

②
391-394

矩形玻璃放电管 RF 放电的研究†

TM135, 3

~~TN248.2~~刘玉华¹⁾ 唐令西²⁾

(1)佛山大学物理学系,528000,广东佛山,(2)西北大学物理学系,710069,西安,第一作者35岁,女,讲师)

摘要 根据Hall的放电模型讨论了RF高频放电辉光特性,对2 mm × 2.25 mm × 71 mm 矩形玻璃放电管RF放电中最佳匹配网络进行了实验研究,观察到放电辉光图纹,可作为RF激励波导激光器设计的依据。

关键词 高频放电;RF放电模型;匹配网络;耦合效率

分类号 TN248.2

矩形玻璃放电管, 高频放电管

激光器

RF激励波导激光器是近10余年新涌现出来的一类器件。RF激励的激光器系统较DC激励具有着火电压低、易于建立和维持放电、器件结构紧凑、体积小、效率高、寿命长等优点,故被广泛用于工业、医学及军事等领域。当两个电极间有高频电场存在时(无论电极是摆在管外或管内),所引起的放电形式称为高频放电,其频率范围一般在1MHz至100MHz(我们所研究的RF放电频率约为95MHz)。如果我们用低频交流电源代替直流电源,则气体放电的外观基本上与直流放电一样,只是放电电流方向发生周期性变化,存在明显的阴极位降区,正柱区和阳极位降区。提高电源频率,由于电极间的高频交变电压,电子快速地来回运动,使之与气体粒子碰撞的次数剧增,其电离能力也大大加强。这样,用以维持放电所需要的新电子完全由电子与气体粒子的碰撞电离来产生,而电极上的过程(如离子轰击阴极产生二次电子发射)不起作用;另一方面,正离子由于其漂移率很小,可以近似认为它在空间是不动的,它的作用差不多完全在于形成空间电荷电场,这个空间电荷电场叠加在迅速变化的高频外电场上,并决定放电各部分的位置。由于外电场变化的周期小于放电空间电离和消电离时间,于是当外加电压周期性变化时,两个电极不再是交替地作为阳极和阴极,放电空间形成的电荷在电场方向改变时,尚未消电离,也来不及重新分布,就会发生一些与直流放电完全不同的现象。即整个放电空间稳定在一种不变的放电形式——正柱辉光区分布在管子中间部分,在它的两边有法拉第暗区,而靠近每个电极附近的则有负辉区。所以,可以看到高频放电可因交变很快的电场的存在而产生,这种电场不论是用什么方法产生的,也不论有无阴极发射电子,都能引起气体电离。另外,在放电过程中形成的空间电荷,当电场改变时来不及重新调整,基于以上两方面原因,高频放电着火电压一般要比直流放电的着火电压低得多。由于在高频放电中,电极的作用不大,因此高频放电可以是内电极、外电极的高频放电,甚至是无电极的所谓的无极环形放电。内电极高频放电,放电管结构与直流气体放电的结构一样,阴极和阳极都安装在管内;外电极高频放电,电极都安装在管外;无电极高频气体放电,将一螺旋状线圈套在放电管外,利用高额磁场来驱动气体放电,这种放电呈环形同心圆的发光分布。

1 RF 放电模型

D. R. Hall 通过对中等气压下 RF 放电的观察,得到一系列在不同输入功率下的可见光辐射,结果如图 1。从图中我们可以看到 RF 放电的几个明显特性^[1]: ①放电产生的光辐射强度沿平行于外加电场的方向变化,并且对称于电极间的中心线;②接近电极有一个暗区,当 RF 输入功率变化时,它几乎保持常数,其值大约为 0.15 mm ± 0.02 mm;③在暗区内侧,光强迅速升到最大,亮区中心(即最大值处)距

