

萤光灯原理与工艺

复旦大学电光源实验室编

一九七六年二月

毛主席语录

教育必须为无产阶级政治服务，
必须同生产劳动相结合。

我们的教育方针，应该使受教育者在德育、智育、体育几方面都得到发展，成为有社会主义觉悟的有文化的劳动者。

教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

前 言

低压水银荧光灯又称荧光灯是一种重要的气体放电光源，它发明至今已有近四十年的历史了。解放后，在党的领导下，我国工人阶级从1952年起开始试制、生产国产荧光灯。由于它具有光效高、光色好、寿命长等优点，目前已在很多方面特别是室内照明方面得到了广泛的应用，它是一种深受人们欢迎的光源。因此，学习荧光灯的原理和工艺是电光源专业学员学习的一个重要方面。

在毛主席无产阶级革命路线指引下，我们复旦大学电光源专业74级部分工农兵学员和教师，在党支部的领导下，于1975年5月~7月在上海电子管二厂、上海电珠二厂开门办学，了解荧光灯的生产过程，并且参加了部分荧光灯新工艺、新材料的试制工作。

在和工人同志共同战斗的二个月中，我们和工人老师傅建立了深厚的无产阶级感情。在生产任务十分紧张的日子里，他们还抽出时间给我们讲解荧光灯的工作原理，讲解玻璃、荧光粉等材料的制备方法和性能，讲解他们丰富的实践经验。整个教学过程使我们学到了很多实际的生产知识，同时，也使我们亲身体会到目前迫切需要有一本既能对荧光灯的工作原理进行比较深入的讨论，又能较详细的介绍整个生产工艺过程的合适的教材。

这个任务能不能由工农兵学员承担呢？回想起工人同志在讲课时的认真负责的态度，他们对教学的满腔热情包含了

多少工人阶级对新一代工农兵大学生的殷切期望啊！再看看周围工人老师傅们的冲天干劲，我们决定动手干！在小组总结的基础上，由三个同学负责整理、编写“荧光灯原理与工艺”。大家边实践、边讨论、边编写。在工人老师傅、学员和教师的共同努力下，初稿终于完成了。这是开门办学集体创作的成果。

荧光灯把低压汞蒸汽放电中产生的 2537 埃紫外线通过荧光粉转换成可见或其它波长的辐射。荧光粉不同，发出的光的波长也不同，最常用的是日光灯，此外还有各种彩色荧光灯和黑光灯。荧光灯的原理不仅包括气体放电的部分，而且包括阴极和固体发光材料的内容，涉及的面比较广。为了不使篇幅拉得很长，在编写过程中我们紧紧围绕着 40 瓦预热式荧光灯进行讨论。例如荧光粉部分就只介绍常用的卤磷酸钙荧光粉的特性，气体放电和阴极部分也着重讨论与荧光灯有关的内容。对这些方面的基础知识只作简单的叙述，读者如须深入了解这些内容可参考有关的书籍。书中叙述的工艺过程主要是上海电子管二厂的生产情况，8 瓦荧光灯的部分工艺数据取自上海电珠二厂的生产实际。

由于我们马列、毛泽东思想学习得不够，实践经验又少，书中肯定会有不少缺点错误，恳切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 低压汞蒸汽放电的原理.....	1
第一节 荧光灯为什么会发光.....	1
(一) 灯内的放电现象	
(二) 电离和激发	
(三) 弹性碰撞和非弹性碰撞	
(四) 正柱区电子的能量分布	
(五) 放电区域的解释	
第二节 影响荧光灯发光效率的因素.....	11
(一) 汞蒸汽压和直径对光效的影响	
(二) 灯管长度对光效的影响	
(三) 惰性气体的作用	
第三节 荧光灯发光效率的计算.....	22
(一) 原理	
(二) 计算步骤	
(三) 计算举例	
(四) 决定灯管电压的因素	
(五) 关于高功率荧光灯的问题	
第四节 荧光灯的启点.....	35
(一) 影响荧光灯启动电压的因素	
(二) 启动过程对电极寿命的影响	
(三) 为什么工作电路须要镇流器	
第二章 荧光粉.....	41
第一节 卤磷酸钙荧光粉.....	41
(一) 结构	

