

气体放电实验与帕邢定律

侯清润, 茅卫红, 陈宜保

(清华大学 物理系, 北京 100084)

摘要: 利用真空镀膜机的离子轰击装置研究了气体放电电压与气体压力的关系. 在保持气体放电电流不变的情况下, 气体放电电压是气体压力的函数. 改变气体压力时, 放电电压有一极小值. 这种关系可用帕邢定律来解释.

关键词: 气体放电; 帕邢定律; 真空镀膜

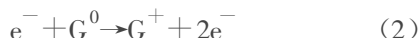
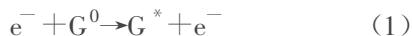
中图分类号: O461.21; TB71

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2004)01-0003-02

1 引言

电流通过气体的现象称为气体放电. 从日常生活中的日光灯管、电闪雷鸣, 到工业生产中广泛使用的溅射镀膜、离子镀膜、离子轰击等, 都与气体放电有关. 具有一定能量的电子与中性原子发生非弹性碰撞时, 电子把一部分动能传给原子, 使该原子激发或电离, 即



激发原子 G^{*} 会产生特定颜色的辉光; 产生的气体离子 G^{+} 成为等离子体的一部分, 或加速到达阴极而产生溅射作用. 除了上述离子产生的机制外, 被加速的离子有可能和低能中性原子发生电荷交换碰撞, 即



从而获得大量具有一定能量分布的高能中性原子或高能离子. 入射到阴极的离子和高能原子会产生二次电子. 产生的二次电子又以与正离子相反的运动方向加速运动, 再引起气体电离, 以维持放电正常运行.

由于气体放电应用范围很广, 有必要让学生了解气体放电这一过程. 本实验用真空镀膜机内的离子轰击装置, 研究了气体放电电压和气体压力的关系, 并用帕邢定律对其进行了解释.

2 帕邢定律

1889年, 帕邢在测量气体放电击穿电压 U

与电极距离 d 和气体压力 p 的关系时发现, 在2个平行平板电极加上直流电压后, 在两极间形成均匀电场, 如果气体成份和电极材料一定, 气体恒温, 冷电极条件下, 击穿电压 U 是 pd 的函数. 改变 pd 时, U 有一极小值.

根据汤生放电原理, 在均匀电场中, 放电电流为

$$I = \frac{I_0 \exp(\alpha d)}{1 - r[\exp(\alpha d) - 1]} \quad (4)$$

其中 α 为电子对气体的体积电离系数, 即1个电子从阴极到阳极繁衍过程中, 单位距离所增加的电子数; I_0 为初始电流; d 为阴阳极间距离; r 为正离子的表面电离系数, 即一个正离子轰击阴极表面而发射出 r 个新的电子.

设

$$\mu = r[\exp(\alpha d) - 1] \quad (5)$$

其中 μ 称为倍增系数, 即1个电子从阴极到阳极会使气体电离出现 $\exp(\alpha d) - 1$ 个正离子, 这些正离子轰击阴极表面会打出 μ 个二次电子. 当 $\mu = 1$ 时, 放电气体本身就可以维持放电. 因此 $\mu = 1$ 称为自持放电的必要条件. 这个条件的物理意义是, 从阴极放出1个电子, 在与中性原子碰撞时产生了 $\exp(\alpha d) - 1$ 个正离子, 当这些正离子到达阴极后, 能再放出1个电子, 使气体放电能持续下去. 此时的电压称为击穿电压, 又称起辉电压.

定性地讲, 电子碰撞电离与它在一个自由程中所获得的能量有关. 电离系数 α 与电场强度 E 及气体压力 p 有密切关系. 设气体中电子的平均

收稿日期: 2003-07-09

作者简介: 侯清润(1965—), 男, 山东省高密人, 清华大学物理系副教授, 博士, 目前从事过渡金属硅化物薄膜和碳化物薄膜方面的研究工作.

