

电光源与离子器件

范志峰 主编

王仁道 主审

电子工业出版社

内 容 提 要

本书着重介绍各种电光源和离子器件的基本工作原理、应用及有关基本知识。全书共分十章，第一、二章主要介绍辐射、气体放电和光计量的基本知识；第三～七章分别介绍各类光源；第八章重点介绍了氮 氛、氩离子、二氧化碳等激光器；第九章就目前应用较广的氢同流管和电晕放电稳压管作一介绍；第十章分别介绍了X射线管和计数管。每章末均附有习题。

本书可做电光源和离子器件专业中级工人技术培训教材，亦可供有关专业科技人员参考。

电光源与离子器件

范志峰 主编

王仁道 主编

责任编辑 姬楚

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

妙峰山印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米1/32 印张：6.625 字数：148千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷

印数：1—3,600册 定价：1.25元

统一书号：15290·392

目 录

序言	1
第一章 辐射和气体放电的基本知识	3
§ 1.1 热辐射的产生及其特性	5
§ 1.2 气体放电的特性	8
§ 1.3 气体放电器件的启辉及稳定工作条件	14
第二章 光计量基本知识	21
§ 2.1 辐射的基本度量	21
§ 2.2 光度学的参量及其度量	24
§ 2.3 色度学的基本知识	31
§ 2.4 光源的色表、显色性和色温	38
第三章 热辐射光源(白炽灯)	41
§ 3.1 白炽灯的结构和工艺	41
§ 3.2 卤钨循环白炽灯	46
§ 3.3 白炽灯灯丝的计算	52
§ 3.4 白炽灯的主要参数	57
第四章 低压气体放电光源	64
§ 4.1 荧光灯	64
§ 4.2 节能荧光灯	75
§ 4.3 其它低压气体放电光源	80
第五章 高压汞灯和高压钠灯	87
§ 5.1 高压汞灯	87
§ 5.2 高压钠灯	95
第六章 特种高压和超高压气体放电光源	104

§ 6.1	高压金属蒸气放电灯	104
§ 6.2	超高压汞灯	112
§ 6.3	高压惰性气体放电光源	117
第七章	脉冲光源、场致发光屏和半导体灯	124
§ 7.1	脉冲光源	124
§ 7.2	场致发光屏和半导体灯	133
第八章	气体激光器件	142
§ 8.1	原子气体激光器	146
§ 8.2	离子气体激光器	155
§ 8.3	分子气体激光器	162
第九章	闸流管和电晕放电稳压管	171
§ 9.1	闸流管的结构和主要参数	171
§ 9.2	氢闸流管的应用与发展	178
§ 9.3	电晕放电稳压管的结构和主要参数	180
§ 9.4	电晕放电稳压管的应用与发展	185
第十章	X射线管和计数管	188
§ 10.1	X射线的基本知识	188
§ 10.2	X射线管的结构与参数	191
§ 10.3	X射线管的应用与发展	195
§ 10.4	计数管的结构和工作原理	196
§ 10.5	计数管的种类	198
§ 10.6	计数管的特性参数	201

序 言

随着我国社会主义四个现代化事业的不断发展，电光源和离子器件在国民经济各个领域里的应用日益广泛。近代的电光源和离子器件大致可分为热辐射光源、气体放电光源和各种类型的离子器件。在这些门类中，除白炽灯及一些特种光源外，其它均为利用气体放电原理制成的器件。绝大部分这类器件中，充入一定量的气体，参与器件内部的导电和能量交换过程。它们内部不仅有电子，而且还有离子、分子和各种粒子等等。电子、离子、气体分子和各种粒子之间不断地相互作用，内部发生的过程是极其复杂的。人们在长期实践中，早已认识到灼热物体发光和气体放电现象。但直到十九世纪末，在爱迪生利用热辐射原理首次制成白炽灯，伦琴发现了X射线后，人类才揭开了光学奥秘的帷幕。到二十世纪初，人类便开始将各种类型气体和气体放电现象应用到真空电子器件中，生产各种充气白炽灯、气体放电光源和离子器件。

