

NF₃ 预放电参数的研究

李 正 瀛

(华中工学院电力系)

1987年10月26日收到

本文采用脉冲漂移管——质谱仪方法研究了在准分子激光和电气设备中有重要应用的NF₃气体的预放电参数,包括电子的电附系数、电附速率、负离子种类和质量以及负离子的迁移率等,还测量了电附速率与电子平均能量的关系。

一、引 言

近年来,对气体NF₃的研究做了不少工作^[1,2],主要原因有两个方面.第一是NF₃常用作为准分子激光的施主气体^[3].在准分子激光的研究中,对各种条件下的放电过程已做了很多的研究工作,但就作者所知,对于NF₃在预放电条件下的放电参数,尚未见有深入的研究.第二是NF₃很可能在某些用SF₆作绝缘的电气设备中发现.由于这些设备在充入SF₆之前不可避免地存在一定量的残余空气,当在这些设备中存在电晕放电时,就有可能产生NF₃.对于SF₆中由于电晕放电所产生的气体,近年来已做了一些研究^[4,5].但就作者所知,对这些气体(包括NF₃)的预放电特性和参数还没有做进一步深入的研究.因此,对NF₃预放电参数的研究,对进一步深入了解准分子激光的放电过程和影响因素以及SF₆绝缘性能,无疑是有重要意义的.为此,本文主要讨论NF₃的放电参数,包括电子的电附性,离子的种类和迁移率等.

二、理论分析和实验装置

我们所采用的试验装置如图1所示.图1中A部分为脉冲漂移管,B部分为测量和分析系统.漂移管由不锈钢制成,直径为15cm,长20cm.在漂移管的一端装有脉冲电子源和阴极,另一端为阳极(即收集电极).在阴极和阳极之间安装五个护环,以建立管中轴向均匀静电场.在阴极的石英玻璃上镀一层厚度为200 Å的金属钽.阳极由不锈钢制成,圆盘状,直径为4.8cm,厚为0.5cm,表面抛光.在阳极前方有一屏蔽网,由细钨丝制成.质谱仪有四个质谱柱,长各为9cm,直径为0.65cm.在进入四质谱柱的粒子中,唯有具有特定的荷质比(e/m)的离子和中性气体分子才能通过四柱质量过滤系统所产生的电场,并为圆筒形聚焦系统所加速,然后进入弯曲管,再由径向电场将离子转弯90°,并进行检测和绘出质谱线.

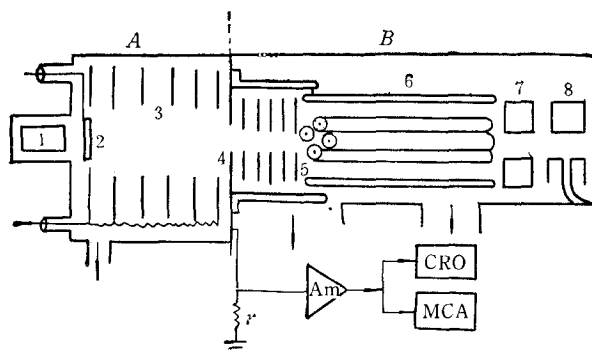


图 1 试验装置

1 为脉冲光源; 2 为阴极; 3 为护环; 4 为阳极; 5 为第一聚焦镜; 6 为四柱质谱仪; 7 为圆筒形聚焦镜; 8 为第二聚焦镜; Am 为放大器; CRO 为示波器; MCA 为多路数据分析仪; → 接真空系统

脉冲漂移管用于测量 NF_3 中的电子电附系数, 电附速率和离子迁移率; 和质谱仪一起, 用以测定离子的种类和质量. 电子脉冲从脉冲源发射, 通过阴极和阳极之间所充的被研究的气体 NF_3 , 在电场作用下向阳极运动. 由电子的电附效应而形成的负离子和未被吸附的电子将由收集阳极所接收, 从而在电阻 (r) 上产生一信号电压, 经放大 (Am) 后由示波器记录和由多路数据分析仪处理. 现设阴极发射的电子脉冲宽度为 δ_t , 阴极上的电子密度为 $n_e(0)$, 电子的速度为 ω_e . 当略去扩散作用时, 由于电附作用, 根据电子密度的连续性方程, 得

$$\frac{\delta n_e}{\delta t} + \omega_e \frac{\delta n_e}{\delta x} = -\gamma_a n_e(x),$$

式中 ν_a 为电附频率, 即 $\nu_a = \eta \omega_e$, η 为电子的电附系数.