† 收稿日期:1998-03-18

每个电极的距离约为 0.5 mm, 这个距离随着 RF 输入功率的增加而下降, 但变化不明显; ④两个亮区中间, 放电光辐射降到一个中等水平处。

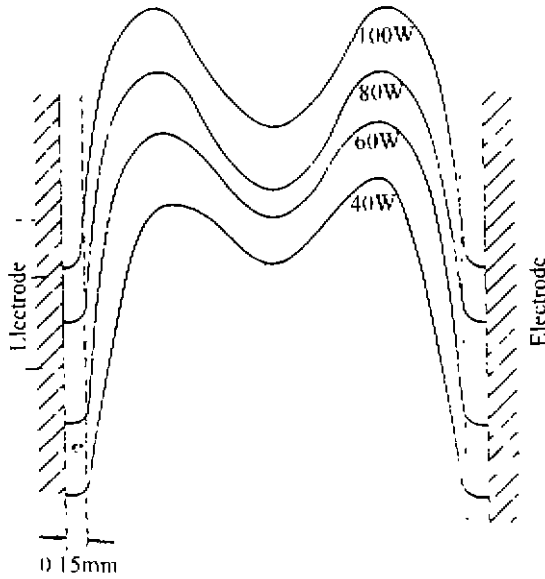


图 1 不同输入功率下可见光的辐射

Fig. 1 Traces of Microdensitometer Beams of Photographic Negatives of Photographic Negatives

一般情况下, 辉光放电的光辐射强度的大小由电子数密度决定。因此, 上面所观察到的放电辉光意味着在电极间有非均匀的电子密度和非均匀的电场存在。由于我们假设所加的电场是均匀的, 那么这种非均匀性必然将由放电本身所建立的附加的内部电场产生。这样一个内部电场确实存在。据此, D. He 和 D. R. Hall 提出了一个简单的 RF 放电模型, 根据这个模型的空间—电荷区域, 我们解释了内部电场的存在并给出计算内部电场 E 值的公式。在这里, 边界条件非常重要。

假设: ①离子运动不受 RF 场的影响; ②电子碰撞频率 ν 远远大于 RF 射频场频率 ω , 即 $\nu \gg \omega/2\pi$ 。

RF 放电是在两个平行平面和无限大电极间产生的。极间距为 L , P 为充满了中心区域的等离子区(或称为电中性的“正柱区”)与电极相接的

S_1, S_2 分别为两个正电荷鞘层区, 如图 2a。其厚度随外加 RF 场的变化在 $S+A$ 和 $S-A$ 间变化, 其中 A 为电子振荡振幅 $A=eE/m\nu\omega$ 。在等离子体 P 内, 正负电荷密度相等, 由电离产生的电子通过再复合和附着在此区域消失。正电荷鞘层区是带电粒子同电极壁相互作用的结果。由于电极壁的影响, 在接近电极壁的区域, 即在一个振荡振幅内, 电子沉积在电极上(电极表现为电极槽), 电子的这种净损失产生了 S_1, S_2 的正电荷鞘层区, 这些正的空间电荷在 S_1, S_2 聚积产生内部空间电场, 由于距离十分小, 故此电场很强。其极性是这样的: 吸引电子远离电极, 同时将离子排斥到电极上。这类似存在于 DC 放电情况中阴极上的情形, 只是该结果在两个电极上获得(两个电极的行为都类似阴极行为)。

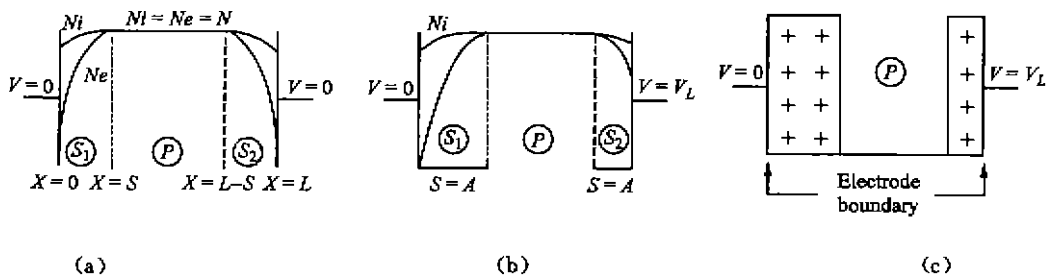


图 2 RF 放电模型

Fig. 2 RF Discharge Model

根据 Hall 的内部空间—电荷电场模型, 我们可以解释 RF 放电辉光特性: 接近每一个电极的暗区是由于在这些区域内低的电子密度, 当交替半周时, 所加交流电场与强的内部电场同方向, 驱使电子远离电极, 在正电荷层内, 即刚超过电场峰值, 电子获得最大能量, 引起更进一步电离的产生, 在距电极稍远的距离处电场反向, 电子能量下降到电离水平以下, 这时, 在气体混合物中各种粒子的高效激发发生, 在距电极比空间电荷密度峰值稍远离电极处产生放电辐射强度的峰值, 超过峰值量度, 平均电子能量进一步下降, 这是由于空间电荷的“摩擦”效应导致稍弱的辐射光强, 总体辐射强度对称于极间中心线。

