

发光二极管的伏安特性

发光二极管(light emitting diode, 简称 LED)是半导体二极管的一种,其核心也是PN结,由III-IV族化合物组成,如GaAs, GaP, GaAsP等。当给发光二极管加上正向电压后,从P区注入到N区的空穴和由N区注入到P区的电子,在PN结附近数微米内,分别与N区的电子和P区的空穴复合,产生自发辐射的荧光。不同的半导体材料中电子和空穴所处的能量状态不同,当电子和空穴复合时释放出的能量也不同,释放的能量越大,则发出的光子波长就越短。

LED这种电致发光器件最早在1962年出现,早期只能发出低光度的红光,随着技术进步,已遍及可见光、红外线及紫外线并能达到相当的光度。LED具有功耗低、体积小、寿命长(可达数万小时以上)、驱动电压低、响应速度快等特点,已经被广泛地应用于照明、平板显示、医疗器件等领域。

实验目的

1. 了解发光二极管的工作原理,学习正确使用发光二极管;
2. 测量发光二极管的正向伏安特性,研究正向导通电压和发光波长的关系;
3. 了解光电二极管的检测原理,研究影响光电检测性能的参数。

实验原理

1. 发光二极管的原理

半导体是一种电导率介于导体与绝缘体之间的物质,区别于导体通过电子导电的原理,半导体是通过电子和空穴实现导电的。根据半导体内不同种类载流子(电子和空穴)的浓度差异,可以将半导体分为P型半导体和N型半导体,其中P型半导体内空穴浓度远大于电子浓度;反之则为N型半导体。如果半导体材料中一部分是P型,一部分是N型,如图1所示,则这两部分区域的交界处由于电子和空穴的相互扩散而形成的空间电荷区(耗尽层)称为PN结,空间电荷区的内电场阻止了载流子继续扩散,从而达到平衡状态。

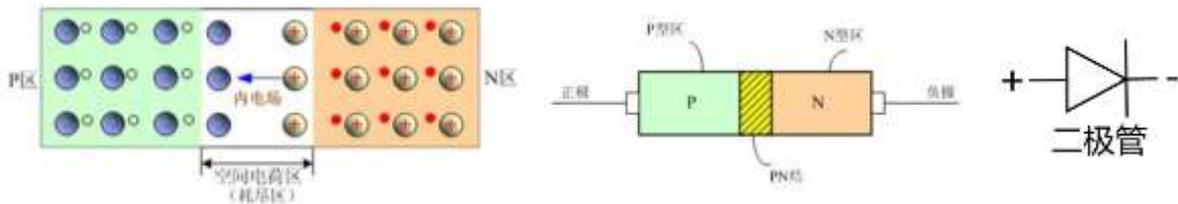


图1 平衡态下的PN结

给PN结加正向电压(P区接电源正极,N区接电源负极),在PN结内建立和内电场方向相反的外加电场。足够大的外加电场可以消除内电场的阻力,载流子可以继续运动,从而PN结导通形成电流。而外加反向电压则相当于内建电场的阻力变得更大,PN结不能导通,仅有极微弱的反向电流(由少数载流子的漂移运动形成,因少子数量有限,电流饱和)。这就是PN结的单向导通特性,半导体二极管正是基于PN结的单向导通原理工作的,发光二极管也是半导体二极管中的一种。

发光二极管是一种注入式电致发光器件,当给发光二极管加上正向电压后,空穴由P区注入N区,电子由N区注入P区,产生电子和空穴的复合,并将多余的能量以光的形式释放出来,从而把电能直接转化为光能。通常一个自由电子复合一个空穴时会产生一个光子,不同的半导体材料内部结构不同,能级不同,复合产生光子的频率也不同,而频率决定了光的颜色,所以不同的半导体材料能产生不同颜色的光。制作发光二极管的半导体材料很多,通常有磷砷化镓二极管(红光),磷化