因此, 在漂移空间中, 电子密度的分布 (当 $\frac{\delta n_e}{\delta t} = 0$ 时) 为

$$n_e(x) = n_e(0) \cdot \exp[-(\nu_a x / \omega_e)] = n_e(0) \cdot \exp[-\eta x].$$

实际上, 电子的速度极大, 只有在 δ_t 时间内, 电子才出现在漂移区内, 而且按上式分布.

对于离子则有

$$\frac{\delta n_i}{\delta t} + \omega_i \frac{\delta n_i}{\delta x} = \nu_a n_e(x),$$

式中 n_i 和 ω_i 分别为离子的密度和速度.

在 δ_t 时间内, $\omega_i(\delta n_i / \delta t)$ 比起 $\nu_a n_e(x)$ 来要小得多, 因此, 上式可变为

$$\frac{\delta n_i}{\delta t} = \nu_a n_e(0) \cdot \exp[-\eta x].$$

因此, 在 δ_t 之后, 离子密度的分布为 (电子已消失)

$$n_i(\delta_t, x) = \nu_a \delta_t n_e(0) \cdot \exp[-\eta x].$$

在电子脉冲之后, 在电场的作用之下, 负离子向阳极运动, 根据连续性方程, 有

$$\frac{\delta n_i}{\delta t} + \omega_i \frac{\delta n_i}{\delta x} = 0.$$

其解为
$$n_i(t, x) = v_a \delta_i n_e(0) \cdot \exp \{-\eta[x - \omega_i t]\}.$$

当 $x = L$ (漂移区长度) 时, 而在阳极(或屏蔽栅极)上, 每单位面积的电流为

$$I(t) = e \omega_i v_a \delta_i n_e(0) \cdot \exp \{-\eta[L - \omega_i t]\},$$

式中 e 为单位电荷量.

略去电子在漂移空间的扩散损失, 即电子的减少只是由于在漂移过程中的电附效应, 因此, 到达阳极每单位面积的电子数为

$$N_e(L) = n_e(L) \omega_e \delta_e = n_e(0) \omega_e \delta_e \cdot \exp[-\eta L] = N_e(0) \cdot \exp[-\eta L].$$

在漂移区中所形成的离子, 最终到达阳极的单位面积数目为

$$N_i(L) = N_e(0) - N_e(L) = N_e(0)\{1 - \exp[-\eta L]\}.$$

解上述两式, 得
$$\eta = \frac{1}{L} \cdot \ln \{[N_i(L) + N_e(L)]/N_e(L)\}.$$

随之, 亦可求得电子的电附速率 $K_a = v_a/[N] = \eta \omega_e/[N]$, 其中 $[N]$ 表示所研究的气体(如 NF_3) 的密度.

质谱仪及有关测量和分析系统, 用于测定 NF_3 及其混合气体中的离子种类及其相应的电流值.

三、结果及分析

根据上述理论分析, 采用图 1 所示的实验装置对 NF_3 气体中预放电电流的波形如图 2 所示. 它由两部分组成: 电子分量和离子分量. 这样, NF_3 的电子电附系数可由下式求得

$$\eta = \frac{1}{L} \cdot \ln [(A_e + A_i)/A_e],$$

其中 A_e 和 A_i 分别为电子和离子分量所对应的面积. L 的单位为 cm . 电子的电附速率亦可求得, 因为电子速度(同样地离子速度)可以方便地从电流波形图中确定.

