

一切能产生光辐射的辐射源都称为光源。光电探测系统中所用的光源可划分为自然光源和人造光源两类。自然光源是在自然界中存在的,如太阳、恒星、人体等。这些光源的辐射通常很不稳定,且无法控制;人造光源是人为将各种形式的能量(电能、热能、化学能)转换为光辐射能的器件,如白炽灯、汞灯、激光器等。自然光源组成被动式光电探测系统,其信息源直接来自目标自身的辐射或外来光辐射,如天文光电探测、微光夜视仪等;人造光源组成主动探测系统,其信息源来自人造光源对目标的反射、透射或散射等光辐射,如激光制导、光电精密微小尺寸测量等。在光电探测系统中,除对自然光源的特性进行直接测量外,很少采用它们作为测试其他物理量的光源。

本章介绍热辐射光源、气体放电光源、激光光源和发光二极管等几种光电探测系统中常用光源的工作原理、主要特性及其应用,为读者在设计光电探测系统时正确选用光源提供依据和参考。

3.1 光源的基本特性参数

光源的基本特性主要由辐射效率和发光效率、光谱功率分布、空间光强分布、光源的色温和颜色等几个特性参数来描述。

3.1.1 辐射效率和发光效率

1. 辐射效率

在给定波长范围内,辐射体发出的辐射通量与产生这些辐射通量所需的电功率之比,称为该光源在规定光谱范围内的辐射效率(Radiation Efficiency),即

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{P} \quad (3-1)$$

2. 发光效率

某一光源所发射的光通量与产生这些光通量所需的电功率之比,就是该光源的发光效率(Luminous Efficiency),即

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = \frac{K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P} \quad (3-2)$$



3.1
微课视频

式中, λ 的单位为 nm,发光效率的单位为 lm/W。
在照明领域或光度测量系统中,一般应尽可能选用辐射效率(发光效率)较高的光源。
表 3-1 给出了几种常见光源的发光效率。

表 3-1 常用光源的发光效率

光源种类	发光效率/lm/W	光源种类	发光效率/lm/W
普通钨丝灯	8~18	高压汞灯	30~40
卤钨灯	14~30	高压钠灯	90~100
普通荧光灯	35~60	球形氙灯	30~40
三基色荧光灯	55~90	金属卤化物灯	60~80

3.1.2 光谱功率分布

自然光源和人造光源大都是由单色光组成的复色光。不同光源在不同光谱上辐射出不同的光谱功率,常用光谱功率分布(Spectral Power Distribution)来描述。若令其最大值为 1,将光谱功率分布进行归一化,那么经过归一化后的光谱功率分布称为相对光谱功率分布。

光源的光谱功率分布通常可分为四种情况,如图 3-1 所示。图 3-1(a)称为线状光谱(Line Spectrum),由若干条明显分隔的细线组成,低压汞灯就属于这种分布。图 3-1(b)称为带状光谱(Band Spectrum),它由一些分开的谱带组成,每一谱带中又包含许多细谱线,如高压汞灯、高压钠灯就属于这种分布。图 3-1(c)为连续光谱(Continuous Spectrum),所有热辐射光源的光谱都是连续光谱。图 3-1(d)是混合光谱(Mixed Spectrum),它由连续光谱与线、带谱混合而成,一般荧光灯的光谱就属于这种分布。

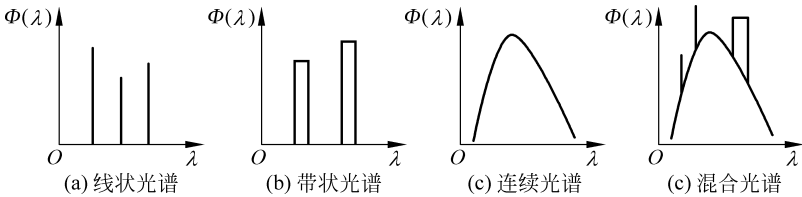


图 3-1 四种典型的光谱功率分布

在选择光源时,光谱功率分布应由测量对象的要求来决定。在目视光学系统中,一般采用可见光谱辐射比较丰富的光源。对于彩色摄影用光源,为了获得较好的色彩还原,应采用类似于日光色的光源,如卤钨灯、氙灯等。在紫外分光光度计中,通常使用氘灯、紫外汞灯等紫外辐射较强的光源。在光纤应用技术中,通常使用发光二极管和半导体激光器等。

3.1.3 空间光强分布

对于各向异性光源,其发光强度在空间各方向上是不相同的,若在空间某一截面上自原点向各径向取矢量,则矢量的长度与该方向的发光强度成正比。将各矢量的端点连起来,可得到光源在该截面上的发光强度曲线,即配光曲线。图 3-2 所示是超高压球形氙灯的光强分布。

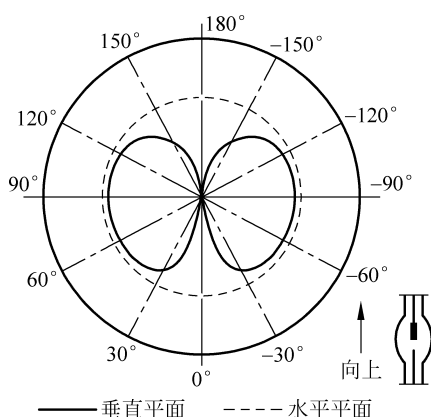


图 3-2 超高压球形氙灯光强分布

一般情况下,为了提高光的利用率,通常选择发光强度高的方向作为照明方向。为了进一步利用背面方向的光辐射,还可以在光源的背面安装反光罩,并使反光罩的焦点位于光源的发光中心上。

3.1.4 光源的色温

黑体的温度决定了它的光辐射特性。对于非黑体辐射,它的某些特性常可用黑体辐射的特性来近似地表示。对于一般光源,通常用分布温度、色温或相关色温表示。

1. 分布温度

辐射源在某一波长范围内辐射的相对光谱分布与黑体在某一温度下辐射的相对光谱功率分布一致,那么黑体的这一温度就称为该辐射源的分布温度(Distribution Temperature)。这种辐射体的光谱辐亮度可表示为

$$L_e(\lambda, T_v) = \epsilon \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_v} - 1} \quad (3-3)$$

式中: T_v ——分布温度;

ϵ ——发射率,它是一个与波长无关的常数,这类辐射体又称为灰体(Graybody)。

2. 色温

辐射源发射光的颜色与黑体在某一温度下辐射光的颜色相同,则黑体的这一温度称为该辐射源的色温(Color Temperature)。由于一种颜色可以由多种光谱分布产生,所以色温相同的光源,它们的相对光谱功率分布不一定相同。

3. 相关色温

对于一般光源,它的颜色与任何温度下的黑体辐射的颜色都不相同,这时光源用相关色温表示。在均匀色度图中,如果光源的色坐标点与某一温度下的黑体辐射的色坐标点最接近,则黑体的这一温度称为该光源的相关色温(Correlated Color Temperature, CCT)。

3.1.5 光源的颜色

光源的颜色包含两方面的含义,即色表(Color Table)和显色性(Color Rendering Properties)。用眼睛直接观察光源时所看到的颜色称为光源的色表。例如,高压钠灯的颜色

表呈黄色,荧光灯的色表呈白色。当用光源照射物体时,物体呈现的颜色与该物体在完全辐射体照射下所呈现的颜色一致性称为该光源的显色性。白炽灯和卤钨灯等几种光源的显色性较好,适用于辨色要求较高的场合,如彩色电影、彩色电视的拍摄和放映、染料、彩色印刷等行业。高压汞灯和高压钠灯等光源的显色性差一些,一般用于道路、隧道和码头等辨色要求较低的场合。

不同光电探测系统对光源的要求也不一样,光电探测系统中对光源选择的基本要求如下:

(1) 对光源发光光谱特性的要求。光源发光的光谱特性必须满足检测系统的要求。按检测任务的不同,要求的光谱范围也有所不同,如可见光区、紫外光区、红外光区等。有些场合要求连续光谱,有些场合又要求特定的谱段。系统对光谱范围的要求都应在选择光源时加以满足。

(2) 对光源发光强度的要求。为确保光电探测系统的正常工作,对系统采用光源的发光强度应有一定要求。光源的强度过低,会导致系统获得信号过小,以致无法正常探测;光源强度过高,又会导致系统工作的非线性,有时可能损坏系统、待测物或光电探测器,而且还导致不必要的能量消耗造成的浪费。因此,在系统设计时必须对探测器所需获得的最大、最小光通量进行正确估计,并按估计值来选择光源。

(3) 对光源稳定性的要求。不同的光电探测系统对光源的稳定性有着不同的要求。稳定光源发光的方法很多,一般要求时,可采用稳压电源供电;当要求较高时,可采用稳流电源供电,所用的光源应该预先进行老化处理;当有更高要求时,可对发出光进行采样,然后再反馈控制光源的输出。

(4) 对光源其他方面的要求。光电探测中,光源除了以上几条基本要求外,还有一些具体要求。例如,灯丝的结构和形状、发光面积的大小和构成、灯泡玻壳的形状和均匀性、发光效率和空间分布等,这些方面都应该根据测试系统的要求给以满足。



3.2
微课视频

3.2 热辐射光源

任何物体只要其温度大于绝对零度,就会向外界辐射能量,物体这种因温度而辐射能量的现象称为热辐射。热辐射光源有三个特点:

(1) 它们的发光特性都可以利用普朗克公式进行精确的估算,即可以精确掌握和控制它们的发光或辐射性质。

(2) 它们发出的光通量构成连续的光谱,且光谱范围很宽,因此使用的适应性强。但在通常情况下,紫外辐射含量很少,这又限制了这类光源的使用范围。

(3) 人造热辐射光源采用适当的稳压或稳流供电时,可使这类光源的光获得很高的稳定度。

本节介绍几种常用的热辐射光源。

3.2.1 太阳

太阳可看成是一个直径为 $1.392 \times 10^9 \text{ m}$ 的光球。它到地球的年平均距离是 $1.49 \times 10^{11} \text{ m}$ 。因此从地球上观看太阳时,太阳的张角只有 0.533° 。

大气层外的太阳光谱能量分布相当于 5900K 左右的黑体辐射。其平均辐亮度为 $2.01 \times 10^7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 平均亮度为 $1.95 \times 10^9 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。

射到地球上的太阳辐射, 要斜穿过一层厚厚的大气层, 使太阳辐射在光谱和空间分布、能量大小、偏振状态等都发生了变化。大气的吸收光谱比较复杂, 其中氧(O_2)、水汽(H_2O)、臭氧(O_3)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)和其他碳氢化合物(如 CH_4)等, 都在不同程度上吸收了太阳辐射, 而且它们都是光谱选择性的吸收介质。在标准海平面上太阳的光谱辐照度曲线如图 3-3 所示, 其中的阴影部分表示大气的光谱吸收带。

