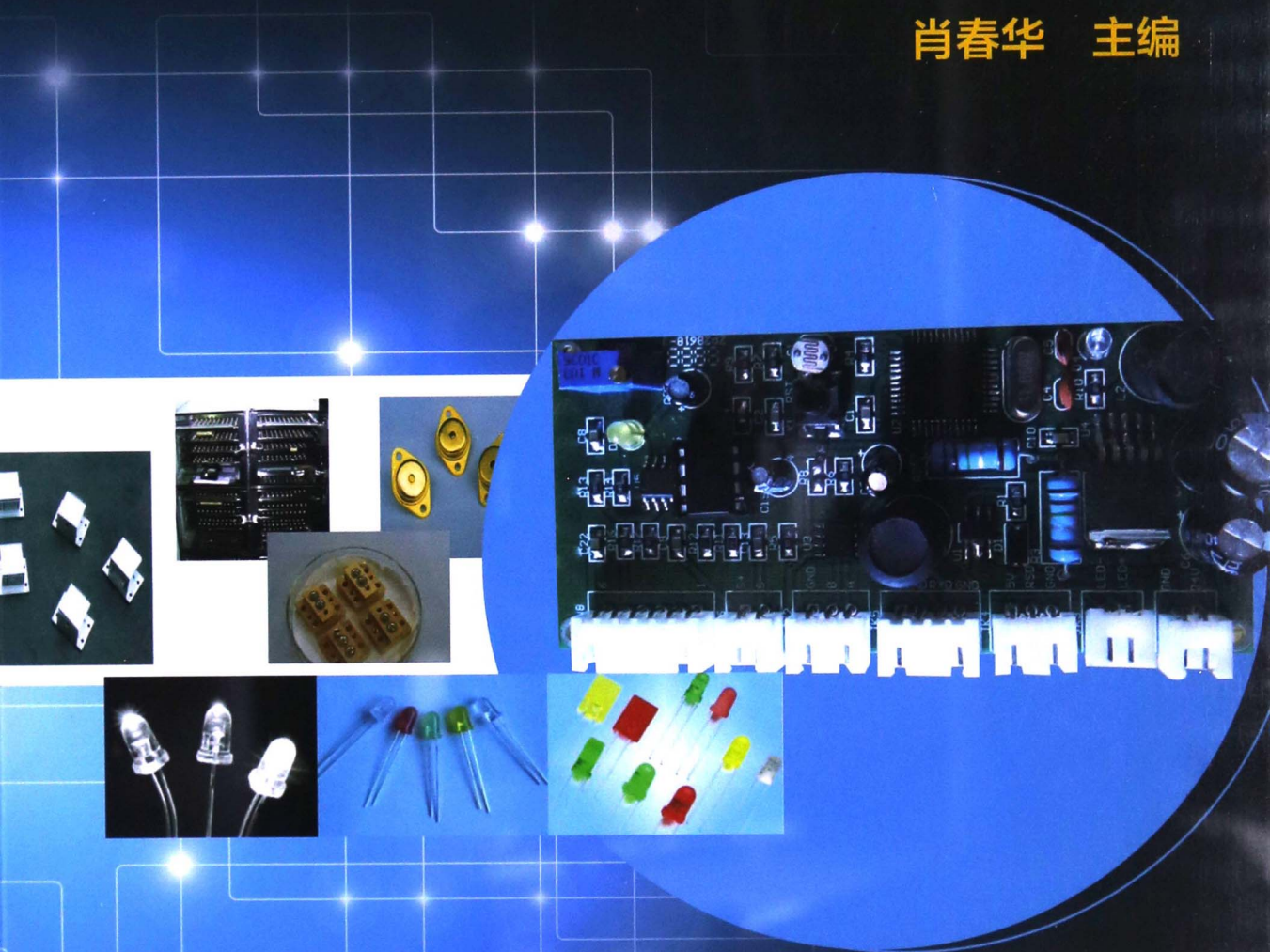


◆ 高职高专 “十二五” 规划教材 ◆

GUANGDIAN CHANPIN
DIANLU SHEJI

光电产品电路设计

肖春华 主编



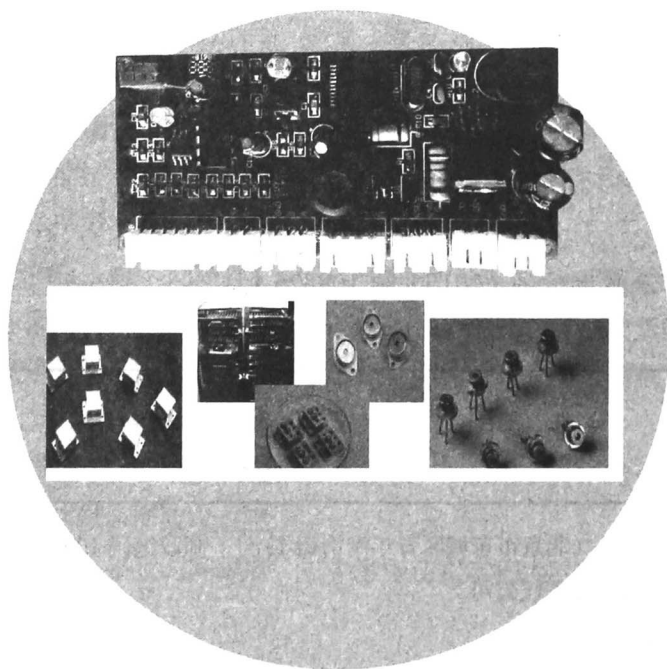
化学工业出版社

◆ 高职高专“十二五”规划教材 ◆

光电产品电路设计

肖春华 主编

刘新灵 赵鑫 何琼 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分三篇，第一篇介绍光的辐射本质及其单位、热辐射光源和气体放电光源以及激光相关特性；第二篇讲述常用光电原件、半导体激光器、常用光敏元件以及常用无源光器件；第三篇主要围绕光电产品应用控制系统领域进行任务设计，使用目前主流的单片机作为控制系统的核心，以 C51 编程技术进行软件开发，围绕射频通信技术、485 总线通信技术、GSM 通信技术、PWM 进行 LED 灯具调光技术、液晶显示技术等通信领域常用技术进行系统开发，内容来源于实际产品的设计制作，无论是器件的选型，还是电路的设计以及程序的编写都反映了工程上的实际需求，融入了现代企业的新技术、新工艺、新的管理模式。

本书适合于高职高专院校光、电类相关专业的实践教学，也可作为课程设计、毕业设计和单片机接口技术课程的辅导教材。

图书在版编目（CIP）数据

光电产品电路设计 / 肖春华主编. —北京：化学工业出版社，2015.7
高职高专“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-24061-3

I. ①光… II. ①肖… III. ①光电器件-电路设计-教材 IV. ①TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 108525 号

责任编辑：李彦玲	文字编辑：余纪军
责任校对：边 涛	装帧设计：韩 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司
装 订：三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 11¼ 字数 295 千字 2015 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：26.00 元	版权所有 违者必究
-------------	-----------



光电子技术是 21 世纪的尖端科技，光电子产业是 21 世纪的朝阳产业。近年来，我国光电子产业规模飞速发展，市场潜力巨大，市场对光电子方向的人才需求也日益旺盛，尤其是对既有基础理论，又有实践技能的高素质综合性人才需求较大。本书正是为了满足高职高专院校光电子专业人才培养需要而编写的。

本书为“单片机原理与应用”以及“C 语言程序设计”后续应用技术课程，以项目为引领，以国内使用广泛的单片机为主要载体进行光电产品应用系统项目设计，将目前常用、典型的各类外围接口电路和通信技术与单片机串接起来，介绍了系统的软、硬件设计，使学生树立光电产品应用系统开发的概念，培养光电产品应用系统设计与开发的能力。