- (二) 发光机理
- (三) 发射光谱和吸收光谱
- (四) 量子效率
- (五) 影响卤磷酸钙荧光粉流明效率的因素
- (六) 流明衰退

第二节 卤磷酸钙荧光粉的制备 55

- (一) 配方
- (二) 制备工艺
- (三) 灯管涂粉工艺

第三节 卤磷酸钙荧光粉的改进 64

- (一) 配料和工艺的改进
- (二) 颗粒分级
- (三) 涂粉工艺的改进

第三章 阴极 68

第一节 荧光灯阴极的发射机理 68

- (一) 结构
- (二) 热电子发射
- (三) 外电场作用下的热电子发射
- (四) 荧光灯阴极的发射机理

第二节 灯丝的设计 82

- (一) 基金属的选择
- (二) 灯丝长度、直径的计算
- (三) 灯丝螺距和芯丝系数的选择

第三节 灯丝绕制工艺 87

- (一) 绕前处理
- (二) 头道丝绕制
- (三) 二道丝绕制
- (四) 灯丝的装架

第四节	氧化物阴极的制备	95
(一)	单元碳酸盐的制取	
(二)	碳酸盐悬浊液的配制	
(三)	电泳	
(四)	其它灯丝结构和阴极材料的试验	
第四章	封口、排气、装头、老练和检验	104
第一节	封口和排气	104
(一)	封口	
(二)	排气	
第二节	装头、老练和检验	118
(一)	装头	
(二)	老练	
(三)	检验	
第五章	荧光灯的测试	124
第一节	利用光通球测光通量的基本原理	124
(一)	视见函数	
(二)	晒光电池	
(三)	光通球	
第二节	荧光灯的测试	131
(一)	“三黑”及长寿命试验	
(二)	荧光灯光电参数测试方法	

第一章 低压汞蒸汽放电的原理

气体放电的种类很多，常用的是辉光放电和弧光放电二类。利用这二类放电可分别制得冷阴极荧光灯和热阴极(预热式)荧光灯。它们都是利用低压汞蒸汽放电产生的 2537 埃紫外线，通过荧光粉转换成可见或其它波长的辐射。二者的基本不同在于阴极结构。本章主要讨论预热式荧光灯中的放电原理。关于冷阴极荧光灯的发光效率、流明衰退等和预热式荧光灯是相似的，在此不另加讨论。

第一节 荧光灯为什么会发光

(一) 灯内的放电现象

为了了解荧光灯的发光过程，我们先来分析一下它的内部结构。

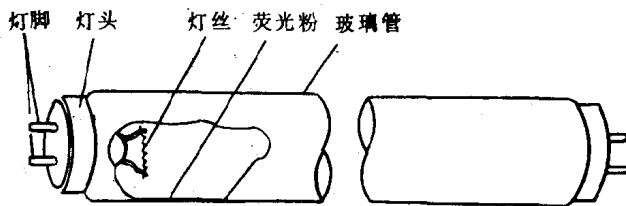


图 1-1 荧光灯的结构

图 1-1 是荧光灯的结构图。从外表看，荧光灯是一只圆柱形的玻管，在二端各装上一个灯头。如果把灯管剖开，可以

发现在管子内壁涂了一层荧光粉，灯管二头各装有一个电极。另外，玻璃管内还充了一定数量的氩气和水银。

荧光灯的结构并不复杂，二个电极之间似乎也没有什么东西相连。但是，在它工作时，二电极之间会发射出蓝紫色的光，我们说灯管放电了。这种放电产生一种人眼看不见的紫外线，波长为 2537 埃。紫外线被荧光粉吸收转换成柔和的日光，这种光源就是大家熟悉的日光灯。

关于气体放电的现象我们并不陌生。夏天，雷雨交加时空中的闪电；天气潮湿时，从高压电线上发出的“吱吱”火花都是气体放电的现象。所不同的是这二种放电都是大气中的放电，而荧光灯内的放电是汞蒸汽中的放电。因此，荧光灯须要用一根玻璃管把汞蒸汽限制在玻管内。现在就让我们透过玻璃管观察一下里边的放电现象吧！