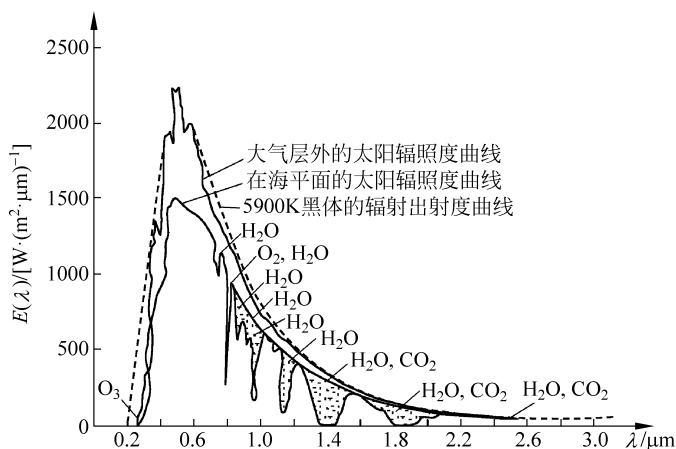


图 3-3 太阳的光谱辐照度曲线

3.2.2 黑体模拟器

在许多军用红外光电信息技术和光电系统中, 往往需要这样一种辐射源, 它的角度特性和光谱特性酷似理想黑体, 这种辐射源常称为黑体模拟器。

图 3-4 所示为一种人造黑体模拟器的结构示意图。它具有绝热层、测温和控温的传感器, 从而可保持热平衡和调节温度, 可以很好地实现辐射功能。用铜或不锈钢制成的圆筒内有圆锥腔作光源, 筒外加石棉和硅酸盐水泥做成绝缘层, 筒的外层绕以电阻丝加热。用温度计可测得温度信号, 再用自动控温仪控温。由光阑小孔射出的即为黑体辐射。

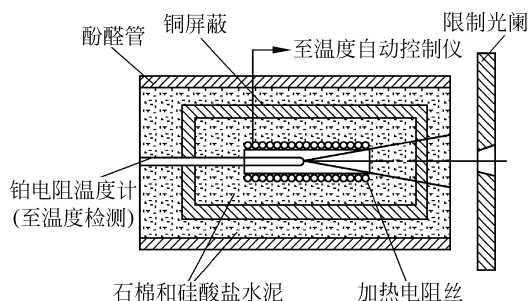


图 3-4 一种人造黑体辐射器结构示意图

在热辐射的定标中, 黑体模拟器是红外光谱区($0.75 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 或 $0.75 \sim 6 \mu\text{m}$)的标准光源。一般最高工作温度是 3000K, 实际应用大多在 2000K 以下。辐射的峰值波长在红外

区。过高的温度不仅要消耗大量的电功率,而且会加剧内腔表面材料的氧化。

3.2.3 白炽灯与卤钨灯

1. 白炽灯

白炽灯(Incandescent Lamp)是照明工程和光电测量中最常用的光源之一。白炽灯的结构主要包括由钨丝做成的灯丝和玻璃泡壳。电流通过钨丝,使钨丝升温而发光。白炽灯发射的是连续光谱,在可见光谱段中部和黑体辐射曲线相差约 0.5%,而在整个光谱段内和黑体辐射曲线平均相差 2%。受灯丝工作温度所限,白炽灯的色温约为 2800K。辐射光谱限于透过玻璃泡的部分,为 $0.4\sim 3\mu\text{m}$;可见光只占 6%~12%,当加上红外滤光片时,可作为近红外光源。仪器中使用的白炽灯是低电压大电流的,即电压为 6~12V,功率为几瓦到几十瓦,灯丝聚集成点光源状。

白炽灯有真空钨丝白炽灯和充气钨丝白炽灯两种。真空钨丝白炽灯的工作温度为 2300~2800K,发光效率约为 10lm/W。由于钨丝的熔点约为 3680K,进一步增加钨的工作温度会导致钨的蒸发率急剧上升,钨蒸发沉积在泡壳上,使灯泡发黑,亮度降低,寿命剧减。

充气钨丝白炽灯是在灯泡中充入和钨不发生化学反应的氩、氮等气体,使由灯丝蒸发出来的钨原子在和这些气体原子碰撞时,部分钨原子能返回灯丝。这样可有效地抑制钨的蒸发,从而使白炽灯的工作温度提高到 2700~3000K,相应的发光效率提高到 17lm/W。

灯丝是白炽灯的主要部分。灯丝的形状和尺寸对于灯的寿命和发光效率等都有直接的影响。在光学仪器上使用,灯丝的形状大致可分为点光源、线光源和面光源。在要求照明光束为平行光束的仪器中,尽量采用点光源。对光束要求不高的场合,可采用线光源或面光源。

虽然白炽灯发光效率低,但因它结构简单,造价低廉,使用方便,且有连续光谱,所以仍是应用广泛的光源之一。色温为 2856K 的白炽灯,可作为可见光和近红外区光电探测器积分灵敏度测试的标准光源。

2. 卤钨灯

卤钨灯(Halogen Lamp)是一种新型的电光源,它是利用电能使灯丝发热到白炽状态而发光的电光源。它较好地解决了白炽灯存在的发光效率与寿命之间的矛盾,具有较高的发光效率和较长的寿命,因而得到广泛应用。

卤钨灯是在灯泡中充入卤钨循环剂(如氯化碘、溴化硼等),在一定温度下可以形成卤钨循环,即蒸发的钨和玻璃壳附近的卤素合成卤钨化合物,而该卤钨化合物扩散到温度较高的灯丝周围时,又分解成卤素和钨。这样,钨就重新沉积在灯丝上,而卤素被扩散到温度较低的泡壁区域再继续与钨化合。这一过程称为钨的再生循环。卤钨循环进一步提高了灯的寿命,灯的色温可达到 3200K,发光效率也相应提高到 30lm/W。

卤钨灯的种类较多,按不同情况分类如下:按灯内充入卤素不同可分为碘钨灯和溴钨灯等;按灯壳材料不同可分为石英玻璃卤钨灯和硬质玻璃卤钨灯;按灯丝形状不同可分为点光源、线光源和面光源卤钨灯三类。卤钨灯可用于检测、电影放映及照明等。

3. 卤钨灯和白炽灯的比较

卤钨灯与白炽灯相比,有许多优点:

(1) 体积小。体积是同功率白炽灯体积的 0.5%~3%,因而可使光学系统小型化,降低

成本。

(2) 光通量稳定,稳定时的光通量为开始的 95%~98%,而白炽灯只为 60%。

(3) 紫外线较丰富。因卤钨灯的灯丝温度较高,且其泡壳也能通过紫外辐射,所以可作紫外辐射源用于光谱辐射测量。

(4) 发光效率比白炽灯高 2~3 倍。

(5) 寿命长。

卤钨灯的缺点是价格较高,另外它的管壁温度高,使用时要注意安全,以免烧毁其他物质。

3.3 气体放电光源

利用气体放电原理制成的光源称为气体放电光源(Gas Discharge Lamp)。气体放电光源在制作时在灯中充入发光用的气体,如氢、氦、氖、氙、氪等,或金属蒸气,如汞、镉、钠、铜、铊、铟等。气体在电场作用下激励出电子和离子。当离子向阴极、电子向阳极运动时,从电场中得到能量,当它们与气体原子或分子碰撞时会激励出新的电子和离子。由于这一过程中有些内层电子会跃迁到高能级,引起原子的激发,受激原子回到低能级时就会发射出可见辐射或紫外、红外辐射。这样的发光机制就称为气体放电发光。

气体放电光源的基本结构如图 3-5 所示,其主要由阳极、阴极和泡壳构成。

大部分气体放电光源发光的过程有三步:

(1) 阴极发射电子,自由电子被电场加速,使电子获得足够的能量。从阴极逸出的方式主要有加热(热电子发射)、正离子轰击和施加电场等。

(2) 被加速的电子与气体原子碰撞,引起气体电离和激发,气体原子吸收了能量,外层电子由基态跃迁到激发态。

(3) 处于激发态的原子是不稳定的,将在很短时间内(10^{-9} s)自发返回基态,当受激原子返回基态时,所吸收的能量以辐射发光的形式释放出来。

气体放电光源具有下列共同的特点:

(1) 发光效率高。发光效率比同瓦数的白炽灯发光效率高 2~10 倍,因此具有节能的特点。

(2) 结构紧凑。由于不靠灯丝本身发光,电极可以做得牢固紧凑,耐震、抗冲击。

(3) 寿命长。一般比白炽灯寿命高 2~10 倍。

(4) 光色适应性强,可在很大范围内变化。

由于上述特点,气体放电灯具有很强的竞争力,因而发展很快,并在光电测量和照明工程中得到广泛应用。气体放电光源种类较多,本节介绍光学仪器中常用的几种气体放电光源。

3.3.1 汞灯

按玻壳内气压的高低,汞灯通常分为低压汞灯、高压汞灯和球形超高压汞灯。

1. 低压汞灯

汞灯在低压放电时主要辐射出 185.0nm 和 253.7nm 紫外特征谱线,如图 3-6(a)所示,



3.3
微课视频

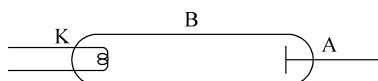


图 3-5 气体放电灯原理图
A—阳极; K—阴极; B—泡壳

可用作紫外杀菌、光化学反应和荧光分析等。

低压汞灯(Low Pressure Mercury Lamp)有冷阴极辉光放电灯和热阴极辉光放电灯两类。冷阴极辉光放电灯灯管细长,玻璃管壳通常用石英玻璃或透紫外玻璃制作,启动电压高,供电电源为漏磁变压器或高频振荡电源。为了使发光面集中,也有将细长灯管绕成紧凑的盘形状或螺旋状。热阴极辉光放电灯玻璃管壳用普通玻璃制作,其在可见光的特征谱线常用作光谱仪的波长基准。

2. 高压汞灯

当汞灯内的蒸气压达到 1~5 个大气压时,汞灯电弧的辐射光谱就会产生明显变化,光谱线加宽,出现弱的连续光谱,紫外辐射明显减弱,而可见辐射增加,其光谱分布如图 3-6(b)所示。高压汞灯(High Pressure Mercury Lamp)除供照明外,在光学仪器、光化学反应、紫外线理疗、荧光分析等方面都有广泛应用。

3. 球形超高压汞灯

球形超高压汞灯点燃时,灯内汞蒸气压达到 1~20MPa(约 10~200 个大气压),这样灯的辐射光谱与高压汞灯相比有明显的不同:紫外辐射减少,可见辐射光谱线较宽,连续部分增加,并且红外光谱辐射增强,如图 3-6(c)所示。球形超高压汞灯中的电极距离一般为毫米级,放电电弧集中在电极之间,因此电弧的亮度很高,常用于光学仪器、荧光分析和光刻技术等方面。