本书在编写过程中兼顾了高职人才培养模式及课程改革形势的需要，简化了理论，突出强调应用，旨在培养学生的自主学习能力、创新能力与团队协作能力。

本书内容分为三篇，每一篇中由若干个任务构成，由“任务目标”“任务描述”“知识链接”“任务实施”“任务检查与评价”与“思考与练习”六段式组成，将知识化整为零，降低了学习难度。由浅入深，由易到难，强调“教学做”一体，注重对学生职业能力的培养。在第三篇中，采用了企业普遍使用的 C51 编程语言进行光电产品应用系统设计，同时本教材引入了 C51 模块化编程技术，这是现代企业工程师进行软件开发时所必须掌握和经常使用的编程技术，从而使本书更加贴近职业岗位的能力需求。

本书由肖春华担任主编，刘新灵、赵鑫、何琼担任副主编，龚东军参编。具体编写是，赵鑫负责第一篇的编写工作，刘新灵负责第二篇的编写工作，何琼负责第三篇任务一的编写工作，肖春华负责第三篇任务二、任务三以及任务四的编写工作，龚东军负责图片的整理和文字的校对工作。全书由肖春华统稿。

在教材的编写过程中，参阅了大量论著及文献，并引用了其中的一些资料，在此不一一详尽注明，且向相关文献作者致以谢意。

限于笔者的经验、水平及时间限制，书中难免在文字和内容上存在不足之处，敬请批评指正。

编者

2015 年 1 月

第一篇 光源技术基础

任务一 学习光的辐射

1

任务目标	1
任务描述	1
知识链接	1
一、光的辐射本质	1
二、光度量及单位	3
三、热辐射光源和气体辐射光源	5
任务实施	5
任务检查与评价	6
【思考与练习】	6

任务二 了解激光光源

7

任务目标	7
任务描述	7
一、任务内容	7
二、实施条件	7
三、安全提示	7
知识链接	7
一、激光的特性	7
二、激光的产生	7
三、激光器的种类	10
任务实施	11
任务检查与评价	11
【思考与练习】	12

第二篇 常用光电器件

任务一 认识常用光电元件

13

任务目标	13
任务描述	13
一、任务内容	13

二、实施条件	13
三、安全提示	13
知识链接	13
一、可见光发光二极管	13
二、光电二极管	17
三、光电三极管	19
四、光电池	23
任务实施	28
任务检查与评价	28
【思考与练习】	29

任务二 认识半导体激光器

30

任务目标	30
任务描述	30
一、任务内容	30
二、实施条件	30
三、安全提示	30
知识链接	30
一、半导体激光器概述	30
二、半导体激光器的工作原理	31
三、半导体激光器的特性	33
四、半导体激光器的应用	33
五、半导体激光器损坏原因和预防措施	34
任务实施	35
任务检查与评价	35
【思考与练习】	36

任务三 认识常用光敏元件

37

任务目标	37
任务描述	37
一、任务内容	37
二、实施条件	37
三、安全提示	37
知识链接	37
一、光敏电阻	37
二、光敏电阻典型应用电路	39
三、光敏电阻的检测方法	40
任务实施	40
任务检查与评价	40
【思考与练习】	41

任务四 认识常用无源光器件

42

任务目标	42
任务描述	42
一、任务内容	42
二、实施条件	42
三、安全提示	42
知识链接	42
一、光纤连接器	42
二、光衰减器	46
三、光隔离器	47
四、光耦合器	48
五、光开关	50
六、光波分复用器	50
任务实施	52
任务检查与评价	52
【思考与练习】	53

