655-1660.
- [2] 于森,崔洋,李佩玥,等. 一种精密气控系统的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(7): 21-24.
- [3] 迈克尔. A. 力伯曼,阿伦. J. 里登伯格: 等离子体放电原理与材料处理[M]. 蒲以康,等译. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 邹彬,施芸城,陆彦钧,等. 管型空心阴极放电的流体模型模拟[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2009, 35(1): 114-118.

(下转第 30 页)