在真空电子器件中应用各种气体制成的充气光源和离子器件在科学发展上起了极其重要的作用。爱迪生当初发明的真空白炽灯光效仅1流明/瓦。充气白炽灯的出现，将灯的光效迅猛地提高到16~18流明/瓦。低压汞蒸气放电光源（荧光灯）的出现，是光源史上的一次革命，人们称之为第二代光源，它使普通照明光源的光效提高到50~60流明/瓦，寿命可达5000~10000小时。六十年代出现的各种近代光源：如

金属卤化物灯、高压钠灯、三基色荧光灯等，其光效可达100流明/瓦左右，显色性大为改善，这在光源史上又发生了一次重大革命，人们称之为第三代光源。上述门类的白炽灯和气体放电光源已成为人们日常物质与文化生活中必不可少的。目前，它们的产量和品种都还在与日俱增。

三十年代人们掌握了气体放电技术后，利用气体放电原理，曾先后试制成功各种类型的离子管：如水银整流管、闸流管、电晕放电稳压管、计数管等，而X射线管也在此时期问世。

六十年代初，人们掌握了气体放电中分子、离子和原子的亚稳态原理，研制成功了氮-氦气体激光器，相继试制成功其它原子、离子、分子激光器。激光器是一种崭新形式的气体放电光源，它辐射出几乎是一束平行的单色光，亮度极高，它比太阳表面的亮度要高 10^{10} 倍。经过近年的改进和提高，已在国防、科研和生产中得到广泛应用。

所有这些，都说明了电光源和离子器件的作用已日益为人们所熟悉，已成为工业、农业、科研、国防、交通等各方面的发展所不可分离的技术部门。随着科学技术的发展，必须向各部门提供更多和更新的电光源和离子器件。同时，也必须让更多同志熟悉电光源和离子器件的基本知识，让它们在今后的四化建设中获得新的应用和发展。

第一章 辐射和 气体放电的基本知识

所有的光源均涉及到不同形式的能量转换成 $200 \sim 200$ 纳米的电磁辐射能的问题。按原子物理学的观点，这种能量转换主要是构成物质的原子或分子的激发与还原。原子或分子的激发与还原可用图1-1的示意图来表示。图1-1中(a)为原子的基本状态，电子围绕着原子核在固定的轨道上运动。这个原子受到外界因素的作用，如温度、碰撞、光或射线照射等，被激发，使原子中的电子运动到能量较高的轨道上，成为原子的激发态，如图1-1中(b)所示。电子在较高能量轨

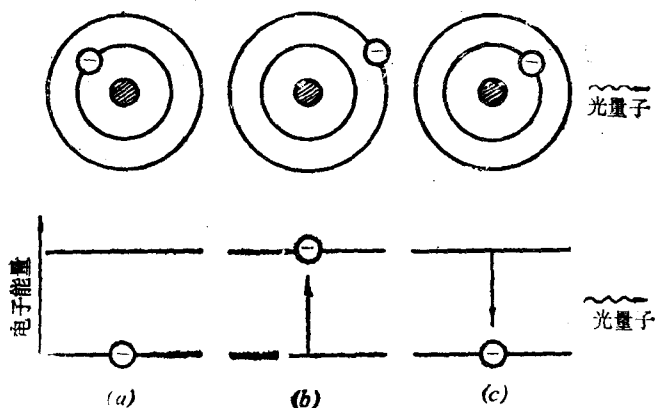


图 1-1 原子的激发与还原
(a)原子的基态；(b)原子的激发态；(c)自发辐射跃迁

道上运行是不稳定的，它将自发地回到基态，同时将多余的能量以辐射能的形式释放出来，成为一个光子，一个光的单位。这个过程就称为辐射跃迁。辐射光的频率由普朗克公式决定：

$$\nu = \frac{Q}{h} \quad \text{或} \quad \lambda = \frac{hc}{Q} \quad (1-1)$$

式中， Q ——原子的两种状态间的能量差，

ν ——辐射光的频率，

λ ——辐射光的波长，

c ——光速($c = 2.998 \times 10^8$ 米/秒)，

h ——普朗克常数($h = 6.626 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒)。

真实的原子有许多能级，能产生许多不同波长的光谱线。在气态原子中，线状光谱是很明显的，在分子气体中，能级非常多，光谱线也就比较丰富，有的能级相互靠得很近，光谱线几乎分不开来，形成光谱带。