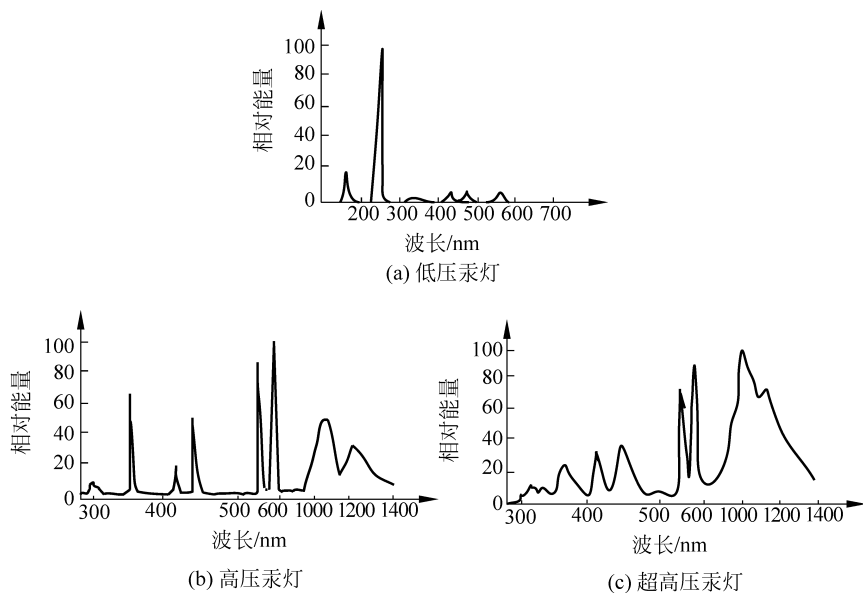


图 3-6 汞灯光谱能量分布图

3.3.2 钠灯

钠灯(Sodium Lamp)的基本结构如图 3-7 所示。当灯泡启动后,电弧管两端电极之间产生电弧,由于电弧的高温作用使管内的钠和汞受热蒸发成为汞蒸气和钠蒸气,阴极发射的电子在向阳极运动过程中,撞击放电物质原子,使其获得能量产生电离激发,然后由激发态回复到稳定态或由电离态变为激发态再回到基态无限循环,多余的能量以光辐射的形式释

放,便产生了光。高压钠灯中放电物质蒸气压很高,即钠原子密度高,电子与钠原子之间碰撞次数频繁,使共振辐射谱线加宽,出现其他可见光谱的辐射,因此高压钠灯的光色优于低压钠灯。

钠灯同其他气体放电灯泡一样,工作在弧光放电状态,其伏安特性曲线为负斜率,即灯泡电流上升,而灯泡电压却下降。由于气体放电灯泡的负阻特性,如果把灯泡单独接到电网中去,其工作状态是不稳定的,随着放电过程继续,它必将导致电路中电流无限上升,最后直至灯或电路中的零部件过流烧毁。在恒定电源条件下,为了保证灯泡稳定地工作,电路中必须串联一具有正阻特性的电路元件来平衡这种负阻特性,稳定工作电流,该元件称为镇流器或限流器。

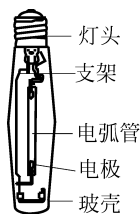


图 3-7 高压钠灯

3.3.3 氙灯

氙灯(Xenon Lamp)是在椭球形石英泡壳内充有 $0.019 \sim 0.0266 \text{ MPa}$ 高压氙气,氙气在两个间距小于 10 mm 的钨电极之间产生高温电弧放电,从而发出强光。高压氙灯的辐射光谱是连续的,与日光的光谱能量分布相接近,色温为 6000 K 左右,显色指数 90 以上,因此有“小太阳”之称。氙灯可分为长弧氙灯、短弧氙灯和脉冲氙灯三种。

1. 长弧氙灯

当氙灯的电极间距为 $15 \sim 130 \text{ cm}$ 时称为长弧氙灯(Long-arc Xenon Lamp),多为细管型。它的工作气压一般为一个大气压,发光效率为 $25 \sim 30 \text{ lm/W}$,常用于大面积照明和材料老化实验等。

2. 短弧氙灯

当氙灯的电极间距缩短到毫米量级时称为短弧氙灯(Short-arc Xenon Lamp)。它的工作气压一般约为 $10 \sim 20$ 个大气压。一般为直流供电,灯的电弧亮度很高,其阴极点的最大亮度可达到几十万坎德拉每平方米,电弧亮度在阴极和阳极距离上很不均匀。短弧氙灯常用于电影放映、荧光分光光度计及模拟日光等场合。

3. 脉冲氙灯

脉冲氙灯(Pulse Xenon Lamp)能在很短的时间内发出很强的光。它的结构有管形、螺旋形和 U 形三种。管内气压均在 0.1 MPa (约一个大气压)以下,由高压电脉冲激发产生光脉冲。脉冲氙灯广泛用作固体激光器的光泵浦源、照相制版、高速摄影和光信号源等。

3.3.4 空心阴极灯

空心阴极灯(Hollow Cathode Lamp, HCL)属于冷阴极低气压正常辉光放电灯。空心阴极灯的阴极由金属元素或其他合金制成空心圆柱形,圆环形阳极是用吸气性能很好的钨材料制成的。空心阴极放电的电流密度可以比正常辉光放电高 100 倍以上,而阴极位降比正常辉光放电时低 100 V 左右。正常辉光放电时因为放电电流小,主要辐射工作气体的原子光谱线;而空心阴极放电时,放电正离子在很高的阴极位降区被加速轰击阴极,使阴极金属被溅射,被溅射出来的阴极金属原子蒸气在空心阴极灯中被激发,辐射出该金属的原子特征谱线。

空心阴极灯也叫作原子光谱灯,阴极材料根据所需的谱线选择相应的金属。窗口有石英玻璃和普通玻璃两种,其根据辐射的原子光谱波长而定。由于这种灯工作时阴极的温度

并不高,所辐射出的金属原子谱线很窄,强度很大,稳定性好。因此,空心阴极灯用作对微量金属元素吸收光谱定性或定量分析的光源,以及用于光谱仪器波长定标上。此外,空心阴极灯是原子吸收分光光度计上必不可少的光源。

3.3.5 氘灯

氘灯(Deuterium Lamp)是一种热阴极弧光放电灯,泡壳内充有高纯度的氘气。氘(H_1^2)是氢(H_1^1)的同位素,又称重氢。氘灯的阴极是直热式氧化物阴极,阳极是用 0.5mm 厚的钽皮做成矩形,阳极矩形中心正对着灯的输出窗口,外壳由紫外透射比较好的石英玻璃制成。工作时先加热灯丝,产生电子发射,当阳极加高压后,氘原子在灯内受高速电子碰撞而激发,从阳极小圆孔中辐射出连续的紫外光谱(185~400nm)。氘灯的紫外辐射强度高、稳定性好、寿命长,因此常用作各种紫外分光光度计的连续紫外光源。



3.4
微课视频

3.4 激光器

激光技术兴起于 20 世纪 60 年代,激光(Laser)这个词是英语 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写,意思是辐射的受激发射光放大。激光是一类性能十分优越的辐射源,由于它突出的优点而被广泛应用于国防、科研、医疗及工业等许多领域。在光电测试系统中,激光的使用形成了新的光电技术和测量方法,提高了测量的精度。

本节首先简单介绍激光器的基本结构及原理,然后介绍激光的特性,最后介绍激光器的分类。

3.4.1 激光器的工作原理

激光器一般由激光介质、泵浦源和谐振腔三部分组成,其结构如图 3-8 所示。常用的泵浦源是辐射源或电源,利用泵浦源能量将激光介质中的粒子从低能态激发到高能态,使处于高能态的粒子数大于低能态的粒子数,形成粒子数反转分布。当高能态的粒子从高能态跃迁到低能态而产生辐射后,它通过受激原子时会感应出同相位同频率的辐射,即产生受激辐射。这些辐射波沿由两平面镜构成的谐振腔来回传播时,沿轴线的来回反射次数最多,它会激发出更多的辐射,从而使辐射能量放大。这样,受激和经过放大的辐射通过部分透射的平面镜输出到腔外,产生激光。

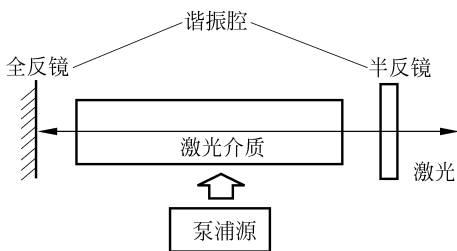


图 3-8 激光器的基本构成

3.4.2 激光的特性

与普通光源相比,激光具有亮度高(High Brightness)、方向性(Directionality)、单色性(Monochromaticity)和相干性(Coherence)好等优点。

1. 激光的单色性

普通光源发射的光,即使是单色光也有一定的波长范围。这个波长范围用谱线宽度来

表示,谱线宽度越窄,单色性越好。例如,氦氖激光器发出的波长为 632.8nm 的红光,对应的频率为 4.74×10^{14} Hz,它的谱线宽度只有 9×10^{-2} Hz;而普通的氦氖气体放电管发出同样频率的光,其谱线宽度达 1.52×10^9 Hz,比氦氖激光器谱线宽度大 10^{10} 倍以上,因此激光的单色性比普通光高 10^{10} 倍。

2. 激光的方向性

普通光源的光是均匀射向四面八方,因此照射的距离和效果都很有限,即使是定向性比较好的探照灯,它的照射距离也只有几千米。直径 1m 左右的光束,不出 10km 就扩大为直径几十米的光斑。而激光器发射的光,可以得到一条细而亮的笔直光束。激光器的方向性一般用光束的发散角表示。氦氖激光器的发散角可达 3×10^{-4} rad,十分接近衍射极限(2×10^{-4} rad)。

3. 激光的高亮度

激光器由于发光面小,发散角小,因此可获得高的光谱亮度。太阳的亮度值约为 2×10^3 W/(cm² · sr),而常用的气体激光器的亮度为 $10^4 \sim 10^8$ W/(cm² · sr),固体激光器可达 $10^7 \sim 10^{11}$ W/(cm² · sr)。用这样的激光器代替其他光源可解决由于弱光照明带来的低信噪比问题。

4. 激光的相干性

由于激光器的发光过程是受激辐射,单色性好,发射角小,因此有很好的空间和时间相干性。采用稳频技术,氦氖激光器的稳频线宽可压缩到 10kHz,相干长度达 30km。因此激光的出现使相干计量和全息技术发生了革命性变化。

3.4.3 激光器的类型

目前已研制成功的激光器达数百种,输出波长范围从近紫外直到远红外,辐射功率从几毫瓦至上万瓦。按激光工作物质划分,激光器可分为气体激光器、固体激光器、染料激光器和半导体激光器。

