

电荷复合放电技术及其在 气体激光器中的应用

王福敦 龚光源

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文讨论一种新型气体放电形式,即电荷复合放电。其特点是储能时使其形成异性电荷分类积聚。这种放电不与外电路形成传导电流,纯属气体放电区间的电子、离子、分子过程,因此可以避免使用金属电极及各种预电离技术。

Electric charge neutralization discharge and its application to gas lasers

Wang Fudun, Gong Guangyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: A new type of gas discharge, called electric charge neutralizing discharge, is discussed in this paper. Its characteristics are that different charges separately accumulate on different faces in the device. This discharge in the device doesn't constitute a part of conductive electric current for outside circuit and it is produced by electrons, atoms and molecules in the discharge space. This eliminates metallic electrodes and preionization.

一、前言

对于气体激光器而言,提高泵浦速率实现大体积均匀辉光放电是一个重要发展方向。为此人们研究了电子束控制放电、电子束预电离放电、紫外光预电离放电以及X光预电离放电等技术。但是上述预电离放电技术必然要带来庞大的附属设备,复杂的操作技术,大大地限制了此类器件的推广应用。为此我们曾研究过用单电源三电极表面预电离放电的激光器件^[1]。在此基础上我们考虑

了分荷注入放电复合的新技术,它不仅保留了单电源表面预电离放电设备、操作的简单性,还可以不用特殊的预电离技术而实现较大体积的均匀辉光放电。

二、原理概述

所谓电荷复合放电,就要求在进行电荷复合放电以前有异性电荷积聚,简单地讲储能电容的放电可以视为最简单的电荷复合放电。但从分析此种放电我们可以看到电荷的

收稿日期:1982年11月22日。

复合主要不是在激光介质中进行。介质中进行的是电子传导及碰撞能量转移过程；充电时器件内电极同电位没有异性电荷积聚，当一个电脉冲触发已经充好电的 Blumlein 电路的球隙开关时，脉冲形成电容经火花隙放电，此时和储能电容负极相联接的电极在外电场的作用下发射电子，此电子在外场获得能量并在器件中和气体介质碰撞把能量传递给气体，使气体激发和离化，初始电子本身最后经阳极以替位式传导方式和储能电容中的正电荷相复合。因此这类器件是不可避免地要有两个和储能电容器相联接的金属电极，用以来实现储能电容的电荷回路复合。而且，为了避免器件中放电起弧，要求有一定的电极面型和预电离措施。当然采用一种变型的 Blumlein 电路（图 1），有可能在器件中完成电荷复合放电，从而切断电子的传导回路。这种器件结构只要适当地切割器件内的两块电极的形状和面型，就可以制成具有紫外预电离放电的激光器件。较容易做成大体积均匀放电。但是上述器件中的电荷复合放电主要是极板 B 、 C 之间来实现的，下面谈一谈怎样实现气体介质中的电荷复合放电。

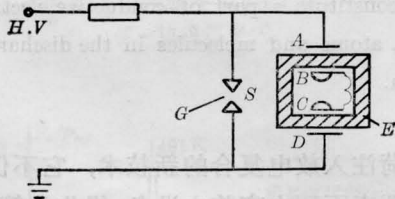


图 1 电容串联快放电电路

S —火花隙； G —触发极； L —电感； E —介电常数为 ϵ 的介质方盒； A 、 B 、 C 、 D —形成电容器 C_{AB} 、 C_{CD} 的金属极板

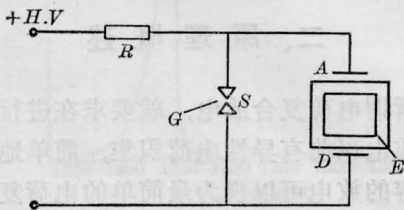


图 2 中空介电电容模拟的器件图
(标注同图 1)

在图 1 所示的结构中让我们拆去器件中的 B 、 C 电极和电感 L ，如图 2。此时金属板 A 和 D 形成一个储能电容，这个电容器中的介质是由两层介电常数为 ϵ 的介质及一层厚度同器件内径的气体介质所组成。其电容量 C_{AD} 大大减少（和图 1 中 C_{AB} 与 C_{CD} 串联相比较）。假如不采取另外技术措施对如图 2 那样的器件进行充电或放电，器件内的气体是不可能从放电中获得能量的。但是可以有两种方法达到分荷储能、放电复合的目的。