做一只玻璃管内壁不涂荧光粉的“荧光灯”，使它在直流电下正常工作，通过透明的玻壳，我们可以观察到灯内的放电现象。和电源负极相连的是荧光灯的阴极，另一端就是阳极。以 40 瓦荧光灯为例，可以发现放电时在阴极上有一个特别亮的一点，称为阴极的热点，热点面积约几个平方毫米。围绕阴极是一个 3 厘米直径的发光球，发出蓝紫色的光。这个区域称为负辉区。紧接负辉区有一个约 1 厘米长的不发光的区域，因为看上去是暗的，所以称为法拉弟暗区。从法拉弟暗区一直到阳极是一个均匀的光柱，称为正柱区。正柱区除了发出蓝紫色的可见光外，还发出大量肉眼看不见的紫外线，这些紫外线是荧光灯中光的主要来源。

除了这三个明显的区域外，在阴极附近有一个厚度只有 0.01 毫米左右的阴极位降区，因为很薄，肉眼不易分清。另外，在阳极附近约 1 毫米厚度内，还有一个阳极位降区，因为它发

出的光和正柱区一样, 所以从外观上看, 这二个放电区域是连在一起的。放电的各个区域和这些区域内的电位降落情况见图 1-2。

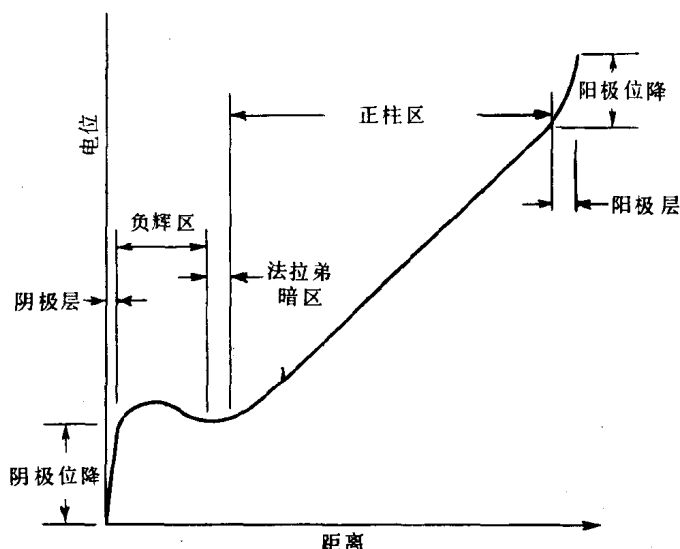


图 1-2 荧光灯放电时的各个区域和这些区域内电位降落的情况

放电时为什么会形成这些区域？为什么正柱区发射的光是蓝紫色的？这些问题可以用气体放电的原理解释。

（二）电离和激发

我们知道各种物质都是由原子组成的, 原子是很小的, 直径大约只有 10^{-8} 厘米。原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成, 原子核位于原子的中心, 直径只有 10^{-13} 厘米。电子围绕原子核在一定的圆周轨道上运动。以汞原子为例, 一个汞原子有 80 个电子, 它们在不同的圆周轨道上运动。汞

原子核带正电，它所带的正电荷和核外电子所带的负电荷的总数正好相等。因此，在通常情况下，汞原子不带电。如果设法使汞原子失去一个电子，这时原子核所带的正电荷数就多于核外电子所带的负电荷的总数，汞原子带正电。原子失去电子的过程称为电离。失去电子的原子称为正离子。可以用一快速的电子，通过它和原子碰撞，供给原子电离能量，为了使原子电离，这个电子在一个自由程中所必须穿过的加速电场的电位差，称为该原子的电离电位。假若以电子伏特作为能量的单位，则电离电位和电离能量在数值上是相等的。汞原子所须的电离能量是10.39电子伏特；即电离电位是10.39伏特。其它气体原子的电离电位见表1-1