$$\text{在等离子体 } P \text{ 区内稳定的电场 } E \text{ 为 } E = \frac{V_L}{L} - \frac{\pi W}{k k_0 \omega L E} \left(\frac{D_a}{Z} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中: D_a 为二极扩散系数; $D_a = \frac{\epsilon \mu_1^+}{P}$; P 是气压; μ_1^+ 为正离子的迁移率; ϵ 为电子的能量; ω 为 RF 场频

率; W 为功率密度; Z 为电离率。由式(1)可以通过迭代法求得 P 区的电场的 E 值。

空间电荷区域和放电条纹的存在说明了放电的阻抗特性,故可将放电等离子体看作一个电阻器 R_d 和一个电感 L_d 相串联。在波导 CO_2 激光器典型气压和常用 RF 频率下,若 $R_d \gg L_d$,则放电可近似认为是纯电阻器。在此模型的基础上,考虑放电壁的效应,壁对放电阻抗有显著影响,射频放电对电路产生一个附加电容。实验表明,当 RF 输入功率变化时,在阻抗匹配的条件下,频率发生漂移,这就说明了射频放电本身表现为电容性。据此可知,由于电极壁的影响产生了空间电荷层,在放电的形式下表现为附加电容和放电条纹两种形式。

2 匹配网络的设计

在高频电源与放电装置之间所加的匹配网络有两方面的作用:一是保护电源;二是使放电装置获得最佳功耗而把除放电之外的其他功耗降到最小值。

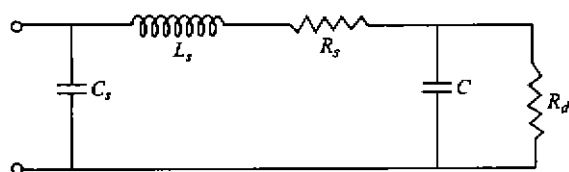


图 3 等效电路图

Fig. 3 Equivalent Circuit Diagram

由于等离子体具有容抗的性质,因此不能像直流放电那样,只在放电回路里串联一只限流电阻,而必须采用阻抗匹配网络。为分析方便,我们把放电管(或激光头)简单视为一个表征放电的电阻 R_d 与表征其物理结构的电容 C 相并联,电容 C 取决于放电管的尺寸及侧壁介质材料。电阻 R_d 与工作气体、输入功率及 RF 激励频率有关。由于放电管呈现复数阻抗,要使 RF 源功率有效地转换到放电管内,在它们

之间所加匹配网络与电源结合呈现的复数是放电管阻抗共轭时所获的最佳匹配,这时电源输出最佳功率。作为负载的等离子体将最有效地吸收电源提供的能量,匹配网络和放电管的等效电路,如图 3。

$$\text{在放电区中消耗的功率 } P_d \text{ 与 RF 输入的总功率 } P_i \text{ 之比为}^{[2]}: \frac{P_d}{P_i} = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_d}(1 + \omega^2 C^2 R_d)} \quad (2)$$

其中: ω 是电场角频率; R_i 是匹配电路和结点的欧姆电阻值。由式(2)我们可以看出:①RF 频率 ω 一定时转换效率随着 R_i 的增加而下降;②为了更有效地将 RF 功率转换到气体放电中去,需要把 R_i 和 C 值都减到最小值;③在更高的频率下功率转换的百分比值下降甚至更严重。因此必须仔细选择工作频率。

3 调试装置(图 4)