1. 气体激光器

气体激光器(Gas Laser)采用的工作物质繁多,激励方式多样,发射波长也很广。这里主要介绍氦氖激光器、氩离子激光器和二氧化碳激光器。

1) 氦氖激光器

氦氖激光器工作物质由氦气和氖气组成,是一种原子气体激光器。在激光器电极上施加几千伏电压使气体放电,在适当条件下氦氖气体称为激活介质。如果在激光管的轴线上安装光学谐振腔,则可获得激光输出。氦氖激光器输出的波长有 632.8nm、1.15μm 和 3.39μm。若反射镜的反射峰值设计在 632.8nm,其输出功率最大。氦氖激光器输出 1~10mW 的连续光,波长稳定度约为 10^{-6} ,主要用于精密计量、全息术和准直测量等场合。

2) 氩离子激光器

氩离子激光器的工作物质是氩气,在低气压大电流下工作,因此激光管的结构及材料都与氦氖激光器不同。连续氩离子激光器在大电流的条件下运转,放电管需承受高温和离子的轰击,因此小功率放电管常用耐高温的熔石英做成,大功率放电管用高导热系数的石墨或 BeO 陶瓷做成。在放电管的轴向加一均匀的磁场,使放电离子约束在放电管轴心附近。放电管外部通常用水冷却,降低工作温度。氩离子激光器输出的谱线属于离子光谱线,主要输

出有 452.9nm、476.5nm、496.5nm、488.0nm、514.5nm。其中,488.0nm 和 514.5nm 两条谱线最强,约占总输出功率的 80%。

3) 二氧化碳激光器

二氧化碳激光器的工作物质主要是二氧化碳,掺入少量 N_2 和 He 等气体,是典型的分子气体激光器。激光输出谱线波长分布在 $9\sim 11\mu m$ 的红外区域,典型的波长为 $10.6\mu m$ 。

二氧化碳激光器的激励方式通常有低气压纵向激励和横向激励两种。低气压纵向激励的激光器结构和氦氖激光器类似,但要求放电管外侧通水冷却。输出功率从数十瓦至数千瓦,它是气体激光器中连续输出功率最大和转换效率最高的一种器件。横向激励的激光器可分为大气压横向激励和横流横向激励两种。大气压横向激励激光器是以脉冲放电工作方式工作的,输出能量大,峰值功率可达千兆瓦的数量级,脉冲宽度约 $2\sim 3\mu s$ 。横流横向激励激光器可以获得几万千瓦的输出功率。二氧化碳激光器广泛应用于金属材料的焊接、切割、热处理、宝石加工和手术治疗等方面。

2. 固体激光器

固体激光器(Solid-state Laser)所使用的工作物质是特殊的高质量光学玻璃或光学晶体,里面掺入具有发射激光能力的金属离子。

固体激光器有红宝石、钕玻璃和钇铝石榴石等激光器。其中红宝石激光器是发现最早、用途最广的晶体激光器。粉红色的红宝石是掺有 0.05% 铬离子(Cr^{3+})的氧化铝(Al_2O_3)单晶体。红宝石被磨成圆柱形的棒,棒的外表面经初磨后,可吸收激励光。棒的两个端面研磨后再抛光,两个端面相互平行并垂直于棒的轴线,再镀以多层介质膜,构成两面反射镜。其中激光输出窗口为部分反射镜(反射比约为 0.9),另一个窗口为高反射比镜。如图 3-9 所示,与红宝石棒平行的是作为激励源的脉冲氙灯。它们分别位于内表面镀铝的椭圆柱体聚光腔的两个焦点上。脉冲氙灯的瞬时强烈闪光,借助于聚光镜腔体会聚到红宝石棒上,这样红宝石激光器就输出 694.3nm 的脉冲红光。激光器的工作是单次脉冲式,脉冲宽度为几毫秒量级,输出能量可达 $1\sim 100J$ 。

3. 染料激光器

染料激光器(Dye Laser)以染料为激光工作物质,如图 3-10 所示。染料溶解于某种有机溶液中,在特定波长光的激发下,能发射一定带宽的荧光。某些染料,在脉冲氙灯或其他激光的强光照射下,可成为具有放大特性的激活介质,用染料激活介质做成的激光器,在其谐振腔内放入色散元件,通过调谐色散元件的色散范围,可获得不同的输出波长,称为可调谐染料激光器。

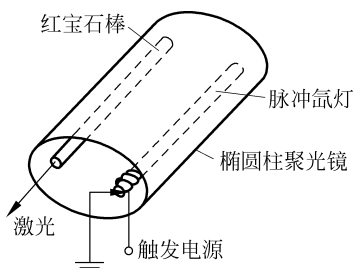


图 3-9 红宝石激光器原理图

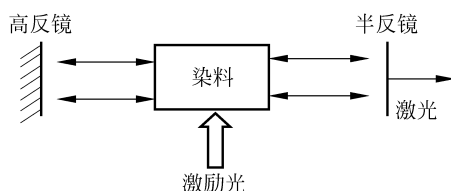


图 3-10 染料激光器原理图

若采用不同染料溶液和激励光,染料激光器的输出波长范围达 $320\sim 1000\text{nm}$ 。染料激光器有连续和脉冲两种工作方式。连续方式输出稳定,线宽小,功率大于 1W 。脉冲方式的输出功率高,脉冲输出能量可达 120mJ 。

4. 半导体激光器

半导体激光器(Semiconductor Laser)是用半导体材料作为工作物质的激光器。它是利用半导体物质(即利用电子)在能带间跃迁发光,用半导体晶体的天然解理面形成两个平行反射镜面作为反射镜,组成谐振腔,使光振荡、反馈、产生光的辐射放大,输出激光。半导体激光器常用工作物质有二元化合物(GaAs)、三元化合物(GaAlAs)和四元化合物(GaInAsP)等。激励方式有电注入、电子束激励、碰撞电离和光泵浦四种形式。半导体激光器件,可分为同质结、单异质结、双异质结等几种。同质结激光器和单异质结激光器室温时多为脉冲器件,而双异质结激光器可实现室温下连续工作。目前,PN 结电注入式半导体激光器是一种技术最为成熟、应用最广泛的器件。

半导体激光器结构如图 3-11 所示。用晶体的天然解理面(Cleaved Facets)构成法布里—珀罗腔,要使光在谐振腔里建立起稳定的振荡,必须满足一定的相位条件和阈值条件,相位条件使谐振腔内的前向和后向光波发生相干,阈值条件使腔内获得的光增益正好与腔内的损耗相抵消。谐振腔内存在着损耗,如镜面的反射损耗、工作物质的吸收和散射损耗等。只有谐振腔里的光增益和损耗值保持相等,并且谐振腔内的前向和后向光波发生相干时,才能在谐振腔的两个端面输出谱线很窄的相干光束。

半导体激光器的重要特性是可以通过注入电流直接调制激光器的发射功率。半导体激光器的光输出—电流特性($P-I$ 特性)如图 3-12 所示,它可以分为自发辐射和受激辐射两个阶段,其转折点所对应的电流值称为半导体激光器的阈值电流 I_{th} ,它表示半导体激光器产生激光输出所需的最小注入电流。当注入电流在阈值电流以下时,属于自发辐射阶段,输出光功率较小;当注入电流大于阈值电流以后,属于受激发射阶段,形成激光输出,输出光功率随注入电流的增大而急剧增加。正常工作条件下,半导体激光器的激光输出线性度好。

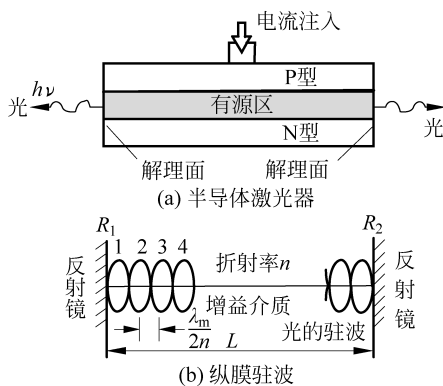


图 3-11 半导体激光器结构

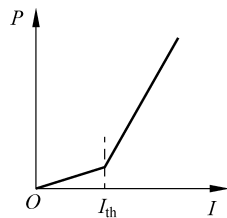


图 3-12 半导体激光的 $P-I$ 特性曲线

根据材料及结构的不同,目前半导体激光器的波长为 $0.33\sim 44\mu\text{m}$ 。半导体激光器具有体积小、质量轻、运转可靠、耗电少、效率高、寿命超过 $1.0\times 10^4\text{h}$ 等优点,因此广泛应用于光通信、光学测量、自动控制和光存储等领域,是最有前途的辐射源之一。

3.5
微课视频

3.5 发光二极管

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)是一种能发光的半导体电子元件,且具有二极管的电子特性。1907年首次发现半导体二极管在正向偏置的情况下发光的现象。后来人们专门制造出了用来发光的半导体二极管,并称其为发光二极管。发光二极管具有体积小、功率低、寿命长、高亮度、环保和坚固耐用的特点。近年来,发光二极管的发光效率、发光光谱及其功率等参数都有极大提高,用LED作为仪器设备的信号与照明光源节约能量,发光效率高,无对人体有害的辐射光谱,因此被誉为21世纪最新发展的环保型光源。除此之外,LED的集成器件发出的光由于具有多点阵列、多方向而使被测对象能够真实成像的特点,在工业检测技术与图形图像测量技术领域发挥着越来越重要的作用。

本节主要介绍发光二极管的基本工作原理与结构、特性参数、几种典型的发光二极管、发光二极管的驱动电路及主要内容。

3.5.1 发光二极管的原理与结构

1. LED 发光原理

LED是一种注入型电致发光器件,它由P型和N型半导体组合而成。发光机理可分为同质结注入发光与异质结注入发光两种类型。

1) 同质结注入发光

同质结注入电致发光(Injection electro-Luminescence)二极管,一般由直接带隙半导体材料制作而成,如GaAs,其内部电子—空穴对复合导致光子发射。因此,发射出的光子能量近似等于禁带能量差,即 $h\nu \approx E_g$ 。在没有外加电压的情况下,处于平衡状态的无偏压PN结能带图如图3-13(a)所示,其N区掺杂浓度大于P区。此时,PN结存在一定高度的势垒区,即 $\Delta E = eU_0$,式中 U_0 为内建电压。自由电子从浓度高的N区扩散到P区。然而,这种扩散被内建电场的势垒所限制。

当在PN结的两端加正向偏压时,PN结区的势垒从 U_0 降低至 $U_0 - U$,导致大量非平衡载流子从扩散区N区注入P区,其注入发光能带的结构如图3-13(b)所示。注入电子与P区向N区扩散的空穴不断地产生复合而发光,由于空穴的扩散速度远小于电子的扩散速度而使发光主要发生在P区。复合主要发生在势垒区和沿P区电子扩散长度的扩展区域,该复合区域通常称为活性区。这种由于少数载流子注入产生电子—空穴对复合而导致发光