表 1-1 几种气体原子及汞的电离电位和激发电位

	氦	氖	氩	氙	氙	汞
电 离 电 位 (伏特)	24.5	21.5	15.7	14.0	12.1	10.4
第一激发电位 (伏特)	20.86	16.62	11.56	9.98	8.39	4.88

为什么放电时二个不相连的电极之间能通过电流呢？这是因为灯管的汞原子被电离的缘故。我们知道，自然界有一类物体称为导体，例如做电线的铜、铝等材料，它们可以传导电流。而另外还有一类物体称为绝缘体，例如橡胶、云母等，它们在通常情况下是不能通过电流的。铜线所以能导电是因为它内部有很多带负电的粒子——电子，它们可以在铜线内自由运动，所以当铜线二端加了电压以后，这些电子在铜线内向一个方向运动就形成了电流。而绝缘体因为内部缺少这种能载流的带电粒子，所以不能导电。气体和荧光灯内的汞蒸汽，在通常情况下，由于内部也缺少这种能自由运动的带电粒

子，因此也不能通过电流是绝缘体。但事情并不是一成不变的。当荧光灯二端加了一定的电压以后，灯内的汞蒸汽就会被电离，产生出带正电的正离子和带负电的电子，正离子朝着阴极、电子朝着阳极运动就形成了电流。串接在外回路中的电流表可以测量出灯管内的放电电流，灯管内形成电流的情况见图 1-3。

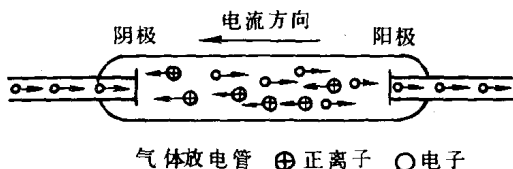


图 1-3 带电粒子运动形成放电电流

上述分析说明，灯管能导电是因为汞原子被电离的缘故，为什么放电又会伴随着发光呢？这是因为汞原子在放电中被激发了。前面我们讲过，原子中各个电子在一定的轨道上围绕着原子核旋转，这些轨道表征着电子的一定的能量状态。在稳定的情况下，原子中的电子都处在各自最低的能量状态，离原子核远的电子能量较大，它们可以吸收一定的能量，跃迁到外层轨道上运动。这时我们说这个原子被激发了，或者说这个原子处于激发态了。由于原子中的电子只能在一定的轨道上运动，因此，电子吸收的能量就不能是任意的，相应的原子能量的增加也只能取一些分立的值。为了便于直观起见，我们可以把这种分立的确定的能量用“能级”来表示，原子处于某一能级，就意味着原子的能量和这一能级所代表的能量相等。图 1-4 是汞原子的能级图，每一条横线代表一个能级。每个能级用一个符号表示。最低的一条横线代表汞原子的基

态能级，通常情况原子就处在这个能级上。高于基态的每一能级代表汞原子的一个激发态。使原子激发需要给它一定的能量，这个能量称为激发能量。和电离电位相似，原子的激发也常用激发电位来描写，如果激发能量以电子伏特为单位，则激发电位和激发能量在数值上相等。表 1-1 也列出了常用的气体原子的激发电位数值。能级图上最上面一条能级代表原子电离所需的能量，对汞原子来说这条能级所代表的能量就是 10.39 电子伏特。

