

大学物理演示实验中辉光放电等离子体浅析

刘巍

皖西学院

[摘要] 辉光放电现象是大学物理演示实验中重要的教学设备, 辉光放电过程中产生的等离子体广泛应用于半导体生产、材料处理和医学治疗等领域。本文针对我校大学物理演示实验中的射频辉光放电等离子体建立两种模型: 二维轴对称模型和二维全模型, 分析等离子体中 Ar^+ 、 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ 四种离子的离子能量分布和离子角度分布演化特性。计算结果发现二维全模型更适合探究等离子体中电子密度和离子特性, 为后续开展相关科研实践教学方案设计奠定了一定的理论基础。

[关键词] 物理演示; 辉光放电; 等离子

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-6288.2020.03.1090

一、引言

辉光现象是生活中常见的物理现象, 比如极光、闪电、高压线之间的弧光现象以及氙气灯中的气体电离等。人为控制产生的辉光现象, 比如射频辉光放电等离子体、辉光球、演示实验中的滑动弧等^[1]。大学物理演示实验中, 辉光现象是一种常见的教学演示仪器, 其本质是在装置中产生辉光等离子体。由于近年来国内半导体产业的蓬勃发展, 而等离子体在半导体生产过程中起着非常重要的应用^[2]。因此针对既有的大学物理辉光演示仪器, 深入探讨射频辉光放电等离子体的物理机制, 有助于为进一步开展科研实践教学的教案设计其中非常重要的理论依据。

本文将建立二维全模型及二维轴对称模型, 对比分析两种模型计算结果中等离子体特征参数(Ar^+ 、 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ 四种离子密度及其IED和IAD)在不同偏置电压环境中的变化特性, 为后期开展科研实践教学方案设计提供科学依据。

二、模型建立

研究过程中建立的二维放电模型由一个流体模块、电磁场模块以及粒子追踪模块组成。图1为二维全模型(左图)和二维轴对称模型(右图)示意图, 频率为13.56 MHz的线圈功率馈入到腔室外侧的五匝线圈(间隔为2 cm)中。辉光放电腔室半径5 cm, 高度15.5 cm, 材质为石英玻璃(厚度为0.5 cm)。腔室的上边界设置为金属电极, 电极

上施加直流电压。腔室两侧与等离子体接触为介电接触, 腔室下端为接地端。粒子追踪模中设置对 Ar^+ 、 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ 四种离子的参数进行分析。在轴对称模型中粒子释放位置为($r=0.1$ cm, $Z=1.5$ cm), 在全模型中为($r=0$ cm, $Z=1.5$ cm)。模型设置时轴对称模型和全模型在计算过程中分别划分成24220和49344个网格进行精确计算。通过对网格参数的优化, 得到更好的计算收敛曲线, 提高计算速度。模型中反应方程、电磁场模块、流体模块以及粒子追踪模块的介绍和设置和参考文献中相同。^[3]

三、结果与分析

将放电电压设置为20 mTorr, 功率固定为1000 W。图2分别给出了四种离子密度(Ar^+ 、 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+)和电子密度在粒子释放位置随偏压的变化趋势。在两种模型中离子密度和电子密度都随偏压的增大而减小。这主要是因为增加偏置电压导致鞘层电势压降随之增大, 鞘层中接地端排斥电子, 吸引离子, 导致了鞘层接地端附近大量离子与电子中和, 使腔室内部离子和电子的数密度有所减小。对比两种模型结果, 发现全模型中各种粒子密度相比轴对称模型高, 这是因为离子和电子从腔室中心密度最大处向四周漂移扩散, 直到撞击到器壁。因此在径向水平线上, 轴线位置的粒子密度最大。此外, 从图2中可以看出, 在偏压0V至500V的过程中, 两种模型电子密度下降速度远大于离子的下降速度。这主要可能是