第一种技术措施是在图 2 所示的装置中在对器件加高压，即对 C_{AD} 充电的同时，使用外加离化源（如紫外光、X 光、天然放射线、电子束等）使器件 E 中的气体离化成电子（负离子）、正离子对的弱等离子体。由于金属板 A 、 D 间的介质极性及其电场作用，促使由外离化源造成的带电粒子分荷向金属板 A 的下面及 D 的上面积集，如图 3。其离化充电的结果使 C_{AD} 间的电容量大大增加，基本和图 1 有相同的容量。这是因为在这种情况下被电场作用下产生的极性介质表面束缚电荷，各自吸附了负电荷（包括电子及负离子）层及正电荷（正离子）层分别取代了图 1 中的电极 B 和 C ，中和了由外加电压引起的介质表面束缚电荷，屏蔽了器件空间 S 。一旦离化充电过程达到平衡，用外加电脉冲启动火花隙，致使极板 A 、 D 短路。此时由于 A 、 D 间外电场被撤消，器件内正、负电荷粒子层之间的电场急剧增强，在这种内电场的作用下，异性电荷层之间就产生复合放电。由于同性电荷的排斥作用使初始电荷层分布较均匀，且器件内没有金属导体，电荷不易窜流放电。所以这种电荷复合放电容易做成大体积均匀辉光放电，并且对器件介质面型没有苛刻要求。

第二种技术措施就是利用电介质在静电场中的特性来简化离化充电过程。从图 2 或图 3 我们看到，电容 C_{AD} 是由三层不同介电

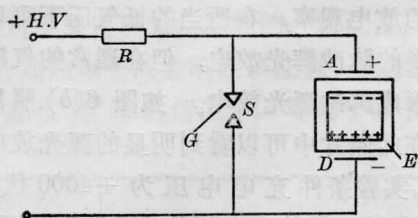


图3 器件内壁电荷分布极性示意图
(标注同图1)

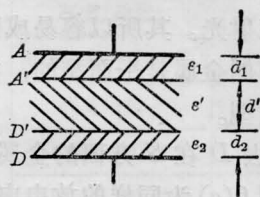


图4 分层介质电容器简图

常数的介质所充满, 简化成如图4所示的无限大分层介质平板电容器结构; A 、 D 仍表示极板, 其中介质为 $A-A'$ 、 $A'-D'$ 及 $D'-D$, 相应的介电常数为 ϵ_1 、 ϵ' 及 ϵ_2 。介质层厚度分别为 d_1 、 d' 及 d_2 。当我们以恒压 V_0 对电极 A 充电时, 对应于真空介质中的电场强度应是:

$$E_0 = V_0/L_0 = V_0/(d_1 + d' + d_2)$$

在这里由于分层介质层的介电常数不同, 根据分层介质的边界条件 $\text{div } D=0$, 要求在不同介质中的电场强度是不同的, 则各介质层中的电场分别为:

$$E_{AA'} = E_0/\epsilon_1; \quad E_{A'D'} = E_0/\epsilon';$$

$$E_{D'D} = E_0/\epsilon_2;$$

各层间的电位差为

$$V_{AA'} = E_{AA'} \times d_1 = \frac{E_0}{\epsilon_1} \times d_1$$

$$V_{A'D'} = E_{A'D'} \times d' = \frac{E_0}{\epsilon'} \times d'$$

$$V_{D'D} = E_{D'D} \times d_2 = \frac{E_0}{\epsilon_2} \times d_2$$

那么

$$\begin{aligned} V_0 &= V_{AA'} + V_{A'D'} + V_{D'D} \\ &= E_0 \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d'}{\epsilon'} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right) \end{aligned}$$

只要适当地选取 d 、 ϵ 参数就有可能使电位

差大部分降在某一层上。例如我们取

$$d_1 \approx d' \approx d_2, \quad \epsilon_1 = \epsilon_2 \gg 1,$$

而 $\epsilon' \approx 1$ (气体) 就有

$$\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \ll \frac{d'}{\epsilon'},$$

那么上式显然就有:

$$V_{AD} \approx V_{A'D'} = E_0 \frac{d'}{\epsilon'},$$

在这种情况下适当选用 V_0 , $A'D'$ 区域就有可能产生强电场下的电晕放电, 导致气体离子化。充电过程进入变容状态, 直到 $V_{A'D'}=0$ 及 $V_0=V_{AA'}+V_{D'D}$ 充电结束, 离子化气体在外场作用下就完成了不同电荷(电子、离子)的分荷储集。这些被介质表面吸附的电荷层所形成的场, 抵销介质表面束缚电荷造成的空间场。放电复合过程和前面所述一样不再重复。