第三篇 光电产品应用设计

任务一 使用 C51 编程控制 LED 发光二极管

54

任务目标	54
任务描述	54
一、任务内容	54
二、实施条件	54
三、安全提示	54
知识链接	55
一、C51 程序设计技术	55
二、C51 的数据类型	56
三、C51 的运算符与表达式	60
四、C51 流程控制语句	63
五、C51 的数组	65
六、指针	68
七、C51 的函数	73
任务实施	77
任务检查与评价	79
【思考与练习】	80

任务二 设计学生寝室用电管理系统

81

任务目标	81
任务描述	81

一、任务内容	81
二、实施条件	81
三、安全提示	81
知识链接	81
一、单片机应用系统开发概述	81
二、RF905 射频技术	83
任务实施	93
任务检查与评价	115
【思考与练习】	116

任务三 设计光伏发电太阳能路灯系统 117

任务目标	117
任务描述	117
一、任务内容	117
二、实施条件	117
三、安全提示	117
知识链接	117
一、模块化编程技术	117
二、太阳能电池板简介	123
三、太阳能蓄电池简介	126
四、太阳能路灯系统简介	128
任务实施	130
任务检查与评价	142
【思考与练习】	142

任务四 设计室内 LED 节能控制系统 143

任务目标	143
任务描述	143
一、任务内容	143
二、实施条件	143
三、安全提示	144
知识链接	144
一、GPRS 通信技术	144
二、485 总线通信技术	157
任务实施	159
任务检查与评价	170
【思考与练习】	171

参考文献 172

第一篇 光源技术基础

光电仪器离不开光电传感器，而光电传感器是以光为媒介来测量各种物理量。本篇主要介绍光的本质以及新型光源——激光。

任务一 学习光的辐射

任务目标

- 认知光的波动性和粒子性
- 掌握光能量的转换
- 掌握光度量单位
- 了解辐射光源

任务描述

1. 任务内容

通过工程光学实验，了解光的基本知识，掌握光的本质。

2. 实施条件

校内工程光学实验室，各种光学实验平台。

3. 安全提示

严格按照操作说明和使用流程来使用设备，防止因为操作不当损坏仪器或产生安全事故。

知识链接

一、光的辐射本质

光是一种电磁波，光和其他形式的电磁辐射一样，在真空都是以速度约 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 传播的。可见光的频率约为每秒几百万亿次振荡，因此用波长来说明光的类型比用频率更方便些。频率 ν 和波长 λ 之积等于光速 c ，即

$$c = \nu \lambda \quad (1-1-1)$$

人眼可见的光谱范围在 $380 \sim 760 \text{ nm}$ 之间，如图 1-1-1 所示。 $1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-9} \text{ m}$ 。波长较短的在 $380 \sim 420 \text{ nm}$ 的可见光，人的视觉感到它是紫色的，波长再长些的如 $780 \sim 1060 \text{ nm}$ ，这一段是人眼看不到的红外线，或称为红外辐射。

人视觉中的“色觉”实际上只是可见光谱中波长不同的光被人感觉到不同的光色。因而，不同的光色或颜色的本质，只是光的波长有所不同而已。由单一波长组成的光称为单色光。

实际上，严格的单色光几乎是不存在。所有的自然光源（如太阳、月亮），或人工光源所发出的光，其光谱都具有较宽广的频谱，只是在不同的波段，它的辐射能量不同而已。只有激光光源发出的光谱才窄得接近于单色光谱。

