

# T8 荧光灯条纹放电的电离波及光谱特性

2005-01-25 朱绍龙 张善端 复旦大学电光源研究所 点击: 62

## T8 荧光灯条纹放电的电离波及光谱特性

配合电子镇流器使用的 T8 荧光灯在环境温度过低、放电电流太小时，常常会出现条纹放电现象，对照明造成很大干扰。该文报道了用等离子体磁流体力学理论和光谱理论来研究条纹放电的方法，给出了相应的实验结果。

### 1、前言

众所周知 T8 荧光灯是一种高效节能光源，近年来已在国内外大量推广使用。但是当荧光灯的使用环境温度过低、工作电流太小时，原来的稳定放电会变成明暗相间的条纹，称为条纹放电。特别是 T8 荧光灯在电子镇流时更容易出现这种条纹放电，它会照明造成很大的干扰，需要研究它产生的条件和原因，为避免它的发生提供理论和实验的依据。

### 2、条纹的宏观参量研究

从气体放电基本理论出发，导出了低气压放电条件下条纹放电的色散关系，然后从理论和实验两个方面研究了 T8 荧光灯中的条纹放电的成因和特性。

#### 2.1 磁流体力学方程的结果

荧光灯正柱是一种圆柱形的电子碰撞—扩散型低气压放电等离子体，其特性通常可用 Schottky 理论来描述，并取得了很大成功。但 Schottky 理论假设了等离子体轴向均匀，所以不适合条纹放电等离子体。设轴向带电粒子深度有微小的偏离，而准中性条件仍然成立。因浓度不均匀而造成了轴向电场和电子能量偏离平衡态，造成轴向的双极扩散。这时用磁流体力学基本方程，可得小扰动下的电离波色散方程

$$Wr = \frac{A_1 K}{K^2 + K_1^2}$$

$$\text{和 } r = \frac{-Da K^2 + A_2 - A_1 K_1}{K^2 + K_1^2}$$

角频率  $w = w_r + i r_0 w$  的实数部分  $w_r$  为波动频率，虚数部分  $R$  为波动的时间增长率。当  $r < 0$  时，波衰减，即不存在；当  $r > 0$  时，波线性增加，即轴向等离子体的任何微小不均匀，会随时间指数增长。在外回路存在电流正反馈时，最终形成条纹放电。 $r > 0$  时条件是  $A_2 > Da K^2 + K^2 + A_2 K_1$   $K^2 + K_1^2$ ，显然电子能量愈高， $A_2$  愈大，上式就愈容易满足。对荧光灯来说，灯管直径愈细；管壁温度愈低；放电电流愈小时，电子温度愈高。这就解释了为什么 T8 荧光灯（直径 26mm）比 T12 荧光灯（直径 38mm）更容易出现条纹放电，也解释了环境温度较低，电流较小时，常常会发生条纹放电。

## 2.2 实验方法和结果

实验用灯管为普通工艺制造的明管 T8 荧光灯。灯管内径为 24cm。充有 Ar、Kr 混合气体。整个灯管装入水冷套中，水浴温度由恒温器控制。灯管用可调的直流电源供电。用两个光电倍增管测量沿轴向传播的电离波的频率、波长和速度。波动信号幅度随着离开阴极距离的增加而迅速增加，测定不同位置的波动信号幅度，可得到空间增长率  $K_1$ ，从而求得时间增长率  $r=K_1V_\phi$ 。表 1 列出了 T8 荧光灯条纹放电参量的理论计算值与实验值，两者符合较好。

表 1 T8 荧光灯的条纹放电参量

$t_w$ / °C	频率 F/HZ		相速 $V_\phi$ / (MS <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>		时间增长率 R/S <sup>-1</sup>	
	计算值	实验值	计算值	实验值	计算值	实验值
24	1003900	~1000	84.1756	~84	15431436	~1596
30	958900	~1000	6761.2	~68.0	10301162	~1292
35	1065900	~1000	58.7495	~55.0	986940	~1045

## 3、条纹的明暗区光谱

上节研究表明条纹是一种频率为 1000HZ 左右的电离波。但是在系统放电时，电离波的明暗条纹中电子温度、浓度的差别，均未有研究和讨论。本节研究了汞谱线在条纹放电时的强度并从带电粒子的速率议程和能量平衡方程出发对上述问题进行了研究，从而对条纹放电有更深入的了解。

### 3.1 放电模型

我们来考虑荧光灯放电正柱中电子与汞原子的碰撞过程。我们对汞原子作了一个八能级的模型假设。即考虑汞的以下八个能级：基态 61 S0，激发态 63P0,63P2,61P1,73S1,63D 和电离态。其中 63D 是一个简并态，包括 61D2,63D1,63D2,63D3