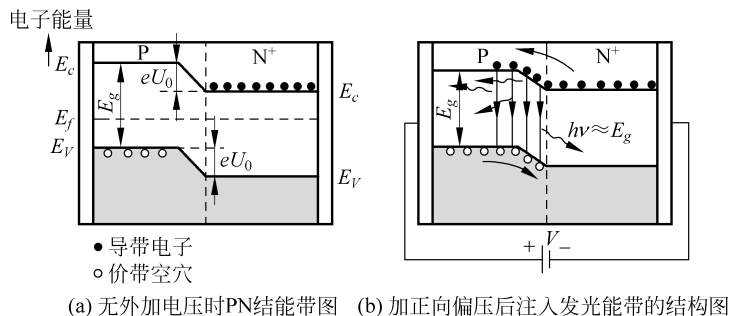


图 3-13 PN 结注入发光原理示意图

图 3-13
动态效果

的现象称为注入电致发光。由于电子—空穴对复合过程的统计属性,因此发射光子的方向是随机的,与受激发光相比,它们是自发发射过程。LED 的结构必须能防止发射出的光子被半导体材料重新吸收,即要求 P 区需充分窄,或者使用异质结构。

2) 异质结(Heterojunction)注入电致发光

同一材料不同掺杂浓度构成的 PN 结称为同质结,不同禁带宽度的半导体材料连接成的 PN 结称为异质结。具有不同禁带宽度材料的半导体器件称为异质结器件。半导体材料的折射率取决于其禁带宽度,能带隙越宽,折射率越低。换言之,借助构造异质结构的发光二极管,可以在器件中设计介质导波管引导光子从复合区域中发射出来。

同质结的发光二极管存在两个弊端。P 区需充分窄以便防止发射出的光子被半导体材料重新吸收。当 P 区很窄时,一些 P 区的注入电子扩散至表面,并通过表面附近的晶体缺陷进行复合。这种非辐射的复合过程减小了光输出。此外,因为电子扩散长度比较大,复合区域比较大,而重新吸收量随材料体积增加而增加,所以发射光子重新吸收的机会较高。

为了提高载流子注入效率,提高发射光强度,可以采用双异质结构。如图 3-14(a)所示为基于两个具有不同禁带宽度的不同半导体材料连接而成的双异质结构。其中,半导体材料 AlGaAs 的禁带宽度 $E_g \approx 2\text{eV}$, GaAs 的禁带宽度 $E_g \approx 1.4\text{eV}$ 。图 3-14(a)中为 N^+P 双异质结构,即 $\text{N}^+\text{-AlGaAs}$ 和 P-GaAs 间的异质结,在 P-GaAs 和 P-AlGaAs 间也存在异质结。GaAs 的 P 区很薄,通常在微米级,并且属于轻度掺杂。

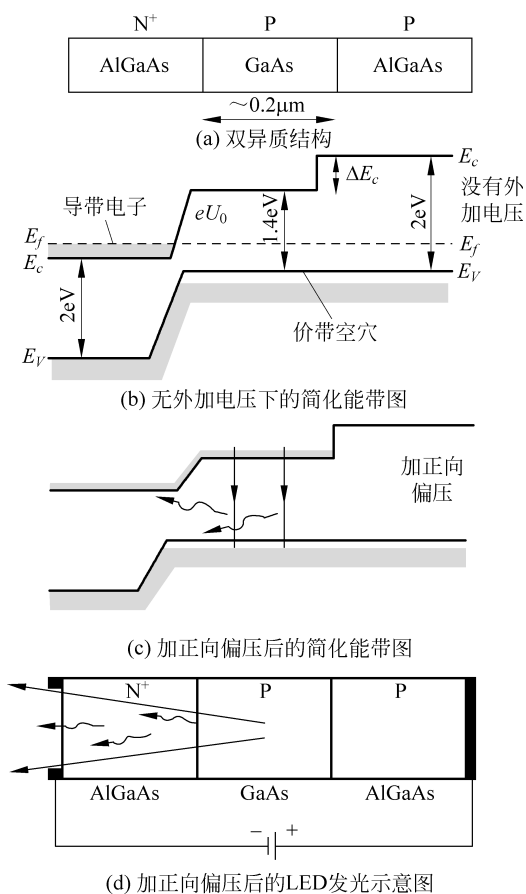


图 3-14 异质结注入发光原理示意图

在没有外加电压的情况下,结构的简化能带图如图 3-14(b)所示,整个结构中费米能级是连续的。对于导带电子来说,存在着阻碍其从 N^+ -AlGaAs 到 P-GaAs 扩散的势垒。在 P-GaAs 和 P-AlGaAs 的交接处存在带隙的变化,引起了阶跃,即 ΔE ,该阶跃构成了有效阻止 P-GaAs 导带的电子运动到 P-AlGaAs 导带区域的势垒。

当加上正向电压时,和普通 PN 结一样, N^+ -AlGaAs 和 P-GaAs 之间的大部分电压都下降,势垒也降低。这样, N^+ -AlGaAs 导带区的电子通过扩散注入 P-GaAs,如图 3-14(c)所示。然而,由于在 P-GaAs 和 P-AlGaAs 之间存在势垒 ΔE ,电子向 P-AlGaAs 导带的运动受到阻碍。因此,宽禁带 P-AlGaAs 作为封闭层限制注入 P-GaAs 层的电子。P-GaAs 层已经存在的注入电子—空穴对的复合引起自发光子发射。由于 AlGaAs 的禁带宽度比 GaAs 大,发射光子一旦逃离活性区就不会被重吸收,并可以到达器件表面,如图 3-14(d)所示。因为 P-AlGaAs 层没有吸收光,光反射出去进一步增强了发射光。AlGaAs/GaAs 异质结的另一个优点是,两晶体结构间只有一个小的晶格失配。这样,与传统同质结发光二极管结构在半导体表面由形变诱发的面缺陷(如位错)相比,该结构引起的缺陷可以忽略不计。与同质结构相比,双异质结构的发光二极管更有效。

2. 发光二极管结构

LED 的典型制作方法是:在基底 N^+ (如 GaAs 或者 GaP)上外延生长半导体层,如图 3-15(a)所示。这种类型的平面 PN 结,通过先 N^+ 层后 P 层外延生长而形成。基底本质上是一个 PN 结器件的机械支持,且可以是不同的材料。P 层是光发射的表面,为了使光子逃脱不被重新吸收,P 层一般很薄(通常只有几微米)。为了确保大多数的复合发生在 P 层,N 层需要重掺杂。向 N 层发射的光子,在基质界面要么被吸收,要么被反射回来,这取决于基底厚度及 LED 的确切结构。如图 3-15(a)所示,应用分段背电极(Segmented back electrode)将促使从半导体到空气中界面的反射。也可以在 N^+ 基底上外延生长 N^+ 层,然后通过掺杂扩散到外延 N^+ 层而形成 P 型层,从而构成扩散结平面发光二极管,如图 3-15(b)所示。



图 3-15
动态效果

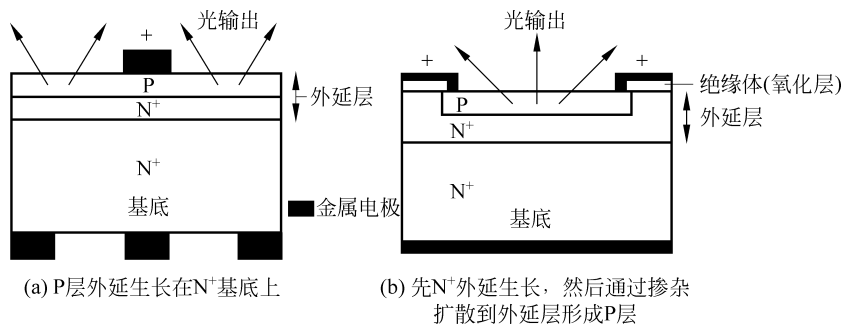


图 3-15 典型平面结型 LED 结构图

如果外延层和基底晶体具有不同的晶格参数,那么,两个晶体结构之间则存在晶格失配的现象。这将引起 LED 层的晶格应变进而导致晶体缺陷。晶体缺陷会促进电子空穴对非辐射的复合。也就是说,缺陷作为复合的中心。通过基底晶体与 LED 外延层的晶格匹配可以减少这种缺陷。因此,LED 层与基底晶体的晶格匹配是很重要的。例如,有一种 AlGaAs 合金是带隙在红色发射区域的直接带隙半导体,它与砷化镓基底有良好的晶格匹配,可以制

作高效率的 LED 器件。

图 3-15 所示是基于平面 PN 结的 LED 结构图。然而,由于内部全反射,并不是所有达到半导体空气界面的光线都可以发射出去。那些入射角大于临界角 θ_c 的光线将反射,如图 3-16(a)所示。例如,对于 GaAs 与空气交接面来说, θ_c 只有 16° ,那就意味着很多光线都遭受全反射。为此,半导体表面也可以制成一个圆顶或半球的形状,这样,光线以小于 θ_c 的角度照射到表面就可以避免全反射,如图 3-16(b)所示。然而,这种圆顶的 LED 制造起来比较困难,同时制作过程中也会增加相关的费用。因此,在实际应用中,常用比空气折射率高的透明塑料介质(如环氧树脂)封装半导体结,同时将 PN 结的一侧做成半球形表面,如图 3-16(c)所示。

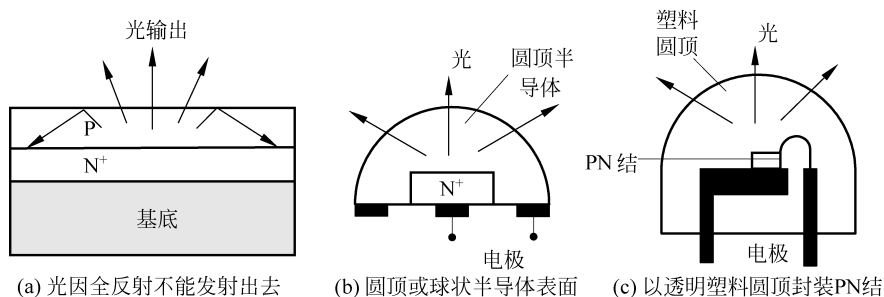


图 3-16 LED 结构示意图

3.5.2 发光二极管的基本特性参数

1. 发光光谱

LED 的发光光谱指 LED 发出光的相对强度(或能量)随波长(或频率)变化的分布曲线。它决定着发光二极管的发光颜色,并影响它的发光效率。发射光谱由材料的种类、性质及发光中心的结构所决定,而与器件的几何形状和封装方式无关。描述光谱分布的两个主要参量是它的峰值波长和发光强度的半宽度(Half Width)。