这里提出的电荷复合放电表面看似似乎象表面预电离, 实际上有很大差别, 它跟介质的机电性能有关, 跟放电形成的脉冲波形有关, 而且在复合放电中荷电面在高速移动。与外电路没有传导电流相联系。而表面预电离放电是一种等离子体电子发射机理用传导电流和外电路相联接。

三、初步实验和结果分析

我们所用的初步实验装置如图5所示。其中 A 是黄铜高压极板, 经黄铜螺钉 F_1 和导电板 E 与高介电常数材料 D 相接。经

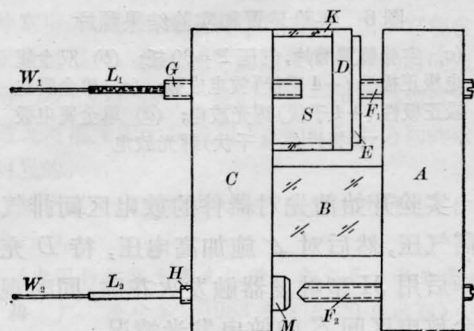


图5 实验装置图

F_2 黄铜螺钉与黄铜极板 C 上的调节螺钉 H , 定位螺母 M 及金属丝 W_2 和绝缘套 L_2 组成一个简易的同轴触发火花隙开关。 B 是有机玻璃隙块, 用螺钉和 A 及 C 联接, 使 A 和 C 之间电绝缘又固定 A 和 C 之间的相对位置。极板 C 上的螺钉 G 是助离化针位置的调节螺钉, 由有机玻璃做成, L_1 是绝缘套, W_1 是助离化金属丝。在 C 和 D 之间是复合放电的工作区 S , K 是工作区外壁, 由透明 GG17 硬质玻璃管组成, 外径为 $\phi 39$, 内径为 $\phi 36$, 高为 19.5 毫米。 D 是高介电常数的陶瓷电容材料 ($\epsilon=8000$), 直径为 $\phi 40$, 厚 8 毫米。 D 、 K 间用真空封腊密封。 K 、 C 之间及 C 、 G 之间用环氧树脂密封, 使放电区可以抽真空及随意充气。装置的实物照片如图 6(a) 所示。照片中装置上面架上了一块顶视放电区间 S 放电情况的 90° 反射镜, 便于同时拍照和观察。

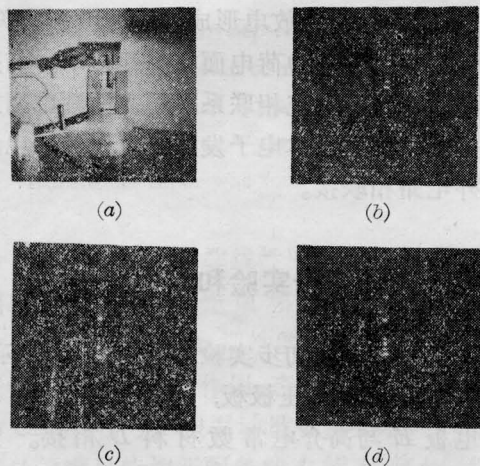


图 6 实验装置和实验结果照片

(a) 实验装置照片, 气压 $P=30$ 托; (b) 双金属电极正极性 (+4 千伏) 放电成弧; (c) 单金属电极正极性 (+4 千伏) 辉光放电; (d) 单金属电极负极性 (-4 千伏) 辉光放电

实验开始前先对器件的放电区间排气到所需气压, 然后对 A 施加高电压, 待 D 充电完毕后用 JJ 型触发器触发火花隙, 同时观察复合放电区间 S 的放电发光情况。

1. 使 D 的两面都有金属层, 进行上述

所说的放电观察, 在适当的低气压下可以看到扩展的脉冲辉光放电, 但在通常的气压下容易形成脉冲弧光放电。如图 6(b) 照片所示, 在此照片中可以看到明显的弧光放电沟道, 其实验条件充电电压为 +4000 伏, 气压为 30 托。照片中上面的亮点为顶视观察, 其下是正视 S 区放电情况, 再下的小圆点为火花隙开关发光, 其上、下两侧为垫块 B 及其产生的反射光。其所以容易成弧的原因是 D 介质面两侧金属是平面型的, 没有形成合理的放电面型。