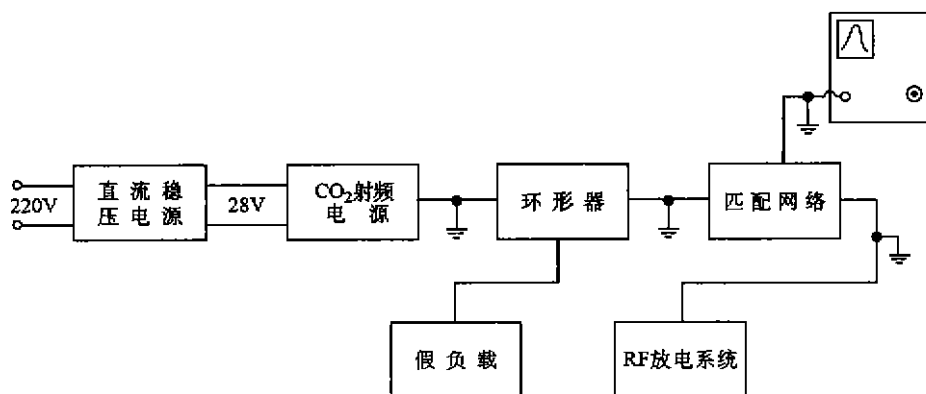


图 4 实验调试装置

Fig. 4 Adjusting Installation in Test

采用 BT-3A 频率特性测试仪对该放电管的平行谐振电感及 RF 电源与放电管之间的匹配网络进

行调试,使其中心频率在被使用的 RF 源频率 f 上,并尽可能使该频率特性曲线具有较宽的频宽,较高的增益,使 RF 源功率有效地转换到气体放电中去。

4 实验结果

我们设计并实际拉制了空心矩形玻璃放电管,其结构尺寸为 $2\text{ mm} \times 2.25\text{ mm} \times 71\text{ mm}$,抛光内壁,在 $2a$ 等于 2.25 mm 的两个相对的玻璃外壁上镀银,并加铝板作为电极,在上下电极之间放置平行谐振

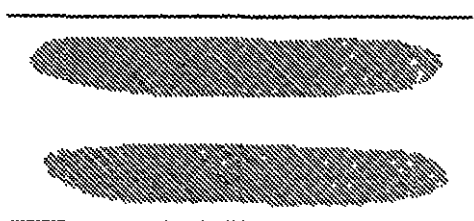


图 5 放电辉纹图

Fig. 5 Discharge Stripe Diagram

电感线圈,用电容测试仪测得其结构电容为 8 pF , L 值约为 $0.35\text{ }\mu\text{H}$,采取 BT-3A 频率特性测试仪实际选取平行谐振电感,使之与结构电容在 RF 频率上谐振。我们选用直径为 0.63 mm 的铜丝绕 15 圈而成,线圈的内径为 5 mm ,一边两个,共 4 个,另外在铝极板中心处加入匹配的网络,使 RF 源功率有效地耦合到放电管中,该匹配网络的固有频率也必须与 RF 频率相匹配。我们选用 $0\sim 40\text{ pF}$ 的空气可变电容, L 值约为 $0.07\text{ }\mu\text{H}$,采用直径为 1.38 mm 的铜丝绕 7 圈而成,线圈的内径为 10.54 mm 。RF 源在铝极板中心馈

入。管内充入 $\text{He} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 = 2 : 1 : 1$ 的混合物,观察到放电现象,辉纹形状如图 5 所示。

本文着重研究了 RF 放电特性,研究了使 RF 源功率高效转换到气体放电中的匹配网络特性。在最佳匹配网络情况下,得到了气体的放电辉纹。该项工作对进一步研究 RF 激励波导激光器具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 He D, Hall D R. High efficiency RF-excited CO_2 laser. *Optics Communications*, 1985, 56(3): 185~197
- 2 Allcock G, Hall D R. An efficient, RF-excited, waveguide CO_2 laser. *Optics Communications*, 1981, 37(1): 56~72
- 3 杨津基. 气体放电. 北京: 科学出版社, 1983

责任编辑 姚 远 曹大刚

The Study of RF Discharge of Rectangular Glass Tube

Liu Yuhua¹⁾ Tang Lingxi²⁾

(1) Department of Physics, Foshan University, 528000, Foshan, Guangdong;

(2) Department of Physics, Northwest University, 710069, Xi'an

Abstract The article began with the theoretical analysis of RF discharge, discussed the effect of matching network on discharge homogeneity, researched experimentally maximum coupling efficiency of rectangular discharge tube of $2\text{ mm} \times 2.25\text{ mm} \times 71\text{ mm}$, and observed discharge stripe. The study of all will have the guiding significance to designing and manufacturing of RF-excited system.

Key words RF-discharge; RF-discharge model; matching-net; coupling efficiency