辐射是物质内部“量子运动”的产物，如何促使物质内部的量子运动呢？我们的祖先早就学会使用物体燃烧发光，物体的燃烧就其本质来说是物质基本粒子的热运动，这个热运动是组成物质的基本粒子——原子和其它粒子剧烈地运动和激发的结果，随之而来的辐射跃迁便产生光辐射。所有热辐射光源的基本过程就是这样的。目前常用的热辐射光源（白炽灯）就是用电加热物体至白炽状态，它们的组成粒子剧烈地运动被激发而产生辐射跃迁。

另一种产生辐射的方法是将电压加在放电管的两个电极之间，这样两电极之间就会产生电场，电场将使由电极发射出来的电子加速，这些被加速的电子与原子碰撞，使原子电离或激发，随之而来原子的辐射跃迁，就产生了光辐射，这

是日常生活中使用的气体放电光源的发光机理。显然，实际一个气体放电光源不仅是上述的简单过程，还有许多其它过程同时发生，是一个综合性的极为复杂的过程。

气体放电除有辐射特性外，还有许多其它特性。利用气体放电其它特性制成的充气真空电子器件称为离子器件。离子器件的种类很多，有的已很少用，被淘汰了，目前常用的有氢闸流管、电晕放电稳压管和计数管等。

§1.1 热辐射的产生及其特性

当物体加热至高温时，它的组成粒子剧烈运动，被激发至激发态，然后自发跃迁到基态，以后再激发，再自发跃迁，不断地辐射出能量来。随着温度的增高，短波长的辐射能愈来愈多，当物体被加热至温度773开时，在它的辐射光谱中逐渐出现可见光部分，这时观察到物体呈暗红色。如继续升高温度，物体将变成红色、桔黄色，以致最后发出白色的光，热辐射的规律已研究得较完善，尤其是黑体。黑体是这样一种物体，它能够在任何温度下，将辐射到它表面上任何波长的辐射能全部吸收。研究表明：黑体单位面积上某一波长的辐射功率只与黑体的温度有关，根据光的量子理论，可以推导出描述黑体辐射的规律，即普朗克公式：

$$M_{\lambda_b} = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (1-2)$$

式中， M_{λ_b} ——黑体的光谱辐射密度，即单位面积的黑体在波长为 λ 的单位波长间隔内的辐射通量(瓦/米²)；

λ ——波长(米)；

T ——黑体的温度(开)；

常数 $C_1 = 3.7415 \times 10^{16}$ 瓦·米²； $C_2 = 1.4388 \times 10^2$ 米·

开。

按式 (1-2) 可得出黑体辐射的光谱能量分布曲线 如图 1-2 所示。图中曲线下的面积即为该温度下黑体辐射能量 (称

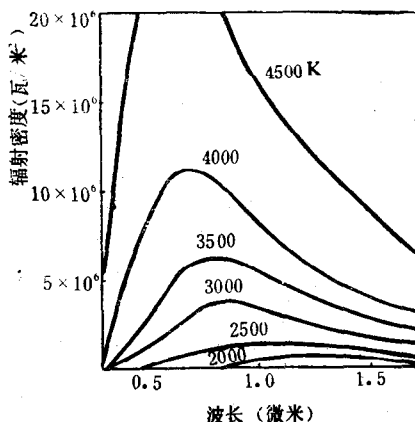


图 1-2 黑体辐射能量分布曲线

为黑体辐射出度)。由图可知, 随着温度的升高, 黑体辐射出度迅速增长, 如果计算不同温度时, 曲线下所包含的面积, 则可得出黑体的辐射出度与温度变化的四次方关系式:

$$M_{\bullet} = \sigma T^4 \quad (1-3)$$

式中, σ 为辐射系数, 其值为 5.67×10^{-8} 瓦·米⁻²开⁻⁴。同时从图 1-2 可以看出, 随着温度的增高, 黑体辐射出度的峰值波长逐渐减小, 向短波方向偏移, 偏移值也遵循一定规律。通过理论推算, 黑体辐射的峰值波长 λ_{max} 与温度有如下关系:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b \quad (1-4)$$