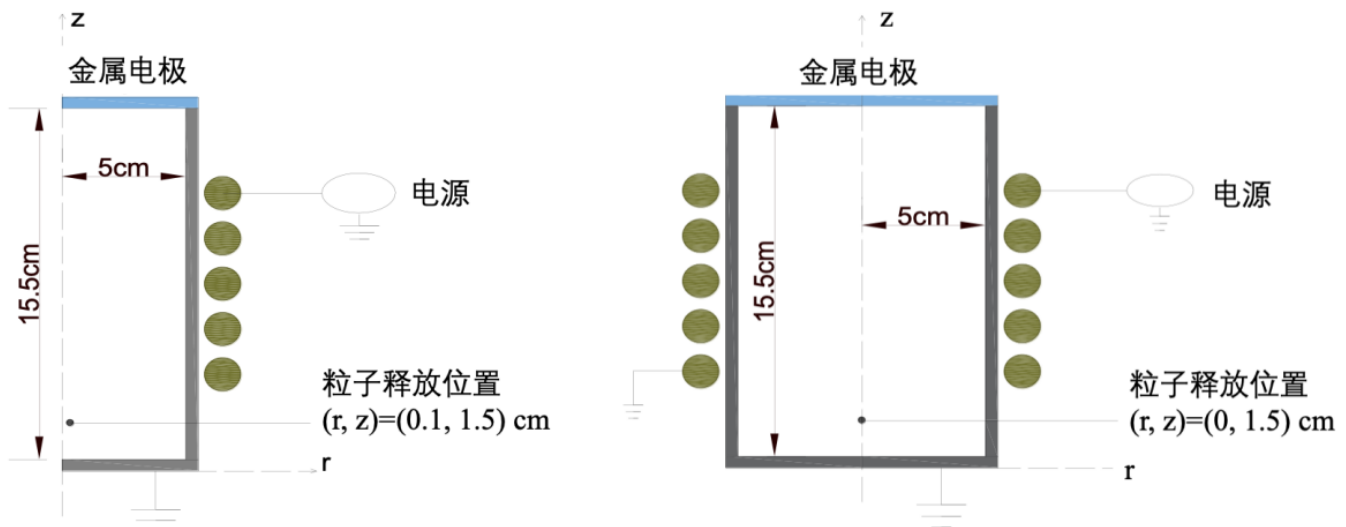


图1 二维轴对称模型(左图)和二维全模型(右图)射频辉光放电示意图

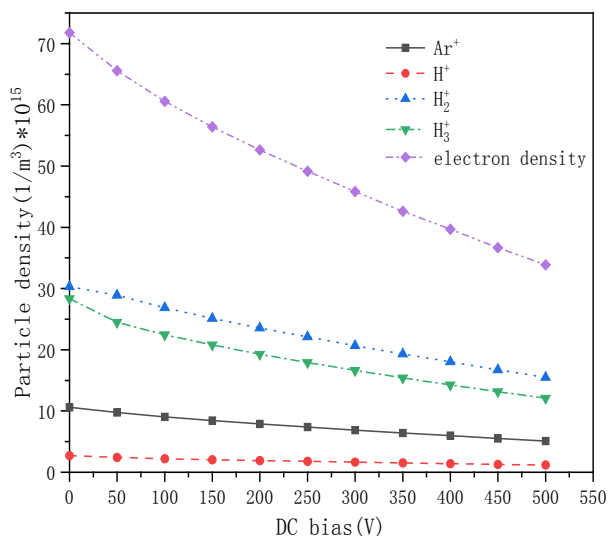
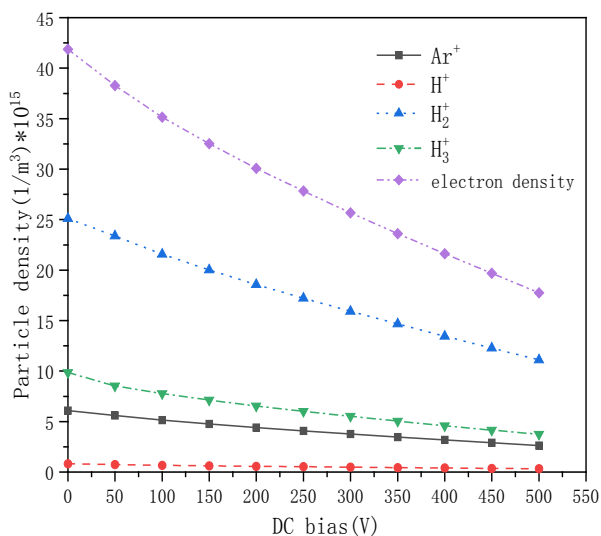