负离子的迁移率, 可以根据所施加的出场强度, 电流波形图上电子电流分量和离子电流分量的峰值出现的时间求得. 电子电流分量具有比离子电流分量明显得多的峰值出现

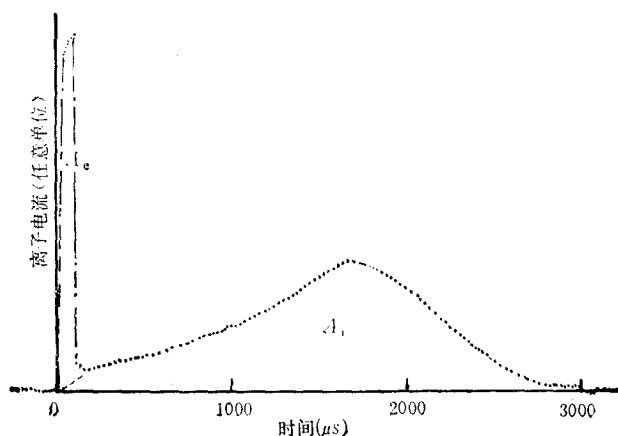


图 2 $\text{NF}_3\text{-N}_2$ 中的电流波形 (MCA 记录) ($E/N = 9 \text{ Td}$)

时间,这是由于离子的扩散所致,从而也证实,在前面的理论分析中认为电子的扩散可以忽略是符合实际的,因而不会引起误差。

图3表示 NF_3 和三种非电负性气体: N_2 , Ar 和 He 的混合气体的电附系数和电附速率。这些曲线都有一个共同的趋势,即随着电场的增强首先增大,而在达到一最大值后下降。从图3可见, NF_3 - He 混合气体的电附系数和电附速率较其他二种混合气体均大,这可能是由于这种气体混合物的电子能量分布更有利于电附效应之故。实验结果还表明,电附系数和电附速率均与气体压力无依赖关系。

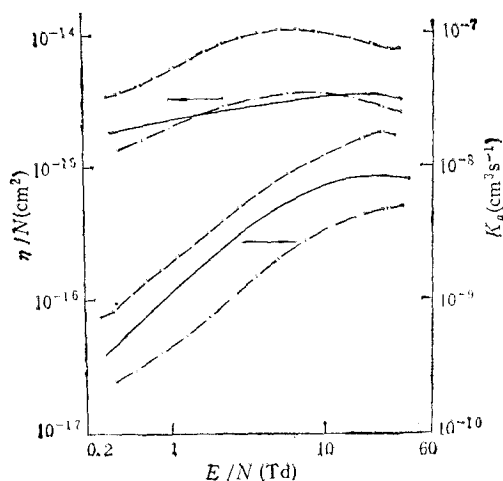


图3 NF_3 混合气体的电附系数 η/N 和电附速率 K_a

——为 NF_3 - Ar ; ---为 NF_3 - N_2 ;为 NF_3 - He 。

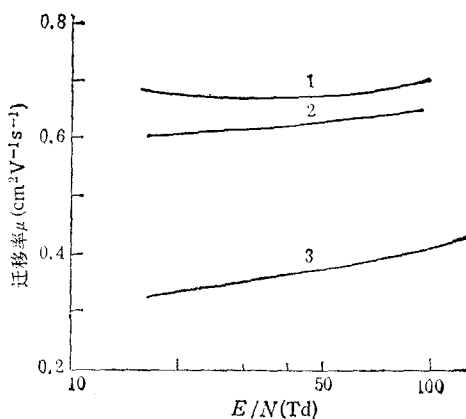


图4 NF_3 中负离子迁移率 μ 与 E/N 的关系

1 为 2.0 kPa; 2 为 0.8 kPa; 3 为 3.0 kPa

图4给出了负离子迁移率随电场强度的变化情况。由图4可见,随着电场强度的增加,迁移率几乎没有变化。在此项研究的条件和压力范围内,迁移率与气体压力有依赖关系,但尚未发现有规律性。

采用质谱仪对 NF_3 混合气体放电过程中所产生的负离子及其质量进行了测定。图5给出了 NF_3 - N_2 混合气体的离子质谱。由图5可清楚地看出,在这种混合气体中,负