自由程为 λ_e , 则电子走 1 cm 路程的碰撞次数为 $N = 1/\lambda_e$, 而在碰撞过程中, 电子的能量必须大于某一临界值 U_i 才会引起原子电离, 即只有满足条件 $\lambda_e > \lambda_i$ ($\lambda_i = U_i/E$) 的电子才能引起电离. 在 N 次碰撞中, 有 $N \exp(-\lambda_i/\lambda_e)$ 次的电子, 其自由程大于 λ_i , 只有这部分电子才能引起电离. 为了使问题简化, 作如下假定:

- 1) 电子以定向运动为主, 忽略无规则运动;
- 2) 电离概率为 1;
- 3) 忽略激发碰撞;
- 4) 每次非弹性碰撞时, 电子都失去所积累的全部动能.

在以上假定条件下, 有

$$\alpha = N \exp\left(\frac{-\lambda_i}{\lambda_e}\right) = N \exp\left(\frac{-NU_i}{E}\right) \quad (6)$$

显然, 电子与中性原子的碰撞次数 N 与气体压力 p 成正比, 设 $N = N_0 p$, N_0 为电子在单位压力下 1 cm 路程内碰撞次数. 在均匀电场情况下, $E = U/d$, U 为阴阴极间电压. 当 r 为常量时, 由发生自持放电的条件 $\mu = 1$, (5) 式和 (6) 式得

$$U = \frac{N_0 U_i p d}{\ln\left[\frac{N_0}{\ln(1+1/r)}\right] + \ln(pd)} \quad (7)$$

可见 U 是 pd 的函数. 为了求得电压最小值, 对 (7) 式求导数, 并令 $dU/d(pd) = 0$, 得

$$(pd)_{\min} = \frac{2.72}{N_0} \ln\left(1 + \frac{1}{r}\right) \quad (8)$$

把 (8) 式代入 (7) 式中, 可求得电压最小值为

$$U_{\min} = 2.72 U_i \ln\left(1 + \frac{1}{r}\right) \quad (9)$$

3 实验

我们利用北京仪器厂生产的 DMD-450 型真空镀膜机中的离子轰击装置, 研究了室温下空气的放电电压与气体压力的关系. 直流高压的产生是由高压二极管整流电路提供的, 如图 1 所示.

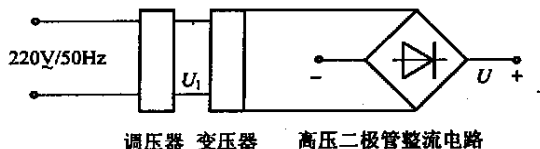


图 1 产生直流高压的电路示意图

调压器输出 0 ~ 220 V, 50 Hz 的交流电压 U_1 , 经变压器和高压二极管整流电路后, 可以获

得 0 ~ 3 000 V 的直流高压, 直流高压 (离子轰击电压或气体放电电压) U 与调压器输出电压 U_1 的关系曲线如图 2 所示, 它们之间的关系式为

$$U = 15 U_1 \quad (10)$$

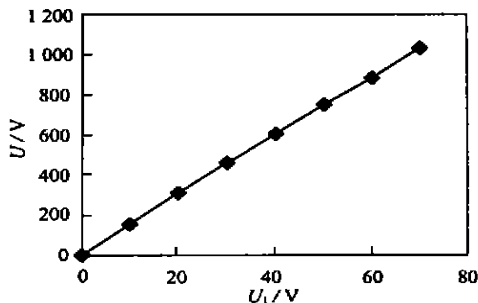


图 2 直流高压和调压器输出电压的关系

真空室内的气体压力由高真空阀门控制, 气体放电电流由毫安表测量, 保持气体放电电流为 50 mA, 测出电压 U 与气体压力 p 的关系, 如图 3 所示.