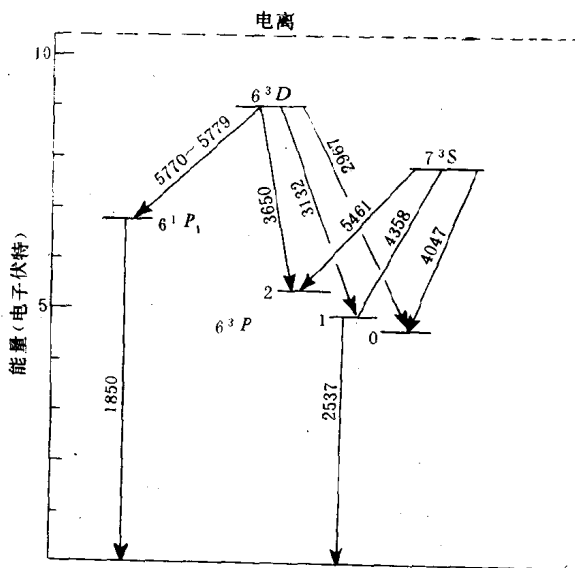


图 1-4 汞原子能级图

汞原子在放电中不仅能够被电离，而且能够被激发，处于激发态。由于受激的原子是不稳定的，经过大约 $10^{-7} \sim 10^{-8}$

秒后，它会把多余的能量以光子的形式放出，返回到基态，或者跃迁到另一个较低的激发态。原子跃迁过程中发射的光子的波长，可用下式计算：

$$\lambda \Delta E = 12385$$

式中 λ 是发射的光子的波长，单位是埃； ΔE 是跃迁过程始末二能级能量的差，单位是电子伏特。

例如当汞原子从图 1-4 中的 6^3P_1 能级(4.88 电子伏特)跃迁到基态(0 电子伏特)过程中发射的光子的波长为：

$$\lambda = \frac{12385}{4.88 - 0} = 2537 \text{ 埃}$$

这个波长位于紫外区域，是肉眼看不见的紫外线。在荧光灯的放电中，输入正柱区的能量约有 65% 转换成了 2537 埃的紫外线。如在 40 瓦日光灯内，大约有 24 瓦的电功率转换为紫外辐射的能量。为什么 2537 埃紫外线的能量会这样大呢？这不仅是因为 6^3P_1 能级较低，汞原子从基态激发到这个能级有较高的几率。而且由图 1-4 可知，在 6^3P_1 态附近有二个亚稳态的能级 6^3P_2 、 6^3P_0 ，当汞原子被激发到这二个能级以后不会自发地回到基态发出光来。但是从 6^3P_2 、 6^3P_0 到达 6^3P_1 态的几率很大，因为大部分电子和处在这二个亚稳态能级上的原子碰撞后都有能力使它们到达 6^3P_1 态。根据理论计算，在荧光灯内，2537 埃紫外线只有三分之一是汞原子直接从基态激发到 6^3P_1 能级，再自发地回到基态产生的，另外的三分之二主要是处在这二个亚稳态能级上的汞原子到 6^3P_1 态产生的贡献。为了利用这种紫外辐射的能量，在管壁涂了荧光粉。它是一种固体发光材料，能够把 2537 埃紫外线转变成可见光。关于荧光粉的特性，在第二章再讨论。

除了 2537 埃以外，放电还产生一种 1850 埃的紫外线，它

是从 6^1P_1 能级跃迁到基态产生的。1850埃紫外线会造成荧光粉的发光效率较快的衰减。

放电中不仅产生紫外线，而且产生可见光。由图1-4汞原子的能级图可知，几条重要的可见光谱是紫色的4047埃、蓝色的4358埃、绿色的5461埃和黄色的5791埃等。所以，不涂荧光粉的灯工作时，看上去是蓝紫色的。可见光加1850埃紫外线等所有其他的各种辐射在内，约占正柱区总输入能量的6%左右，40瓦荧光灯内大约为2瓦，比2537埃紫外辐射的能量小得多。

(三) 弹性碰撞和非弹性碰撞

根据上述分析，在放电中汞原子会被电离和激发，大家可能会问，灯管内还有氩气，氩气是否也被电离和激发呢？为了回答这些问题，必须深入考察一下电离、激发的具体过程。

我们知道，在荧光灯放电时，灯管内存在着很多种粒子，如汞原子、氩原子、汞离子、电子等等。这些粒子相互之间产生频繁的碰撞。这些碰撞可以分为二类，一类称弹性碰撞，另一类称非弹性碰撞。如果二个粒子，例如一个电子和一个氩原子，碰撞前、后的总的动能保持不变，这种情况犹如二个刚性小球碰撞一样，称为弹性碰撞。在弹性碰撞中原子不会产生激发和电离。如果二个粒子碰撞前、后的总动能发生了变化，这种碰撞就称为非弹性碰撞。例如一个快速的电子和一个汞原子相碰，电子把一部分动能传递给原子，使汞原子激发或电离，这种碰撞就称为非弹性碰撞。由汞原子能级图可知，要使一个汞原子激发发出2537埃光子来，碰撞前的电子至少必须具有4.88电子伏特的动能。如果一个电子具有10.4电子伏特的能量，它和汞原子碰撞就有可能使汞原子电离。因