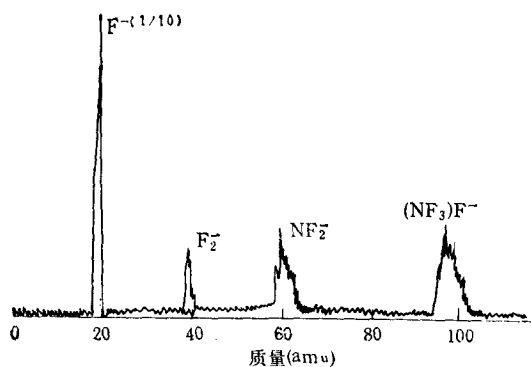


图5 NF_3 - N_2 中的负离子质谱 ($E/N = 10 \text{ Td}$)

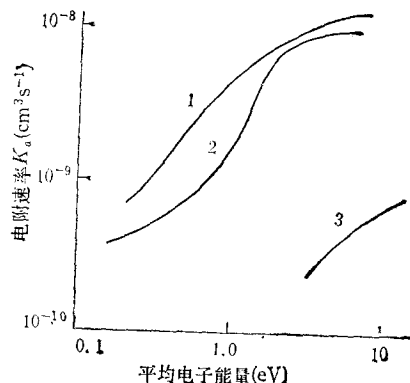
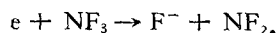
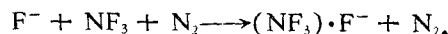


图6 电附速率与平均电子能量的关系
1 为 NF_3 - He ; 2 为 NF_3 - N_2 ; 3 为 NF_3 - Ar

离子 F^- 具有绝对的优势, 含量最大. 这种离子的形成是由于下列反应 (e 为电子):



而分子团负离子 $(\text{NF}_3)\text{F}^-$ 是经过三体联合反应而形成的, 即



实验结果表明, 这种离子只有当较低的 E/N 值时才会形成.

由上述结果以及对于 $\text{NF}_3\text{-Ar}$ 和 $\text{NF}_3\text{-He}$ 的结果都表明, 这些混合气体的电负性最主要表现于负离子 F^- .

我们还对 $\text{NF}_3\text{-N}_2$, $\text{NF}_3\text{-Ar}$ 和 $\text{NF}_3\text{-He}$ 三种混合气体的电附速率随电子平均能量的变化情况做了研究, 结果示于图 6. 这个结果与图 3 的结果是相符合的, 即随电子能量或电场强度的增加, $\text{NF}_3\text{-He}$ 具有比其余二种混合气体要高的电附系数.

四、结 语

采用脉冲漂移管——质谱仪方法对 NF_3 混合气体预放电参数的测定是一个方便而准确的方法. 本文所得的结果对更深入的了解准分子激光器中的放电过程和某些充 SF_6 气体的电气设备中的放电过程和特性, 是有重要的实际和理论意义的.

- [1] R. M. Reese and V. H. Dibeler, *J. Chem. Phys.*, **24**(1965), 1175.
- [2] C. J. Thynne, *J. Phys. Chem.*, **73**(1969), 1586.
- [3] K. Rhodes, *Excimer Lasers*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (1979).
- [4] M. C. Siddagangappa and R. J. Van Brunt, *Proc. of Gas Discharges and Their Applications*, Oxford, England, (1985), p. 247.
- [5] E. G. Beaty, J. Dutton and L. C. Pitchford, *Joint Institute for Laboratory Astrophysics Information Center Report*, No. 20, Colorado, (1979), 240.

SURVEY OF PREBREAKDOWN PARAMETERS OF NF_3

LI ZHENG-YING

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

ABSTRACT

Using the pulsed drift-tube-mass spectrometer system, we measured the prebreakdown parameters of NF_3 mixtures used in excimer lasers or produced in discharges of SF_6 mixtures, including electron attachment coefficients, attachment rate coefficients, ionic mobilities and kinds of negative ions. The relations between electron attachment rate coefficients and mean electron energies are measured as well.