模型的基本假设为：(I) 假设电子温度  $T_e$  和轴向电子浓度 NE 扰动较小，轴向流动忽略。这样亮条纹和暗条纹内是局部均匀的，各自有单一的电子温度、电子浓度和激发态原子浓度分布，即浓度沿轴向呈折线式分布，并进一步把正柱近似为一半是亮条纹，一半是暗条纹；(II) 原子过程包括电子碰撞激发、消激发，光子辐射消激发，不考虑光致电离、吸附电离和体积复合；(III) 电子气处于局部热力学平衡状态，电子能量分布服从 Maxwell 分布；(V) 电子损失主要是双极扩散损失；(VI) 氩气氙气仅作为填充气，不考虑其激发与电离。

由以上假设，可列出包括各能级速率方程级、电子能量平衡方程、电场约束方程、亮暗条纹电流密度方程区 11 道方程组成的方程组。计算时首先考虑亮条纹，约束条件是能量平衡方程算出的电场强度和实验测出的  $E$  和  $J$  两个能级的浓度比值。暗条纹的计算方法基本同亮条纹，约束条件也是能量平衡方

程算出的电场强度。分别求得了明暗条纹中的电子温度。分别求得了明暗条纹中的电子温度、深度和各激发态浓度。其中表 2 列出了电子温度和浓度的计算结果。

**表 2 T8 36W 荧光灯条纹放电与正常放电比较**

	电子温度 $T_e/K$	电子强度 $E/(Vm^{-1})$	电子浓度 $ne/m^3$
亮条纹	15,300	52.81	$1.60 \times 10^{17}$
暗条纹	14,400	45.41	$1.70 \times 10^{17}$
正常放电	13,156	78.57	$2.34 \times 10^{17}$

### 3.2 实验方法和结果

条纹的光信号通过透镜聚集，从入射缝进入光栅单色仪，色散后某个波长的光从出射缝到达光电倍增管，在倍增管中产生光电流。倍增管的输出用数字存储示波器和计算机进行测量。结果如表 3。其中  $(B_b/B_d)_{exp}$  为实验的条纹的亮区和暗区中的谱线辐亮度比值。

**表 3 谱线辐亮度的实验结果**

$\lambda(nm)$	上能级	亮区	暗区	$(B_b/B_d)_{exp}$
		$B(\times 10^{-6})$ $\text{Wcm}^{-2}\text{s}_r^{-1}$	$B(\times 10^{-6})$ $\text{Wcm}^{-2}\text{s}_r^{-1}$	
365.5	$6^3d_2$	2.18	0.97	2.247
404.7	$7^3s_1$	9.22	5.22	1.766
435.8	$7^3s_1$	25.00	13.70	1.825
546.1	$7^3s_1$	26.10	14.60	1.788
557	$6^3d_2$	2.26	1.13	2.000

## 4、讨论

**4.1** 由于等离子体中各种微观粒子都处于运动状态，轴向微小的不均匀性（扰动）是不可避免的。问题是这种不均匀是随时间增加还是减少，即是否满足条件  $r > 0$ 。所以通过选择放电条件，使  $r > 0$  不能成立。那么条纹放电就可以得到抑制。一般来讲，降低正柱的电子温度，即升高管壁温度，增大管径，充入较易电离的气体（氩汞有潘宁疚，显然比较有利），增大放电电流，都会使条纹放电受到抑制。条纹放电的最终形成，还与外电路有关。如果外电路能对此频率的有足够强的正反馈机制，此就能自持。为避免放电的形成，应在外电路中避免 1000 赫兹的强烈正反馈。更不允许供电电源和整流电路存在 1000 赫兹左右的电压电流分量。

**4.2** T8 荧光灯条纹放电时，与暗条纹相比，亮条纹处电子温度高，电场强度大，激发态汞原子浓度大，亮、暗条纹处的电子温度相差 900K，条纹的我主要由原子温度决定。条纹放电时管壁温度低，导致汞的饱和蒸气压小。因为电子和汞原子的第一类非弹性碰撞频率的下降使能量损失所以电子温度高。条纹的正柱电场强度、放电电流比正常放电时小，但相对而言电流减小得更多；电子温度上升时迁移率下降，所以电子浓度变小。条纹中各激发态浓度比正常放电时低，发光强度

也低；但相对浓度高。

**表 4 条纹的亮、暗区域参数比较**

	电子温度	电场强度	激发态浓度	电子浓度
	$T_e$	$E$	$N$	$n_e$
亮条纹	高	大	高	低
暗条纹	低	小	低	高

亮条纹处由于电子温度高，电子碰撞激发的速率系数大，汞激发态浓度高，所以辐射跃迁消激发多，显得亮。电子深度由电流连续性方程决定，亮条纹电子温度高，迁移率小，但电场强度大，故亮条纹的电子浓度比暗条纹要低一些，但相差并不大。由此可见，条纹的特性主要由电子温度决定。