镓二极管（绿光），铟氮化镓（蓝色）等。

2. 发光二极管的正向伏安特性曲线

根据半导体物理学可知，PN 结的正向电流和正向电压之间的关系满足：

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式(1)中 I 是通过 PN 结的正向电流， U 为 PN 结两端的正向电压， I_0 是反向饱和电流（温度恒定时为常数）， e 是电子电量， k_B 是玻尔兹曼常数， T 是热力学温度， η 是修正系数，和 PN 结的材料有关。

由于在常温(300K)时，指数项 $\exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right)$ 远大于 1，因此式(1)可以近似为

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{\eta k_B T}\right) \quad (2)$$

由式(2)可知，PN 结的正向电流随正向电压按指数规律变化。

工程中常将式(2)的指数关系简化为线性模型，如图 2 所示，即正向电压小于 U_0 时，PN 结的正向电流近似为零；正向电压大于 U_0 时，正向电流和正向电压满足以下线性关系

$$U = U_0 + IR \quad (3)$$

式(3)中 U_0 称为 PN 结的正向导通电压， R 为 PN 结的正向电阻。

通过正向伏安特性曲线，可知发光二极管有如下特性参数：

(1) 正向导通电压 U_0 当电压超过 U_0 后，正向电流随正向电压迅速增加。制作发光二极管的材料不同，正向导通电压 U_0 也不同。

(2) 最大正向电流 I_{\max} 发光二极管允许通过的最大正向电流一般在 5~20 mA，超过此值发光管将会损坏，但也有的管子 I_{\max} 可以达到 50 mA 甚至更大。

(3) 正向工作电压 U 正向工作电压大于正向导通电压 U_0 ，一般在 1.4~4 V（其中 4V 通常在 $I=20$ mA 时测得）。若正向电压小于这个范围，则电流极小，二极管不发光(或发光很弱)。随着环境温度升高，正向工作电压将下降。

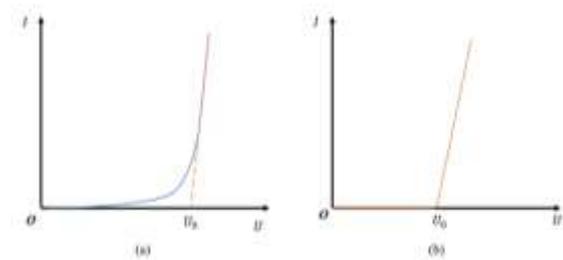


图 1 PN 结的正向伏安特性曲线
(a)指数型；(b)简化线性模型

3. 发光二极管的光谱特性

光源发出的光，通常是由多种波长的光组成的，如太阳光和白炽灯。可见光的波长为 380~780 nm，超出此范围为不可见的紫外光和红外光。发光二极管所发之光也并非单一波长，其波长具有正态分布的特点，在最大光谱能量处的波长称为峰值波长。光谱辐射带宽是指光谱辐射功率大于等于最大值一半的波长间隔，它表示发光管的光谱纯度。比如 GaN 基发光二极管的光谱射带宽在 25 至 30nm 范围。

发光二极管的电子与空穴复合时，电子跃迁至较低的能级，并辐射光子（一般二极管无法产生这种辐射跃迁，而是将这部分能量转化为热能），光子的能量为电子跃迁前后的能级差 ΔE 。用 eU_0 来估算电子跃迁前后的能级差 ΔE ，则发光二极管发出的光子波长为

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{eU_0} \quad (4)$$

式(4)中, c 是光速, ν 是光子频率, h 是普朗克常数 ($4.13 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$)。

表 1 实验使用的发光二极管参数

参数	红光	绿光	黄光	蓝光	红外
波段/nm	620-625	565-570	590-595	463-466	850
亮度/mcd	300-500	50-80	300-500	200-300	/
工作电压/V	2.0-2.2	2.0	1.8-2.0	3.0-3.2	1.3-1.6
电流/mA	15-20	15-20	5-20	5-20	20-30

不同材料制成的发光二极管, 其正向导通电压 U_0 不同, 因此发光波长不同。即使同样是红色发光管, 由于制作管子的材料和掺杂组分不同, 其发光情况也会有所不同。随着发光二极管结温的上升, 发光波长将向长波方向漂移。发光二极管的发光波长与器件的几何形状、封装方式并无关系。