对于辐射跃迁所发射光子的波长满足如下关系:

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3-4)$$

LED 发出的光并非单一波长,无论什么材料制成 LED,LED 光谱分布曲线都有一个相对光强度最强处,与之相对应的波长为峰值波长,用 $\lambda_{\max}$ 表示。峰值两侧光强度为峰值光强度一半的两点间的宽度,称为谱线宽度(Spectrum Linewidth),也称为半功率宽度或一半高宽度,如图 3-17 所示。对于发光二极管,复合跃迁前、后的能量差大体就是材料的禁带宽度 E_g 。因此,发光二极管的峰值波长由材料的禁带宽度决定。图 3-18 绘出了几种由不同化合物半导体及掺杂制得的 LED 的光谱曲线。其中:曲线 1 是蓝色 InGaP/GaN LED,发光光谱峰 $\lambda_p = 460 \sim 465 \text{ nm}$;曲线 2 是绿色 GaP 的 LED,发光光谱峰 $\lambda_p = 550 \text{ nm}$;曲线 3 是红色 InGaPZn-O 的 LED,发光光谱峰 $\lambda_p = 680 \sim 700 \text{ nm}$;曲线 4 是使用 GaAs 材料的 LED,发光光谱峰 $\lambda_p = 910 \text{ nm}$ 。

对大多数半导体材料来讲,由于折射率较大,在发射光溢出半导体之前,可能在样品内已经过了多次反射。因为短波光比长波光更容易被吸收,所以与峰值波长相对应的光子能

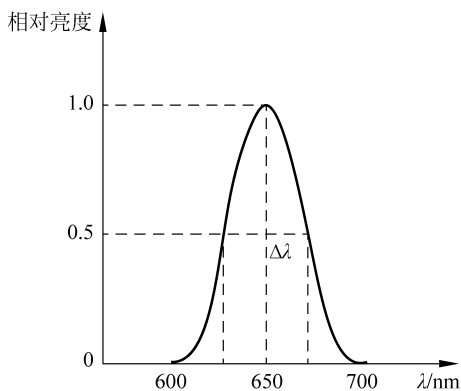


图 3-17 谱线宽度

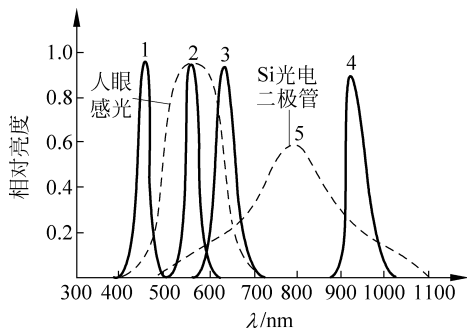


图 3-18 不同化合物半导体及掺杂制得的 LED 光谱曲线

量比禁带宽度所对应的光子能量小些。例如, GaAsP 发射的峰值波长所对应的光子能量为 1.1 eV, 比室温下的半导体材料的能量 E_g 小 0.3 eV。改变 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 中的 x 值, 峰值波长在 620~680 nm 变化。谱线半宽度为 20~30 nm。由此可知, LED 提供的是半宽度很大的单色光。由于峰值光子的能量随温度的上升而减小, 因此它所发射的峰波长随温度的上升而增长, 温度系数 (Temperature Coefficient, TC) 约为 0.2~0.3 nm/°C。

例题 1 LED 的发光波长为 870 nm, 谱线宽度对应的能量差值 $\Delta(h\nu) = 3kT$, 求输出光谱的线宽 $\Delta\lambda$ 为多少。

解 LED 发射波长 λ 与光子能量 E_p 的关系为

$$E_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_p}$$

两边求导, 有

$$d\lambda = -\frac{hc}{E_p^2} dE_p, \quad \frac{d\lambda}{dE_p} = -\frac{hc}{E_p^2}$$

即有

$$\Delta\lambda \approx \frac{hc}{E_p^2} \Delta E_p$$

由于 $\Delta E_p = \Delta(h\nu) = 3kT$, 则有

$$\Delta\lambda \approx \lambda^2 \frac{3kT}{hc}$$

因为

$$\lambda = 870 \text{ nm}$$

所以

$$\Delta\lambda = 47 \text{ nm}$$

这个线宽为典型值, 实际值与 LED 的结构有关。

2. 发光效率

发光效率是发光二极管发射的光通量与输入电功率之比, 单位为 lm/W。也有人把发光强度与注入电流之比称为发光效率, 单位为 cd/A (坎/安)。

发光效率由内部量子效率和外部量子效率决定。在平衡时, 电子—空穴对的激发率等

于非平衡载流子的复合率(包括辐射复合和无辐射复合),而复合率又分别决定于载流子寿命 τ_r 和 τ_{nr} ,其中辐射复合率与 $1/\tau_r$ 成正比,无辐射复合率为 $1/\tau_{nr}$,内部量子效率为

$$\eta_{in} = \frac{n_{eo}}{n_i} = \frac{1}{1 + \tau_r/\tau_{nr}} \quad (3-5)$$

式中: n_{eo} ——每秒发射出的光子数;

n_i ——每秒注入器件的电子数;

τ_r ——辐射复合的载流子寿命;

τ_{nr} ——无辐射复合的载流子寿命。

由式(3-5)可以看出,只有 $\tau_{nr} > \tau_r$,才能获得有效的光子发射。

对以间接复合为主的半导体材料,一般既存在发光中心,又存在其他复合中心。通过发光中心的复合产生辐射,通过其他复合中心的复合不产生辐射。因此,要使辐射复合占压倒式优势,必须使发光中心浓度远大于其他杂质浓度。

必须指出,辐射复合发光的光子并不是全部都能离开晶体向外发射的。光子通过半导体时一部分被吸收,一部分到达界面后因高折射率(折射系统的折射系数为 3~4)产生全反射而返回晶体内部后被吸收,只有一部分发射出去。因此定义外部量子效率为

$$\eta_{ex} = \frac{n_{ex}}{n_{in}} \quad (3-6)$$

式中: n_{ex} ——单位时间发射到外部的光子数;

n_{in} ——单位时间内注入器件的电子空穴对数。

提高外部量子效率的措施有三条:

(1) 用比空气折射率高且透明的物质如环氧树脂($n_2=1.55$)涂敷在发光二极管上。

(2) 把晶体表面加工成半球形。

(3) 用禁带较宽的晶体作为衬底,以减小晶体对光的吸收。

若用 $n=2.4\sim 2.6$ 的低熔点、热塑性大的玻璃做封帽,可使其效率提高 4~6 倍。

最早应用半导体 PN 结发光原理制成的 LED 光源问世于 20 世纪 60 年代初。当时所用的材料是 GaAsP,发红光($\lambda_p=650\text{nm}$),在驱动电流为 20mA 时,光通量只有千分之几个流明,相应的发光效率约为 0.1lm/W。70 年代中期,引入元素 In 和 N,使 LED 产生绿光($\lambda_p=555\text{nm}$)、黄光($\lambda_p=590\text{nm}$)和橙光($\lambda_p=610\text{nm}$),发光效率也提高到 1lm/W。到了 80 年代初,出现的峰值波长对应的光子能量为 1.1eV,比室温下的禁带宽度所对应的光子能量小的 LED 光源,使得红色 LED 的发光效率达到 10lm/W。90 年代初,发红光、黄光的 GaAlInP 和发绿光、蓝光的 GaInN 两种新材料的开发成功,使 LED 的发光效率得到大幅度的提高。在 2000 年,前者做成的 LED 在红、橙区($\lambda_p=615\text{nm}$)的发光效率达到 100lm/W,而后者制成的 LED 在绿色区域($\lambda_p=530\text{nm}$)的发光效率可以达到 50lm/W。

3. 响应时间

LED 的响应时间是标志反应速度的一个重要参数,尤其在脉冲驱动或电调制时显得非常重要。响应时间是指 LED 开始发光(上升)的时间和正向电流撤除时熄灭(衰减)的时间。LED 的上升时间随着电流的增大近似呈指数衰减。直接跃迁的材料如 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 的响应时间仅几纳秒,而间接跃迁材料 GaP 的响应时间则是 100ns。如用脉冲电流驱动二极管时,脉冲的间隔和占空比必须在器件响应时间所允许的范围内,否则 LED 发生的光脉冲将与输

入脉冲差异很大。

LED 的响应时间可分为点亮时间和熄灭时间,如图 3-19 中的 t_r 和 t_f 。其中的 t_0 值很小,可忽略,其中 I_F 表示正向工作电流。LED 的点亮时间 t_r (上升时间)是指接通电源使发光强度达到正常值的 10% 开始,一直到发光强度达到正常值的 90% 所经历的时间。而 LED 熄灭时间 t_f (下降时间)是指正常发光减弱至原来的 10% 所经历的时间。LED 可利用交流供电或脉冲供电获得调制光或脉冲光,调制频率可达到几十兆赫。采用这种直接调制技术使 LED 在相位测距仪、能见度仪及短距离通信中得到应用。

LED 的响应时间主要取决于载流子寿命、器件的结电容及电路阻抗。不同材料制得的 LED 响应时间各不相同,如 GaAs、GaAsP、GaAlAs 的响应时间小于 10^{-9} s, GaP 的响应时间为 10^{-7} s。

4. 温度特性

发光二极管的外部发光效率均随温度上升而下降。图 3-20 给出了某型号发光二极管的相对发光强度 I_v 与温度的关系曲线。

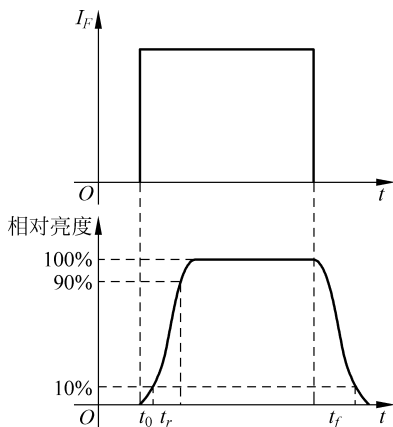


图 3-19 LED 响应时间特性图

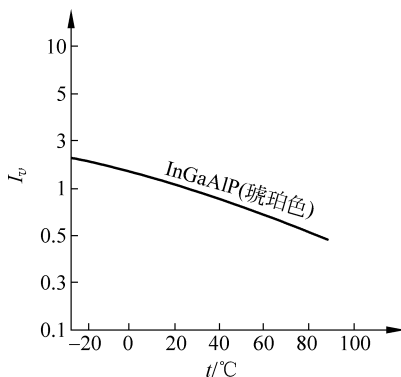


图 3-20 InGaAlP 发光二极管的相对发光强度与温度的曲线

LED 的光学参数与 PN 结结温有很大关系。一般工作在小电流 $I_F < 10\text{mA}$ 或 $10 \sim 20\text{mA}$ 长时间连续点亮 LED 时,LED 的温升不明显。若环境温度较高,LED 的峰值波长 λ_p 向长波长漂移,发光亮度也会下降,尤其是点阵、大显示屏的温升对 LED 的可靠性和稳定性有较大的影响。