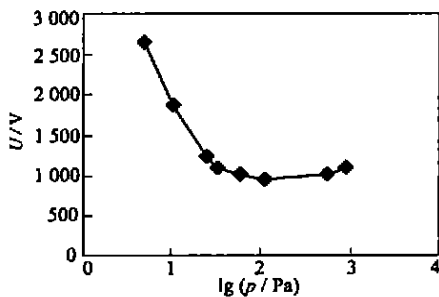


图 3 放电电压和气体压力的关系

4 讨论

由图 3 可以看出: 当气体压力由较大值减小时, U 随之减小到最小值 $U_{\min} = 975$ V; 当气体压力继续减小时, 电压 U 又开始急剧增加. 在实际应用过程中, p 既不能太大, 也不能太小. 一般说来, 辉光放电产生的条件是:

- 1) 在放电开始前, 放电间隙中电场是均匀的或至少是没有很大的不均匀性;
- 2) 气压 p 不是很大;
- 3) 放电回路中, 电源和电阻允许通过 mA 以上的电流.

正常辉光放电的电流范围约 0.1 ~ 100 mA, 电压下限约为几十 V 到几百 V. 溅射镀膜和离子镀膜工作在反常辉光放电

(下转第 8 页)

是否达到起控的要求等. 虽然这种方法在实际使用中较为烦琐, 但在研究混沌控制的发展过程中 OGY 控制混沌的思想及方法却起到了举足轻重的作用. 正是它的出现才引发了人们的关注, 各类控制混沌的方法和策略才应运而生.

参考文献:

- [1] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos[J]. Phys. Rev. Lett., 1990, 64: 1 196 ~ 1 199.
- [2] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Phys. Rev. Lett., 1990, 64: 821 ~ 824.
- [3] 陈艳艳, 陈菊芳, 刘颖, 等. 控制超混沌的电路实验[J]. 物理实验, 2001, 21(9): 7 ~ 9.
- [4] 曹小琳, 程彦明, 岳丽娟. 间歇性正比系统变量方法控制超混沌的实验[J]. 物理实验, 2002, 22(7): 36 ~ 39.
- [5] Henon M. A two-dimensional mapping with a strange attractor[J]. Commun. Math. Phys., 1976 50: 69.
- [6] 黄秋楠, 陈菊芳, 彭建华. 离散混沌电路的实现[J]. 物理实验, 2003, 23(7): 10 ~ 12.
- [7] 王光瑞, 熙龄, 陈式刚. 混沌的控制、同步与利用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

Circuit experiment for controlling chaos by OGY method

CHEN Ju-fang¹, ZHAO Ming¹, PENG Jian-hua^{2, 1}

(1. Department of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. School of Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: An experimental circuit for controlling discrete chaos based on OGY method is introduced, and the control of the unstable fixed point is realized by means of Henon's circuit, the experimental results are corresponding with theoretic results.

Key words: OGY method; chaos control; Henon circuit

(上接第 4 页) 范围内, 对于确定的放电空间, 其工作气压比最小起辉电压所对应的气压要低, 即工作在图 3 曲线的左半部. 如果工作气压太低, 电子与气体分子的碰撞次数减少, 电离效果会降低, 难于产生起辉放电.

5 结束语

利用真空镀膜机内的离子轰击装置, 研究了气体放电电压和气压的关系. 在保持气体放电电流为 50 mA 的情况下, 放电电压是气压的函数.

气压为 4.7 ~ 910 Pa 时, 放电电压在 110 Pa 附近有一极小值, 约为 975 V. 该实验结果可用帕邢定律来解释.

参考文献:

- [1] 曲敬信, 汪泓宏. 表面工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [2] Hou Q R, Gao J. Influence of a magnetic field on deposition of diamond-like carbon films[J]. Appl. Phys. A, 1998, 67: 417.

Glow discharge and Paschen law

HOU Qing-run, MAO Wei-hong, CHEN Yi-bao

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The electrode voltage versus gas pressure in glow discharge is studied using the ion bombardment apparatus in the vacuum deposition system. The voltage is a function of gas pressure when the discharge current is kept constant. By changing the gas pressure, a minimal voltage is found. The relationship between electrode voltage and gas pressure can be explained by Paschen law.

Key words: glow discharge; Paschen law; vacuum deposition