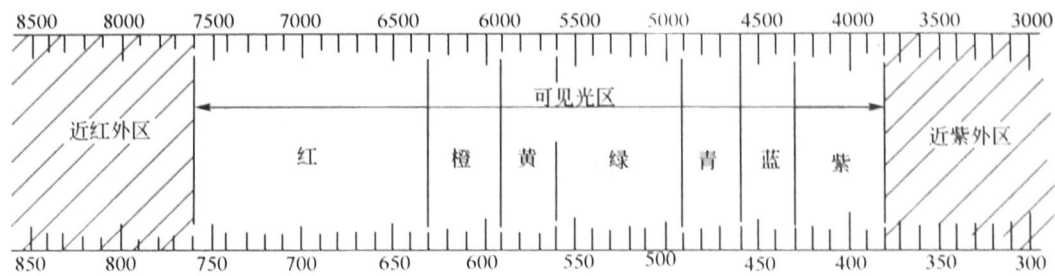


图 1-1-1 可见光谱（单位：nm）

认识了光是电磁波，并不意味着对光本质认识的结束。经过不断实践，特别是从光和物体的相互作用中，人们又提出了对光本质深入认识的新学说即“光的粒子说”。人们认为，光是一粒一粒的粒子流。这些粒子都具有一定的速度和能量。这些光粒子叫作光量子，简称光子。光的粒子说能够解释一些光的波动说不能解释的物理现象，而光的波动说也能解释光的粒子说不能解释的一些物理现象。因此光既具有粒子性，还同时具有波动性质。

光子可视为很小的能量“细胞”。单个光子的能量 E 由下式给出。

$$E = h\nu \tag{1-1-2}$$

式中 h ——普朗克常数；

ν ——光的频率。

$h=6.62 \times 10^{-27}$ 尔格·秒或 6.62×10^{-84} 焦耳·秒或 4.13×10^{-15} 电子伏·秒。因为 h 很小，故单个光子的能量是相当小的。

由图 1-1-1 看出，绿光的波长比紫光、蓝光长，根据式 (1-1-1)，它的频率比紫光、蓝光小。再根据式 (1-1-2) 可知绿光光子的能量比紫光、蓝光光子的小。根据同样道理可知，紫外辐射光子的能量比任何一种可见光光子的能量都大，而红外辐射光子的能量则比任何一种可见光光子的小。Y 射线和 X 射线光子的能量比紫外光子的更大，以致可用适当的核子探测器单个地计数。

光是能量的一种形态。光辐射也像其他能量可以互相转换一样，变为热能、电能、化学能等。

1. 热效应

光产生热效应最明显的就是红外线，这已为大家熟知。大功率照明装置工作时产生大量的传导热和红外线，红外线被周围物体和空气吸收变成热能。

2. 光电效应

光电效应是在某些一定波长的光照下发射电子或物质中电子的迁移，如光电管、硅光电池。光电效应器件最重要的用途之一，就是在现代测光仪器中作为光信号转换为电信号的主要传感元件。

3. 光化学效应

光的化学效应就是物质吸收光能产生化学或物理反应。对于人类的生存来说，最重要的就是植物叶绿素的光合作用。其他，如胶片的感光、各种涂料的表面光致固化也是重要的应用。

4. 光的传播特性

光致发光是某些物质在一定光的照射下，发出另一波长光的现象。这一效应在某些电光

源中应用较多，如荧光灯中荧光粉受到汞放电发出的 253.7nm 紫外线照射后发出可见光。

二、光度量及单位

光源与照明技术中，为了对光进行定量测量和研究，规定了一系列光的量和单位。由于人眼的视觉不仅与光的能量大小有关，还与光的波长有关，所以必须采用以光产生的视觉强度为基础的物理量。

我们把以视觉效果作为评价光辐射的理论称为光度学。光度学的计量单位称光度量。

1. 光通量

光源辐射的能量包括紫外、可见、红外能量。不同的光源，光谱能量分布也不同。由于人眼对各种不同波长的视觉灵敏度不同，故不能直接用光源的辐射能量（W）来衡量光能的大小，而用人眼对光的相对感觉量为基准，这个量就称光通量。光通量是光辐射通量对人眼所引起的视觉强度值，单位是流明，符号 lm。但在国际单位制中，光度学的基本单位是坎德拉，流明是导出单位。

$$\Phi = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

(1-1-3)