为具有一定能量的电子只占总电子数的一小部分，因此放电中产生非弹性碰撞的次数要比弹性碰撞的次数少得多。为了深入讨论弹性碰撞和非弹性碰撞的情况，首先必须分析放电中电子的能量分布情况。

(四) 正柱区电子的能量分布

因为在荧光灯内 2537 埃紫外线主要是由正柱区发射的，所以我们就来分析这一区域内的电子的能量分布情况。

在放电中虽然产生的粒子种类很多，各种粒子之间会发生复杂的碰撞过程，但是这里起主要作用的是电子和汞原子的碰撞。这是因为电子的质量很轻，它只有氙原子质量的七万五千分之一。在电场作用下，电子很快被加速，得到较大的能量。汞离子带正电，它虽也被电场加速，但是由于它的质量很大，和电子相比，它得到的能量可以忽略。其他粒子如汞、氙等中性原子它们不会被电场加速，因此，外加输入正柱区的能量首先转变成了电子的动能，使每个电子的平均能量远超过其他粒子。平均能量愈大，温度就愈高。假设灯管工作时管壁温度是 40°C ，则汞原子、氙原子、汞离子的温度也约为 40°C ，而电子的温度则可高达 11000K 左右。通常把电子和汞原子之间的相互作用看成是“热”的电子气和“冷”的汞蒸汽之间的作用。

实验和理论不仅证明正柱区的电子有很高的平均动能，而且证明每个电子的动能值是很不相同的。具有某一动能值的电子数目占总电子数目的比可以用(1-1)式麦克斯韦分布来描写。

$$f(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{U}{KT_e} \right)^{1/2} e^{-U/KT_e} \quad (1-1)$$

式中 $U = mv^2/2$ 是电子所具有的动能, 单位是电子伏特, κ 是玻尔兹曼常数等于 1.38×10^{-23} 焦耳/度, T_e 是电子温度 (K), $f(U)$ 是具有能量为 U 的电子数与总电子数的比。

对于一定的电子温度 T_e , 可以把 $f(U)$ 和 U 的关系画成曲线。图 1-5 是电子温度为 11600K 和 12760K 时的电子能量

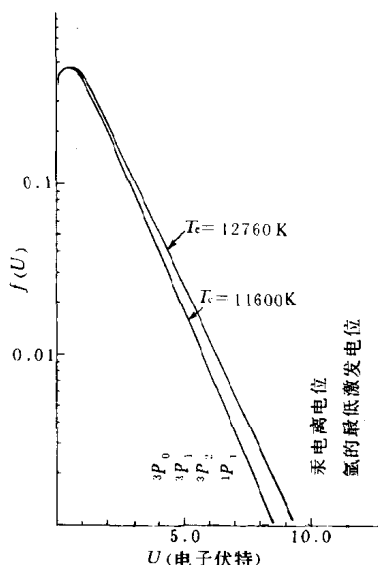


图 1-5 正柱区电子能量分布

分布情况。在图中同时标出了汞 6^3P 能级的位置。因为要使汞原子激发, 电子至少应具有 11.56 电子伏特的能量, 由图可知, 具有这样大能量的电子数目是非常少的。根据 (1-1) 式计算, 在 20 万个电子中只有一个电子具有这么多的能量。汞原子的电离电位是 15.7 电子伏特, 电离的几率就更小了。所以 (1-1) 式或图 1-5 说明放电中汞原子的激发和电离可以忽略。图 1-5 还表示当电子温度升高时, 具有

较高能量的电子数目也增加。

气体放电中原子碰撞、激发、电离的过程可以作一个简单的比喻。假设原子是一个脸盆, 电子是盆内的皮球, 正常情况下皮球不受到其他外力的作用, 不会自动跳出脸盆。如果用另外一个皮球打到盆内的皮球上, 使盆内的球跳出脸盆。盆内