式中, b 为常数, $b = 2.897 \times 10^{-3}$ 米·开。式 (1-4) 通常称为黑体辐射的位移定律。

表 1-1 钨在不同温度时的辐射性能

真实温度 开	色 温 开	积分辐射系数 ϵ_r	辐射出度 M_e 瓦/厘米 ²	亮 度 L 坎/米 ²	光 效 η 流明/瓦	电 阻 ρ 欧·厘米
1000	1006	0.105	0.603	1.17	—	24.9×10^{-6}
1500	1517	0.192	5.52	3330	0.197	30.35×10^{-6}
2000	2033	0.263	24	24×10^4	2.77	56.7×10^{-6}
2500	2557	0.312	69.8	273.5×10^4	11.55	73.9×10^{-6}
3000	3094	0.346	160.3	1257×10^4	27.1	92.1×10^{-6}
3200	3311	0.357	214	2110×10^4	34.2	99.5×10^{-6}
3400	3533	0.366	280	3370×10^4	42.2	107.2×10^{-6}
3600	—	0.374	360	—	—	115.0×10^{-6}
3655	3817	0.376	383	5740×10^4	—	117.2×10^{-6}

实际物体的辐射与黑体有一定差异，图1-3示出了黑体

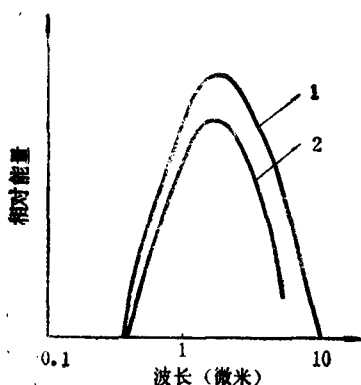


图 1-3 黑体和钨辐射体的
相对光谱能量分布
1. 黑体；2. 钨辐射体

与钨的辐射光谱能量分布。为描述钨的性能，只需在式(1-2)中引入光谱发射率 ϵ ，其表达式为

$$M_{\lambda} = C_1 \epsilon \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (1-5)$$

光谱发射率 ϵ 的值对某种辐射材料而言，与材料的温度和波长有关，钨的总辐射出度为

$$M_e = \epsilon_r \sigma T^4 \quad (1-6)$$

式中， ϵ_r ——积分辐射系数。表1-1列出了钨在不同温度下的有关参数。

同温度下的有关参数。

§1.2 气体放电的特性

在绝对零度时，气体中不存在自由电子，常温时，也仅有少量自由电子。只有通过各种形式的激发，才能使气体电离，产生大量自由电子。电离气体的方式很多，如光的照射、电场或磁场的作用等。气体放电管是在一个密闭容器中装有二个电极，电极间的空间充有某种气体，在放电管的两个电极加上电压后，就产生电场，由电极发射出来的电子在电场的作用下，由阴极向阳极方向运动。电子在运动路程中，不断地从电场中获得能量，遇到气体原子时，就与气体原子碰撞，使气体产生电离。气体电离后，带负电荷的电子

在电场作用下移向阳极，带正电荷的离子移向阴极，如图1-4所示。通过放电管的电流是电子和离子电流的总和，由于离子的质量要比电子的大得多，在电场中离子的运动速度也要比电子的慢得多，因此一般离子电流仅占总电流的0.1%~1%。