式中 K_m ——辐射度量与光度量之间的比例系数；

$V(\lambda)$ ——人眼的光谱光视效率（其中 λ 为波长）。对波长小于 380nm 和波长大于 780nm 的不可见光， $V(\lambda)=0$ 。

流明的定义是，具有均匀光强度 1 坎德拉（cd）的均匀发光点光源，它发出的总光通量就是 $4 \pi \text{ lm}$ 。表 1-1-1 列出了几种常见光源的额定光通量。

表 1-1-1 常见光源的额定光通量

类型和功率/W	光通量/lm	类型和功率/W	光通量/lm
普通白炽灯 15	110	直管形荧光灯（日光色）15	560
普通白炽灯 25	220	直管形荧光灯（日光色）20	960
普通白炽灯 100	1250	直管形荧光灯（日光色）400	2400
高压汞灯（外镇流）400	20000	金属卤化物灯（铊钠）	36000
高压汞灯 400	44200		

2. 发光效率

发光效率简称光效。光效就是灯每消耗 1W 电能所发出的光通量，即总称光通量与光功率之比，单位是流明/瓦（lm/W）。表 1-1-2 为常见光源的光效。

理论计算表明，1W 能量如果全部转变为视见函数最高的 555nm 波长时的光，光效可达 680lm/W。

表 1-1-2 光源的光效

光源类型	光效数值/(lm/W)	光源类型	光效数值/(lm/W)
真空普通灯泡的光效	7~8	荧光高压汞灯泡的光效	40~60
充气普通灯泡的光效	10~13	超高压氙灯泡的光效	30~35
高色温卤钨灯泡的光效	26~28	高压钠灯泡的光效	90~120
日光色荧光灯泡的光效	40~65	金属卤化物灯泡的光效	70~100
三基色荧光灯泡的光效	60~85		

3. 光强度

光通量是说明光源向各方向上发出的光的总量。但是，不同光源的光通量在空间各方向的分布也不是各向均匀的。有的方向亮些，有的方向暗些。亮的方向上光通量密度大，暗的

方向上光通量密度小。因而，照明设计时只知道光源的总光通量是不够的，还必须了解光通量在空间的分布状况。

表示光通量在空间密度的量称发光强度 I ，简称光强。光源在某一方向的光强度就是该方向单位立体角内的光通量值。光强度的单位是坎德拉，符号 (cd)。若一个均匀发光体在 1 球面度 (sr) 的立体角内均匀发射 1 lm 的光通量，在该方向的光强度就是 1cd。由于发光强度是光源在给定方向上单位立体角内辐射的光通量，所以如果光源在给定方向上的发光强度为 1cd，则光源在该方向上 1sr 的立体角内辐射的光通量为 1 lm。因此

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \tag{1-1-4}$$

光源在各方向的光通分布情况，如用坐标表示，便是该光源的光强分布曲线。光源装入某种灯具后，它的光通量分布也随之变化，用坐标表示便是该灯具的光强分布曲线。

4. 光照度

光照度 E 是指被光照射的平面上，单位面积所接收的光通量数值，即某一平面，被光照亮的程度。照度的单位是勒克斯 (lx)。1 lx 等于 1lm 均匀分布在 $1m^2$ 的表面上所产生的照度。1lx 照度很低，仅能大致分辨周围物体。表 1-1-3 列出日常情况下的照度值。

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \tag{1-1-5}$$

表 1-1-3 常见情况下照度

光 照 情 况	照度/lx	光 照 情 况	照度/lx
夏日阳光直射下	100000	40W 普通白炽灯下 (lm)	30
白天室外 (无直射阳光)	1000	一般阅读时	300~500
白天室内	100~500	工作场合下	50~500
40W 荧光灯下	300	夜晚满月地面上	0.2