4. 发光二极管的检测

(1) 万用表 在正式使用发光二极管之前, 采用数字万用表检测二极管是否正常工作。

万用表的设置为: 量程开关置于二极管专用 \rightarrow 档, 黑色接线插入“COM”插座, 红色接线插入 V/Ω 插座。万用表的红表接线接二极管正极, 黑表接线接二极管负极 (即二极管正接), 此时二极管发光, 电表显示的读数为二极管正向导通电压 U_0 的近似值; 当二极管反接时则显示过量程“1”。当输入端未接入时, 即开路时, 电表也显示过量程“1”。要注意的是, 万用表二极管专用量程档的输出正向电流约 1mA (电压约 2V), 检测时不发光, 或者没有读数, 不一定是管子坏了, 可能是发光条件没有得到满足, 需要采用其它方法作进一步检测。

(2) 外接电源测量发光二极管的正向伏安特性

图 3 所示电路可以进一步检测发光二极管的正向伏安特性, 这也是发光管的基本应用电路。电源电压 U 可调, 电阻 R 限流保护发光管, 通过 U_R 读数即可监测通过发光二极管的电流 I 。

检测过程中应密切注意观察电表示数 U_R 和 U_{LED} , 判断发光管是否正常工作, 不可盲目调高电源电压。

调节电源电压 U , 使得二极管的电流 I (即 U_R/R) 在 0-20mA 之间变化, 记录数据并做 $U_{LED}-I$ 图, 即可获得二极管的正向伏安特性。

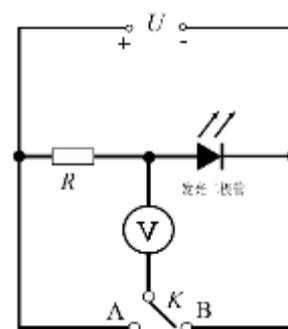


图 3 伏安特性测量电路

(3) 用光电二极管检测

光电二极管的结构与一般二极管相似, 管子封装在透明玻璃外壳中, 它的 PN 结装在管顶, 便于接受光的照射。光辐射到 PN 结时, 入射光子流与电子相互作用, 产生电子-空穴对, 也称为非平衡载流子或光生载流子, 其产生率与光强有关。在不加外偏压即零偏压时, PN 结产生开路电压, 此现象称为光伏效应, 这也是光电池的工作原理。

光电二极管在加反向偏压下, 没有光照时, 反向电阻很大, 反向电流很小 (一般为纳安数量级), 光电二极管处于截止状态; 受光照时, PN 结仍然有光伏效应, 光生电流的方向与反向电流一致, 光电二极管处于导通状态, 这也称为光电二极管的光导工作模式。光生电流与照射光功率成正比, 照

射光功率越大,产生的电子-空穴对越多,光生电流也就越大,与外加电压几乎无关。

照射光的变化引起光电流的变化,也就是把光信号转换成电信号,因此光电二极管也是一种光电传感器件。光电二极管作为光电检测元件,由于其光电线性好,响应快,在微弱、快速光信号探测方面有着非常重要的作用。

本实验采用的红外对管,包括红外发射管(发光二极管)和红外接收管(光电二极管),来实现对发光二极管的检测,红外发射和接受过程中,几乎不受室内可见光的影响。图4所示电路中, K打至电键 B端,电源负极和电键 A端用导线连接,则发光二极管处于正向导通红外发射状态,光电二极管处于反向偏压光导检测状态,并且电流表读数显示光电流。注意电源电压不能超过光电二极管的反向击穿电压。

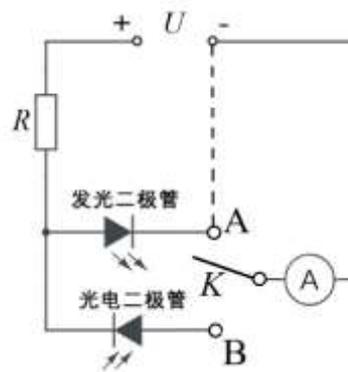


图4 红外对管的发射和接受电路

实验前应回答的问题(本实验报告不需要写实验原理,只需回答下列问题)