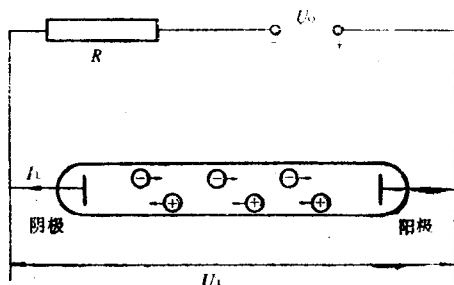


图 1-4 气体放电的示意图

在一个气体放电管中，电子和气体原子等的运动状况极其复杂。总的来说，由于气体放电管中气体原子相互之间，原子和电子之间的相互作用，引起电离和激发，形成持续的气体放电。在放电过程中，气体不断地从原始状态被激发成激发态，同时又不断地由激发态自发跃迁至基态，以辐射形式释放出多余的能量，这样就产生了气体放电辐射。气体放电辐射的辐射光谱和强度与许多因素有关，如气体放电的电流密度，气体的种类，气体的压力等。

气体放电管的电压与电流之间的关系称为气体放电的伏-安特性。在图1-4中，如果改变电源电压 U_0 ，测量灯管电压 U_L 和灯管电流 I_L 即可得出如图1-5所示的气体放电的全伏-安特性曲线。

全伏-安特性曲线各段的放电机理是这样的：由于外致

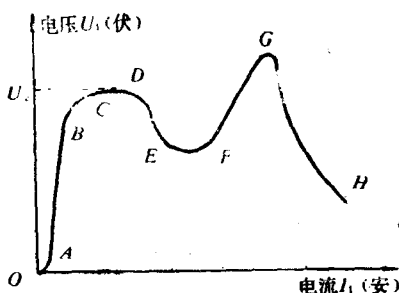


图 1-5 气体放电的全伏-安特性曲线

电离使灯管中产生带电粒子，它们在电场的作用下，向电极方向运动形成电流。随着电场的增强，带电粒子的速度增加，电流增大，这就是 OA 段。当电场再增强时，所有外致电离产生的带电粒子全部到达电极，电流就饱和了，形成了曲线的 AB 段。在 B 点以前，带电粒子虽有一定能量，即使它们与气体原子碰撞，还没有足够能量使气体原子电离。如果电源电压继续升高，电场将带电粒子的速度增加到足够大时，它们与中性气体原子发生碰撞，即能使气体原子电离，电离后产生的电子和离子又被电场加速去和另一些中性气体原子作电离碰撞，形成更多的电子和离子。这种形成雪崩式地电子不断增加，就是 BD 段的雪崩放电。在 D 点，灯管电流突然增加，管压降迅速降低至 E 点，那时灯管中能见到辉光。 D 点的电压称为气体放电的着火电压，用 U_1 表示。在 EF 段，电流增加时，管压降基本不变，称为正常辉光放电。正常辉光放电的特点是：阴极的电流密度是一个常数。到 F 点后，如果进一步增加电源电压，阴极的电流密度增加，同时管压降也升高，就进入了 FG 段非正常辉光放电阶段。其后，再进一步增加电流，电极因温度升高转入热电子

发射，管压降大幅度降低，电流迅速增加，形成了GH弧光放电阶段。

OC段放电是非自持的，如果除去外致电离，则电流立即消失。自C点以后，放电是自持的，即除去外致电离，放电仍能持续进行。从E点以后是稳定的自持放电。非自持放电是见不到光的，所以又称为黑暗放电，此时放电电流大约在 10^{-6} 安以下，辉光放电电流在 $10^{-6} \sim 10^{-1}$ 安之间，而弧光放电的电流约在 10^{-1} 安以上。

对电光源而言，主要研究由气体放电产生的可见光部分的电磁辐射能。这里先讨论一下辉光放电的情况。图1-6示出了直流供电条件下辉光放电管的光强和电位分布情况。从阴极到阳极，按其发光程度不同，可分为下述五个区域：1-

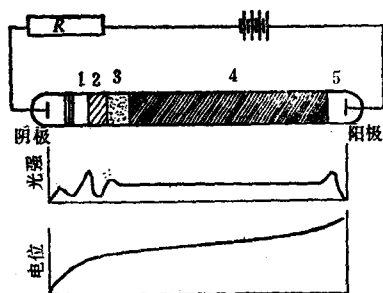


图 1-6 辉光放电管的光强和电位分布

阴极暗区；2-负辉区；3-法拉第暗区；4-正柱区；5-阳极辉光区。这五个区域中，正柱区是一个等离子区，它是一个均匀的光柱，有一部分气体放电光源就是利用气体放电的这一特性制造的。等离子区就是指电子浓度和正离子浓度几乎相等的区域，在这一区域里，许多气体的原子被电离和激发，同时也存在着电子和离子的复合，即消电离过程，这一复合