图2 轴对称模型（左图）及全模型（右图）中各种粒子密度偏置电压变化

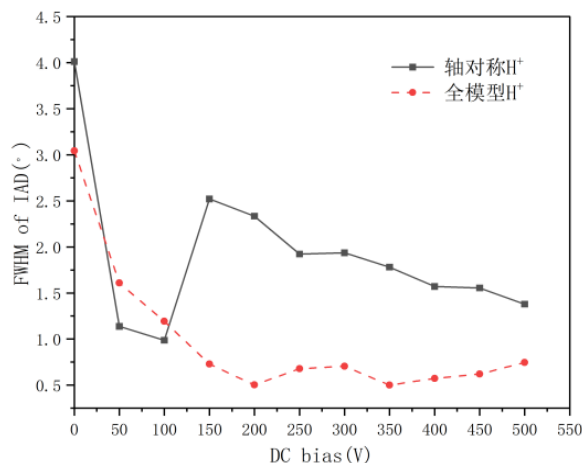
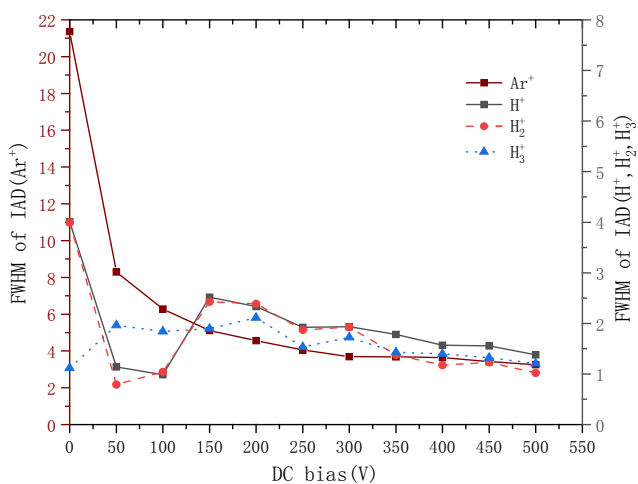


图3 轴对称模型中离子角度分布FWHM随偏置电压变化（左图），两种模型中的FWHM对比（右图）

由于电子质量较小，从而拥有较大的运动速率，使其迅速到达地端进而消失。

随着偏置电压逐渐增大，离子角度分布（IAD）逐渐变得集中。这主要是因为偏置电压较小时，等离子体中轴向电场相对于径向电场分量相差不大，导致离子具有较大的径向速度，从而产生了不对称现象。随着偏压的增大，等离子体中轴向电场增加，导致离子角度分布会变得更为对称和集中。为了更加直观地表示偏压与离子角度分布范围的关系，采用曲线半高宽的形式来对离子角度分布进行阐述，如图3所示。

从图3中可以看到，随着偏置电压增大，IAD的半高宽也在随之减小。而的离子角度分布半高宽随偏压的变化为先增大后逐渐递减，这主要是因为与背景气体之间存在更大的弹性和电荷交换碰撞截面。而随着偏压增大到200 V时，具有更高能量的离子导致了离子及中性粒子散射的减弱，从而使得随着后续偏压的增大导致了半高宽的单调减小。在轴对称和全模型对比图中，在相同条件下，轴对称模型所造成半高宽相比全模型的半高宽具有更大的宽度。这是因为在全模型中粒子在释放后

径向电场比较对称，导致离子在径向上分布更加集中。

四、结论

本文针对射频放电感性耦合等离子体建立了两种计算模型：二维轴对称模型和二维全模型，探究了不同偏置电压时等离子体参数的演化特性。结果发现，二维轴对称模型计算过程中，离子比较容易达到对称轴，从而导致离子能量分布中低能离子密度较高和角度分布不对称的现象。而在二维全模型结果中，由于粒子在释放后受到相对对称的径向电场，因此离子能量分布和离子角度分布较为合理。因此，在后续继续开展科研实践教学过程中，采用二维全模型探究辉光放电等离子体特性更加科学。

参考文献：

[1] 钟晓燕, 刘文军. 大学物理演示实验教学改革的实践和探索[J]. 中国科技信息, 2010(04): 238-239+247.
 [2] 罗慧雯. 下一代表面等离子体纳米光刻和纳米压印系统的研究[D]. 中国科学技术大学, 2019.