照明用的灯具光源要求小型化和密集排列以提高单位面积上的光强度。设计时尤其应注意用散热好的灯具外壳或专门通风设备,确保 LED 长期稳定工作。

5. 发光亮度与电流关系

LED 在辐射发光发生在 P 区的情况下,发光亮度 L 与电子扩散电流 i_{dn} 之间有如下关系:

$$L \propto i_{dn} \frac{\tau}{\exp(\tau_r)} \quad (3-7)$$

式中: τ ——载流子辐射复合寿命 τ_r 和非辐射复合寿命 τ_{nr} 的函数。

图 3-21 所示为发光二极管的发光亮度与电流密度的关系曲线。这些 LED 的亮度与电流密度近似呈线性关系,且在很大范围内不易饱和。该特性使得 LED 可以作为亮度可调的

光源,且光源在亮度调整过程中发光光谱保持不变。当然,它也很适合于用做脉冲电流驱动,在脉冲工作状态下,LED 工作时间缩短,产生的发热量低,因此在平均电流与直流相等 的情况下,可以得到更高的亮度,而且长时间稳定度较高。

在低工作电流下,发光二极管发光效率随电流的增大而明显提高,但电流增大到一定值 时,发光效率不再提高而且还会随工作电流的继续增大而降低。针对普通小功率 LED ($0.04 \sim 0.08 \text{ W}$) 而言,电流多在 20 mA 左右,而且 LED 的光衰电流不能大于 $I_F/3$,大约为 15 mA 和 18 mA 。LED 的发光强度仅在一定范围内与 I_F 成正比,当 $I_F > 20 \text{ mA}$ 时,亮度的 增强已经无法用肉眼分出来。因此 LED 的工作电流一般选在 $17 \sim 19 \text{ mA}$ 左右比较合理。 随着技术的不断发展,大功率的 LED 也不断出现,如 0.5 W LED ($I_F = 150 \text{ mA}$)、 1 W LED ($I_F = 350 \text{ mA}$)、 3 W LED ($I_F = 750 \text{ mA}$) 等。

6. 伏安特性

伏安特性是表征 LED PN 结性能的主要参数,LED 的伏安特性具有非线性、单向导电 性,即外加正偏压表现为低电阻,反之为高电阻,如图 3-22 所示。

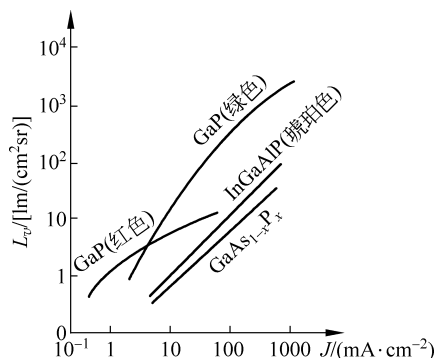


图 3-21 发光亮度与电流密度的关系曲线

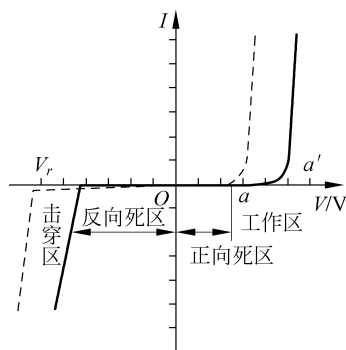


图 3-22 伏安特性曲线

(1) 正向死区(图 3-22 中的 Oa 段)。 a 点对应的 V_a 为阈值电压,当 $V < V_a$ 时,外加电 压尚未克服少数载流子扩散而形成势垒电场,此时电阻 R 很大。阈值电压对于不同 LED 其值不同, GaAs 为 1 V ,红色 GaAsP 为 1.2 V , GaP 为 1.8 V , GaN 为 2.5 V 。

(2) 正向工作区。工作电流 I_F 与外加电压呈指数关系,即

$$I_F = I_S (e^{qV_F/kT} - 1) \quad (3-8)$$

式中: I_S ——反向饱和电流。

LED 正向工作电压 V 为 $1.4 \sim 3 \text{ V}$ 。在环境温度升高时,正向工作电压 V 将下降。

在正向电压小于某一值(阈值)时,电流极小,不发光。当电压超过某一值后,正向电流 随电压迅速增加而使 LED 发光。

从 LED 的 $U-I$ 曲线看,LED 在正向导通后其正向电压的微小变动将引起 LED 电流的 很大变化。此外,环境温度和 LED 老化等因素也将影响 LED 的电气性能。因 LED 的光输 出直接与 LED 电流相关,所以在 LED 应用中,应控制驱动电路输入电压、环境温度等因素 的变化,否则,LED 的光输出将随输入电压和温度等因素变化而变化。若 LED 电流失控或 LED 长期工作在大电流下将影响 LED 的可靠性和寿命,甚至造成 LED 失效。

(3) 反向死区。 $V < 0$ 时 PN 结加反偏压,反向漏电流极小。 GaP LED 的反向漏电流

($V = -5\text{V}$) 为 0A , GaN LED 的反向漏电流 ($V = -5\text{V}$) 为 $10\mu\text{A}$ 。

(4) 反向击穿区。当反向偏压一直增加使 $V < -V_r$ 时, 则反向漏电流突然增加而出现击穿现象。 V_r 称为反向击穿电压, V_r 电压对应 I_r 为反向漏电流。由于所用化合物材料种类不同, 各种 LED 的反向击穿电压 V_r 也不同。

7. 寿命

LED 发光强度随着长时间工作而出现光强或光亮度衰减的现象称为老化, 器件老化程度与外加恒流源的大小有关, 可表示为

$$L_t = L_0 e^{-t/\tau} \quad (3-9)$$

式中: L_t —— t 时间后的亮度;

L_0 ——初始亮度。

通常把亮度降到 $L_t = L_0/2$ 所经历的时间 t 称为 LED 的寿命。测定 t 要花很长的时间, 通常以推算求得寿命。测量方法是用一定的恒流源驱动 LED, 点燃 $10^3 \sim 10^4\text{h}$ 后, 先后测得 L_0, L_t , 代入 $L_t = L_0 e^{-t/\tau}$ 求出 τ , 再根据寿命定义可求出寿命 t 。

LED 的寿命一般很长, 电流密度 J 小于 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 的情况下, 寿命可达 10^6h , 即可连续点燃一百多年, 这是任何光源均无法与它竞争的。LED 寿命为 10^6h , 是指单个 LED 在 $I_F = 20\text{mA}$ 下的情况。随着功率型 LED 的开发应用, 国外学者认为应该以 LED 的光衰减百分比数值作为其寿命的依据。如 LED 的光衰减为原来 35%, 寿命大于 6000h。

8. 光强分布

不同型号的 LED 发出的光在半球空间内具有不同的光强分布规律。通常用图 3-23 所示的光强空间分布曲线的形式来说明 LED 的光强分布规律。图 3-23(a) 所示为 LED 外形图, 在 xyz 直角坐标系中, z 为 LED 机械轴的方向, 它发出光的主方向可能不与机械轴重合, LED 的发光强度 I_v (或 I_e) 是角度变量 θ 的函数。

$$I_v = f(\theta) \quad (3-10)$$

显然, θ 一般取为 LED 器件的“机械角”。机械角的定义为器件几何尺寸的中心线或法线为其零度角。由于 LED 封装工艺问题使 LED 器件存在发出光强度最强的方向 (称为主光线) 与机械轴不重合的问题, 产生如图 3-23(b) 所示的偏差 $\Delta\theta$, 称其为偏差角或偏向角。描述 LED 发光的空间特性的另一个主要参数是半发光强度角, 常用 $\theta_{1/2}$ 表示, 它描述的是 LED 的发光范围。为获得更宽更均匀的面光源, 总希望 LED 的 $\theta_{1/2}$ 更大; 而要使 LED 能够在更远的地方获得更强的照度, 则希望 $\theta_{1/2}$ 要尽量小些, 使光的能量在传输过程中损耗更小。手册中常将半发光强度角称为视角。

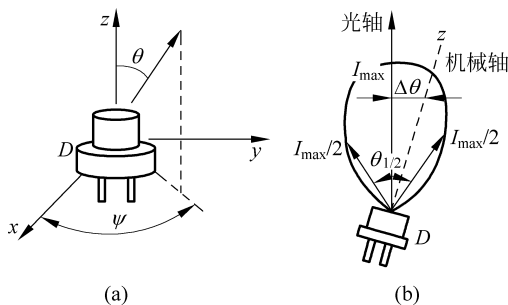


图 3-23 LED 外形图及发光强度的空间分布

3.5.3 几种常用发光二极管

1. 单色光 LED

最早使用 GaAsP 材料应用半导体 PN 结发光原理制成的 LED 光源是 20 世纪 60 年代初。当时只能发红光,到 70 年代中期,LED 发展到绿光、黄光和橙光。80 年代初,发光亮度大大增强。常用发光二极管的半导体材料与发光颜色如表 3-2 所示。

表 3-2 单色发光二极管材料与发光颜色

颜色	λ 波长/nm	正向偏压/V	半 导 体	化 学 式
红外线	>760	< 1.9	砷化镓、铝砷化镓	GaAs、AlGaAs
红	760~610	1.63~2.03	铝砷化镓、砷化镓磷化物、磷化铟镓铝、磷化镓(掺杂氧化锌)	AlGaAs、GaAsP、AlGaInP、GaP: ZnO
橙	610~590	2.03~2.10	砷化镓磷化物、磷化铟镓铝、磷化镓	GaAsP、AlGaInP、GaP
黄	590~570	2.10~2.18	砷化镓磷化物、磷化铟镓铝、磷化镓(掺杂氮)	GaAsP、AlGaInP、GaP: N
绿	570~500	2.18~4	铟氮化镓/氮化镓、磷化镓、磷化铟镓铝、铝磷化镓	InGaN/GaN、GaP、AlGaInP、AlGaP
蓝	500~450	2.48~3.7	硒化锌、铟氮化镓、碳化硅、硅	ZnSe、InGaN、SiC、Si
紫	450~380	2.76~4	铟氮化镓	InGaN
紫外线	<380	3.1~4.4	碳(钻石)、氮化铝、铝镓氮化物、氮化铝镓铟	C(diamond)、AlN、AlGaN、AlGaInN

2. 复合光 LED

1996 年白光 LED 出现,1998 年正式推向市场,标志了复合光白光 LED 的运用,也将 LED 照明的发展推到崭新的起点。在工艺结构上,白光 LED 通常采用两种方式:第一种是利用“蓝光技术”与荧光粉配合形成白光;第二种是多种单色光混合方法。