1. 简述发光二极管的工作原理。写出PN结的正向电流和正向电压的关系。
2. 发光二极管的主要特性参数有哪些?怎样保证发光二极管的使用安全?
3. 画出发光二极管正向伏安特性的测量电路。怎样完成伏安特性测量?怎样合理记录数据?
4. 怎样由伏安特性曲线获得发光二极管的正向导通电压?写出正向导通电压和发光波长的关系。
5. 简述光电二极管的检测原理。影响光电检测性能的参数有哪些?

实验仪器

发光二极管,红外发射管,红外接收管,稳压直流电源,万用电表,电阻箱,面包板,开关,导线等

实验内容

一、检查发光二极管

1. 使用数字万用电表检测发光二极管(红、黄、蓝)是否正常工作,判断管子的正负极。
2. 记录发光二极管能发光时候的万用表读数,即为发光二极管正向导通电压的近似值。

二、测量发光二极管(红、黄、蓝)的正向伏安特性

1. 按照图3连接电路,电源输出设为零,限流电阻 $R=1000\ \Omega$,万用表置于电压档(内阻为 $10M$ 置),**电键打开,待老师检查后继续。**
2. 将电键打到电阻端,观察电阻($1000\ \Omega$)的两端电压读数,即为通过发光二极管的电流大小(单位毫安)。缓慢增加电源输出,观察二极管电流的变化情况,二极管发光强度随电流的变化情况。

注意,通过二极管的电流不能超过 $20mA$,即电阻电压读数不能超过 $20V$ 。

3. 根据二极管电流的变化情况,设计合理的伏安特性测量方案,记录15-20组左右电源输出电压、电阻电压和二极管电压,完成二极管的正向伏安特性测量。
4. 用Origin软件处理伏安特性测量数据,画出发光二极管的正向伏安特性曲线($I-U$ 图),从图中获

得正向导通电压值，并检验其与波长的关系。

5. 进一步将二极管的电流对数后和电压拟合作图 ($\ln I-U$ 图)，并对拟合结果做分析。

6. 比较三种颜色发光二极管的正向伏安特性曲线，并做简单分析。

三、红外对管的发射和接受

1. 按照图 4 连接电路，**虚线先不要连接**，电源输出设为零，电阻 $R=150\ \Omega$ ，万用表置于直流电流 200mA 档。**电键打开，待老师检查后继续。**

2. 电键打到 A 端，缓慢增加电源输出 (**不超过 5 伏**)，观察红外发射管的电流变化，当电流达到 20mA 时停止增加电源输出。

3. 将电键打到 B 端，观察并记录红外接收管的反向暗电流。

4. 用导线**连接图 4 中的虚线**，即电源负极和电键 A 端相连，此时发射管和接收管均处于工作状态。

5. 发射管置于桌面不动，移动接收管至十分靠近发射管，并改变接收管的方位和方向，观察光电流的变化，寻找发射管的**最佳发射方向和发射角度范围**，接收管的**最佳接受方向和接受角度范围**。

6. 将接收管贴近发射管并能**最佳接受光照**，沿着发射管的**最佳发射方向**，移动接收管逐渐远离发射管，记录光电流随距离的变化情况并做分析（记录 5-6 组左右数据）。

参考文献

1. 赵凯华 罗蔚茵. 新概念物理教程--量子物理(第 2 版)[M]. 高等教育出版社, 2008.

2. 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学.第 4 版[M]. 国防工业出版社, 2010.

3. 胡静.光电二极管的工作原理及应用特性分析[J].技术研发.2016,9(1):52-54

4. 祁玲敏等.基于 PN 结的正向伏安特性测量玻尔兹曼常量的研究[J].大学物理.2019,38(8):39-42

5. 刘京津等. 基于 P N 结的 I-V 特性精确获得物理参量[J].物理实验.2017,37(12):10-13