2. 除去 D 在 S 方面的金属层, 进行上述实验, 图 6(c) 为同样的放电电压 (+4000 伏) 及气压 (30 托) 的条件下所摄得器件复合放电的辉光放电照片, 从实验上可以看到充满整个 S 区间的辉光放电。在中间部分辉光较强是由于插入助离化针引起 C 表面电场畸变而造成的。仔细观察中间不均匀辉光的分布, 发现由 C 和 G 交接区的不均匀发光点向 S 区内的 D 表面渐渐发散及均匀化。这是因为在用正电位工作时 S 区内 D 表面吸附着电子层, 在放电时电子离开 D 表面向 C 表面高速运动, 但在 C 面上由于助离化针的插入破坏了电场的均匀性, 因此影响电子运动轨迹, 造成 C 面附近辉光的不均匀。

从这个实验与前个实验相比较中可以看到, 气体电荷复合放电是容易取得均匀辉光放电, 并且在 S 区间内真正地实现了放电复合。此复合放电完全可以避免使用金属材料。

3. 仍用实验 2 的条件, 改变放电使用的充电电源极性, 用负 4000 伏进行实验。相同的气压条件下 (30 托), 复合放电照片如图 6(d) 所示。可以看到扩展的辉光放电, 就其均匀性比实验 1 为佳但不及实验 2, 这是因为此时用负极性充电, S 区间内的 D 表面上吸附着大量离子, 在放电时 C 表面发射电子, 由于 C 表面不均匀性, 发射的电子在区域上不均匀及时间上的不同步, 先行电子经 S 空间向 D 面放电, 首先在 S 内形成放电沟道,

相继的电子又极易沿此沟道到达 D 介质表面, 并和 D 介质表面附近的正离子进行表面放电复合(我们在实验中观察到这种表面发光), 这是用负电压易引起辉光放电强度不均匀的一种可能解释。但是从实验中观察到此时仅仅是局部辉光强度的不均匀, 整个 S 区间都有不同强度的辉光放电, 并没有形成弧光放电。

4. 观察低气压下脉冲充电造成 S 区间的辉光。图 7 是 S 区间气压为 25 托用负 4000 伏脉冲充电时造成 S 区间辉光的照片。可见只要适当地选取放电区域的几何尺寸、气压以及使用的电压, 无论是脉冲充电或脉冲放电均可以造成 S 区间的均匀辉光, 但是内部的电子、离子的运动状态是不同的, 充电辉光是一个分荷储能过程, 而放电过程是一个异荷复合过程。

5. 充电助离化作用的观察。对器件进

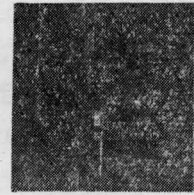


图 7 脉冲充电辉光图
(气压 $P=30$ 托, 电压负 4 千伏)

行充电时, 用外加高频火花放电到器件中的助离化金属丝 W_1 , 使之在器件内产生火花放电, 造成电子、离子对, 增加器件充电速度。实验中发现充电时, 助离化火花放电能够大大提高充电速度, 尤其是外加电压接近器件的着火电压还未起辉时作用更明显, 外加电压使 S 区间压降大于着火电压时, 充电过程将是以前充电辉光引起的分荷积储为主。

参 考 文 献

- [1] 王福敦等;《激光》, 1981, 8, No. 3, 44.

(上接第 46 页)

因为在激光棒中, $E // b$ 方向上的跃迁截面较其他方向的大, 增益高, 首先发生了振荡, 因此电子-振动输出激光也具有 $E // b$ 的偏振特性。这对它在 Q 开关运转和非线性上的应用十分有利。

4. 可调谐激光输出

在腔内以布儒斯特角插入双折射石英滤光片进行激光调谐实验。旋转石英滤光片, 用单色仪监视输出的激光波长, 观察到激光的调谐现象。

本工作与马笑山、吴光照同志一起讨论, 朱汝德同志和长春光机学院马珉同学参加部分实验, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] R. C. Morris, C. F. Cline; USP 3997853, 1976.
[2] J. C. Walling et al.; IEEE J. Quant. Electr., 1980, QE-16, No. 2, 120~121.
[3] J. C. Walling et al.; IEEE J. Quant. Electr., 1980, QE-16, No. 2, 119~120.
[4] J. C. Walling et al.; IEEE J. Quant. Electr., 1980, QE-16, No. 12, 1302~1315.