过程基本上在管壁附近进行。为了维持灯管内的平衡状态，必须自阴极不断补充电子。在正柱区中也存在着电压降。在放电管中，电压降的大小是由灯管的结构和所充气体的性质等因素决定的。正柱区电压降的大小是决定正柱区的发光强弱的主要因素之一，通常电压降高，发光就强。

辉光放电灯主要利用负辉区和正柱区的可见光辐射。使用那一区域的可见光辐射取决于所设计的灯管的特性。当管内气压降低时，正柱区长度就减小，而辉光放电的其它特性部分的尺寸就拉长，气压约1.3帕时，正柱区完全消失，法拉第暗区一直延伸到阳极。如果改变电极间的距离，保持管内气压不变，正柱区的长度随极间距离增大而增大。日常使用的霓虹灯就是利用辉光放电的正柱区发光的，因而灯管就做得比较长，为点燃灯管在两端电极上加的电压也较高，一般都在数千伏甚至万伏以上。也有一些光源是利用负辉区发光的，如辉光放电指示灯，这类灯的两电极之间的距离很短，有意识地阻止辉光放电的正柱区。

当气体放电进入弧光放电阶段时，阴极上的电流密度大大增加。弧光放电的一个明显特征是阴极的位降电压很低，低气压弧光放电的正柱区与辉光放电的正柱区是一样的，但在高气压和超高气压时，弧光放电的正柱区有它一些独特的性质。

在低气压气体放电时，放电管内主要是将气体原子激发至最可能存在的原子激发态的能级上，当这些原子从激发态自发辐射跃迁至基态时，辐射出一定波长的电磁波，从激发态向基态跃迁所产生的光辐射叫做共振辐射光谱。所以低气压弧光放电的辐射光谱是以所充气体的特征线状光谱（共振辐射光谱）为主，连续光谱仅占极小的一部分。

随着充气压的增加，高能电子碰撞增多，能量的传递使气体温度逐渐上升至4000~6000开，那时气体放电向放电管中心收缩，形成中心的高温区，与管壁之间形成很大的温度差，这时受激原子辐射的光谱也明显地增宽，如图1-7所示。这主要由于高压压缩原子，促使它们频繁地相互作用。同时管子中心产生的光辐射，通过较冷外层时，发生反复吸收和重新辐射，造成辐射光谱增宽，这在高压气体放电时显得很剧烈。这些过程对共振辐射的光谱更为明显。共振辐射谱线在气压升高时，最先增宽，并且比其它谱线增宽得更利害。管壁附近较冷的气体原子对共振辐射的吸收称为气体的自吸收现象。由于气体原子的自吸收，在辐射光谱的两个峰值之间出现了一个暗淡的中心。有时，共振辐射的自吸收现象极严重，使共振辐射谱线大大减弱，其它非共振辐射逐渐占主导地位。

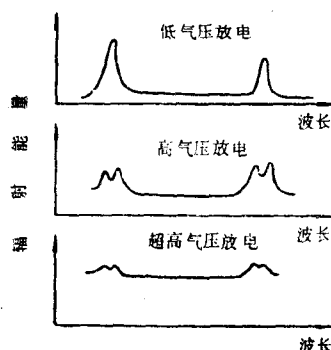


图 1-7 不同气压时的辐射光谱

如进一步增高气压，增宽的谱线相互融合成连续辐射光谱，再增高气压，辐射光谱趋向于黑体辐射光谱。这种气体放电实际上是一团白炽状态的气体，它的温度已大大超过任何难熔金属的熔点，在气体放电的辐射光谱中可获得较多的可见光辐射。一些高压高光效的光源就是用气体放电的这些原理制成的。

气体放电除了辐射特性被利用作为光源外，利用它的电气特性还可以制成另一类充气的真空电子器件——离子管。