现在所用的照明光源,白炽灯和卤钨灯发光效率为 12~24lm/W,荧光灯和 HID 灯的发光效率为 50~120lm/W。而白光 LED 在 2000 年时发光效率已达 25 lm/W,这一指标与卤钨灯相近。2009 年日本 Nichia 公司实验室发表了发光效率为 249lm/W 的发光二极管,2012 年美国科锐(Gree)推出了 254lm/W 的发光二极管。目前,德国 Hella 公司利用白光 LED 开发了飞机阅读灯,澳大利亚首都堪培拉的一条街道已用了白光 LED 作路灯照明,我国的城市交通管理灯也正用白光 LED 取代早期的交通秩序指示灯。目前,白光 LED 正逐步进入家庭取代现有的照明灯。

3. 超高亮度 LED

随着科学技术的发展及半导体工艺的进步,LED 的发光强度(即亮度)越来越高,过去发光强度到几百 mcd(毫坎德拉)已称为超高亮度,后来提高到上千 mcd,如今有些 LED 已经提高到上万 mcd 了。各种超高亮度的发光二极管已经出现在市场上,且得到了广泛的应用。

例如,Vishay 公司开发的 TLC580 系列超高亮度 LED,它有红光、黄光、绿光及蓝光四种颜色,直径为 $\phi 5$,透明树脂封装。TLC580 系列具有透明无漫射的透镜,利用超高亮发光材料 AlInGaP(四元素材料)及 InGaN(三元素材料)技术达到非常高的发光强度,很小的视

角,工作温度可提高到 100°C ,耐静电放电压为 2kV (AlInGaP)、 1kV (InGaN),无铅封装等特点。主要应用于室内或室外发光体,如交通信号灯、标志牌、汽车高置刹车灯、仪器或电器设备面板的指示灯等。

3.5.4 发光二极管驱动电路

发光二极管工作需要加正向偏置电压,以提供驱动电流。典型的驱动电路如图 3-24 所示,将 LED 接到晶体三极管的集电极,通过调节电阻 R_{b2} 的阻值改变三极管的基极偏置电压,使流过电阻 R_e (或 LED) 的电流得到调整,从而使 LED 可以发出所期望的辐射光功率。它在光通信和利用 LED 显示信号的强弱应用中非常普遍。实际上电阻 R_{b1} 与 R_{b2} 为 LED 供电电路提供了直流偏置,电阻 R_i 与电容 C_i 为阻容输入电路,信号 U_i 通过阻容输入电路使 LED 在直流偏置的基础上进行调制,即 LED 发出的光功率被电信号 U_i 调制。

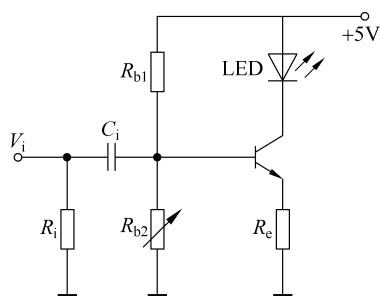


图 3-24 LED 驱动电路

LED 驱动电路很多,目前主要使用专用集成 LED 驱动器,应用非常方便。图 3-25 所示为 MAX1576 电荷泵驱动白光 LED 的电路。MAX1576 电荷泵可驱动多达 8 个白光 LED,具有恒定电流调节功能,以实现统一的光强,能够以 30mA 的电流驱动每组 LED,多用于背光照明。闪光灯组 LED 是单独控制的,并能够以 100mA 电流驱动每个 LED(总共 400mA)。通过使用自适应 $1\times$ 、 $1.5\times$ 、 $2\times$ 模式电荷泵和超低压差的电流调节器,MAX1576 能够在一节锂离子电池的整个电压范围内实现高效率。MAX1576 使用两个外部电阻设置主 LED 和闪光灯 LED 的最大(100%)电流。ENM1 和 ENM2 引脚可将主 LED 的电流设置为最大电流的 10%、30% 或 100%。ENF1 和 ENF2 引脚可将闪光灯 LED 的电流设置为最大电流的 20%、40% 或 100%。另外,将每一对控制引脚连接到一起可实现单线、串行脉冲亮度控制。

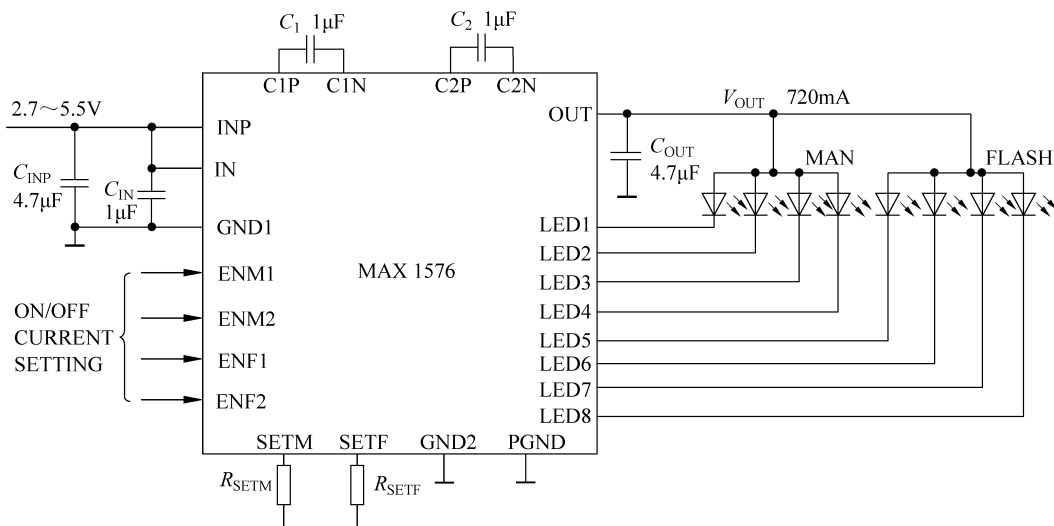


图 3-25 MAX 1576 电荷泵驱动白光 LED 的电路

3.5.5 发光二极管的应用

(1) 背光源方面应用。近年来,移动电话、电子手杖、手提电脑渐渐使用 LED 作背光。此外,LED 日益用作 LCD 计算机屏幕及 LCD 电视机的背光,相比之前的冷阴极荧光灯,省却了高压电源,除大幅降低了电磁干扰外,还减少了使用电池作电源的产品上的功率损耗,且其工作寿命长,颜色的稳定性也好得多。有些高档产品使用三原色 LED 构成的白色 LED 作背光,有更广的色域,动态控制 LED 的光度大大增加 LCD 显示器的对比度。

(2) 显示方面应用。LED 所需驱动电压及功率低,能方便地由工作电压低的微处理器控制及在以电池作电源的设备上使用,所以常被用在消费性电子产品上,如手提嵌入式电子设备,家庭电器、玩具、各种仪器等作为工作状态显示灯,在机场、机舱、火车站、巴士站、码头等各种公共交通工具上作为平板显示器以显示如班次、目的地、时间等相关信息以及公路的信息。此外,大型的 LED 显示器已普及于户外户内,异型 LED 显示应用技术近年发展迅速,业内涌现出了“慢态 LED 显示屏”“立体 LED 视频柱”“LED 彩砖”“LED 幕帘显示屏”“LED 透光显示屏”等一系列新产品,大大拓展了 LED 显示应用范围,正在为丰富我们的文化娱乐生活、大众传媒和产品宣传服务。

(3) 交通及资料传输方面应用。LED 常用作汽车转向与刹车灯,因 LED 开关速度极高,亮起时间比白炽灯快 0.5s 之多。LED 可用作紧急服务车辆的闪光警标,因为在车辆行驶环境中震荡、温差变化下,LED 仍然有稳定的亮度及可靠性,且高速闪动的特性简化了以往产生闪动效果的机械结构。LED 可用作交通灯,因其寿命较长,减少了坏灯影响交通的概率。现在有些车辆开始使用白色 LED 用作车头灯,因其光线的方向控制比白炽灯加抛物线反射镜好。此外,LED 可用于资料、信号传送及感知,因开关速度快,有利于资料快速传输及减少延迟,且驱动简单。

(4) 照明方面应用。因 LED 光源具有发光效率高、耗电量少、使用寿命长、安全可靠性强、光色丰富、便于调节、有利于环保等特性,近几年来在地铁和隧道等特殊照明环境、商业及室内照明以及舞台显示和城市灯光环境中得到了广泛的应用,目前已广泛应用于数码幻彩、护栏照明、广场照明、庭院照明、投光照明、水下照明系统。白色 LED 坚固耐用的特性使其被广泛应用于小型手电筒。后备紧急照明系统采用 LED 可降低耗电量。移动电话采用白光 LED 作为闪光灯、手电筒或棚灯使用。

(5) 红外线 LED 方面应用。因 LED 轻巧、省电、价廉、可靠耐用,广泛应用在电子电器产品的红外线遥控器中。常用作红外线光源,配合 CCD 用作保安用的夜视镜头。另外,在医疗器具、空间光通信、红外照明、固体激光器的泵浦源、高速路的自动刷卡系统、摄像头(视频拍摄)数位摄影、监控、楼宇对讲、防盗报警、红外防水、磁盘驱动器、计算机鼠标和传感器元件等领域也有广泛的应用。

此外,LED 还可用作短距离光纤通信。例如在影音产品的数码音乐光纤传送系统中,LED 用作数码化的音讯发送;用作光电耦合元件光源部分,应用在交换式电源供应器以及医疗仪器上;用作窄波段光学传感器,如最近提出了双向发光二极管阵列,并应用在触控面板上的接触传感。



参考答案

思考题与习题

- 3.1 普通白炽灯降压使用有什么好处？灯的功率、光通量、发光效率和色温有何变化？
- 3.2 如图 3-1 所示，具有线状光谱或带状光谱特征的光源，能否用色温来描述？为什么？
- 3.3 试比较卤钨灯、超高压短弧氙灯、氙灯和超高压汞灯的发光性能。在普通紫外—可见光光度计(200~800nm)中，应怎样选择照明光源？
- 3.4 简述激光器的基本结构、工作原理及其激光的特点。
- 3.5 简述半导体激光器和发光二极管在结构和特性上的异同点。
- 3.6 为什么说发光二极管的发光区在 PN 结的 P 区？这与电子、空穴的迁移率有关吗？
- 3.7 发光二极管的发光光谱由哪些因素决定？
- 3.8 温度为 300K 时，GaAs 发光二极管的带隙为 1.42eV，与温度的关系为 $dE_g/dT = -4.5 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ 。如果温度改变 10℃，发射波长变化为多少？
- 3.9 查阅资料简述发光二极管的应用。
- 3.10 查阅发光二极管专用集成驱动芯片，阅读技术手册写出主要特性参数。