照度是各类照明应用的主要参量之一。如彩色电视演播，照度为 1500~1600lx 较为适当，低于此值可看出可见的图像，但细节较差；高于此值是不必要的浪费。

5. 发光亮度

有些光源的发光表面很亮 (如白炽灯丝)，有的表面亮度较低 (如荧光灯表面)。所以，发光亮度就是表征光源发光表面明亮程度的量。亮度高低还与该发光表面在与视线垂直方向上的投影面积大小有关。如果光强不变，发光面投影面积越小，亮度越高，发光面投影面积越大，则亮度越低。亮度的单位为坎/平方米 (cd/m^2)。其定义是光源表面一点处的面元在给定方向上发光强度除以该面元在垂直于给定方向的平面上的正投影面积。表 1-1-4 为常见发光体的亮度。光源发光体的表面亮度主要与光学设计有关。一般来说，光强一定时，发光体越小亮度越高，较接近点光源，对光学系统的设计有利，可以使光学系统有较高的效率。

$$L = \frac{dI}{dA \cos \theta} \tag{1-1-6}$$

式中， θ 为给定方向与面元法线间的夹角。

表 1-1-4 常见的发光体的亮度

光 源	亮度/(cd/m ²)	光 源	亮度/(cd/m ²)
太阳表面	1.47×10^9	阳光直射下的白色表面	30000
充气白炽灯灯丝	4.5×10^6	阳光直射下的白色表面	30001



三、热辐射光源和气体辐射光源

1. 热辐射光源

热辐射光源是指当电流通过并加热安装在填充气体泡壳内的灯丝,其发光光谱类似于黑体辐射的一类光源。

(1) 白炽灯,以往生活常用灯,主要结构由泡壳、灯丝、灯头和内充气体组成。优点是维护、更换、安装工作简单容易,无需辅助电器配件,方便调光,初期成本低。缺点是光效较差,平均寿命较短,远程高照度困难。

(2) 玻璃反射灯,采用先进聚光技术,使用压制玻璃一体成型,属高光强的光源。可做成均匀的宽/窄光束,寿命比白炽灯长,可达 2000h,特殊的外形使得安装拆卸都很容易。

(3) 卤素灯,是在白炽灯内填充了卤化物,泡壳使用石英玻璃,光效提高到 25lm/W。克服了白炽灯的黑化、光效低、寿命短的缺点,显色性非常好,可达到 100Ra,广泛运用于商业展示、体育场等。

2. 气体辐射光源

电流通过封装在管内的气体或金属蒸气等离子时而发光,可分为低压气体放电灯和高压气体放电灯两大类。和白炽灯比高强度气体放电灯的发光效率更高,但同时需要控制附件。

(1) 荧光灯,属于一种低压汞蒸气放电灯。一种线性光源,非方向性。形状可以直管型,也可以弯管、环型。

(2) 紧凑型荧光灯,俗称节能灯,具有高光效、节能效果明显、寿命长、体积小、使用方便等优点。显色指数较高,82 左右,色温有 2700K、3000K、3500K、4100K 和 5000K。形式多样,有 H 形、U 形、双 H 形。

(3) 低压钠灯,是由 U 形放电管中惰性气体和低压钠蒸气(1 帕)放电产生 589nm 的黄色谱线,是一种单色光源,显色指数不存在。是目前光源中发光效率最高的光源,可达到 200lm/W,平均寿命 18000h 左右。单色黄光,色温在 1800K 左右,只能用于颜色分辨要求不高的场合。另一个特点是透雾能力强。

(4) 高压钠灯,是由钠蒸气放电产生发光现象,和低压钠灯相比,高压钠灯工作时所需的温度和压力都很高,显色指数稍有所提高,标准型在 20~30 左右。一般来讲高功率的高压钠灯比低功率有很好的光效。光效 150lm/W,寿命在 16000~20000h。

(5) 汞灯,光效不高,寿命长,显色性较差,呈现的颜色外观为冷蓝白色光。

自镇流高压汞灯,结合了白炽灯的连续光谱和高压汞灯光谱的特点,具有高光通和良好的显色性能。

(6) 金属卤化物灯,简称金卤灯,是气体放电灯中广泛使用的一类光源。在汞蒸气放电管中加入金属卤化物,放电时除了高压汞蒸气谱线外,还能产生其他各种颜色的光谱,其外观的光色呈白色。改善了光的显色性和光效。色温在 2900~5200K,适用于颜色要求较高的场所。

(7) 霓虹灯,是一种冷阴极辉光放电管,其辐射光谱具有极强的穿透大气的的能力,色彩鲜艳、光效优于普通白炽灯,寿命可达 20000~30000h。其亮、美、动的特点普遍运用于户外广告中。

任务实施

步骤一 在工程光学实验室做光的干涉和衍射实验。



步骤二 在光电检测实验室做光电效应实验。

任务检查与评价

任务完成后，检测一下完成效果。测评细则见表 1-1-5。

表 1-1-5 任务完成情况的测评细则

一级指标	比例	二级指标	比例	得分
信息收集与自主学习	40%	1. 光信息的收集和整理	30%	
		2. 明确学习任务	10%	
光的认知	50%	1. 光的干涉实验	15%	
		2. 光的衍射实验	15%	
		3. 光电效应实验	20%	
职业素养与职业规范	10%	1. 操作规范性	6%	
		2. 分工协作情况	4%	
总计	100%			

【思考与练习】

1. 简述光的波动性和粒子性。
2. 简述光度量的单位。
3. 简述光的几种效应。

任务二 了解激光光源

任务目标

- 认知激光的特性
- 掌握激光产生原理
- 了解激光器的结构
- 了解激光器的种类

任务描述

一、任务内容

通过激光打标机和激光焊接机，学习激光的基本知识。

二、实施条件

校内激光加工实训室。

三、安全提示

严格按照操作说明和使用流程来使用设备，防止因为操作不当损坏仪器或产生安全事故。

知识链接

一、激光的特性

1. 方向性好

激光器发出的光是较好的平行光，传播过程中可以较好的保持平行，不发生散射。利用激光的这一特性，人类从地球表面向月球表面发射激光，成功接收到了被月球面反射回的激光，利用光速和测出的激光从发出到接受经历的时间，计算出了月球与地球的距离。

2. 亮度极高

激光的能量极高，如果将激光束利用特殊“透镜”聚焦到一点上，这一点的能量极高，可以熔化物质。利用激光的这一特性，加工行业中可以用激光进行切割、焊接、打孔，医学上可以利用激光切除病灶或杀死病变组织。

3. 单色性好

激光的颜色纯，可以获得特定颜色的单色光，作为光学研究中的单色光，也可制作广告牌、装饰舞台等。

4. 相干性好

光是电磁波，具有波的一切特性，比如两列频率相等、振动方向相同、相位一致的光波相遇，会发生干涉现象。由于激光的单色性好，容易获得满足干涉条件的两列光波。

二、激光的产生

1. 光辐射量子理论基础

物质是由原子组成，而原子又是由原子核及电子构成。电子围绕着原子核运动。而电子在原子中的能量不是任意的。描述微观世界的量子力学告诉我们，这些电子会处于一些固定的“能级”，不同的能级对应于不同的电子能量，离原子核越远的轨道能量越高。此外，不同

轨道可最多容纳的电子数目也不同，如最低的轨道（也是最近原子核的轨道）最多只可容纳 2 个电子，较高的轨道上则可容纳 8 个电子等。

电子可以通过吸收或释放能量从一个能级跃迁到另一个能级。例如当电子吸收了一个光子时，它便可能从一个较低的能级跃迁至一个较高的能级。同样地，一个位于高能级的电子也会通过发射一个光子而跃迁至较低的能级。在这些过程中，电子释放或吸收的光子能量总是与这两能级的能量差相等。由于光子能量决定了光的波长，因此，吸收或释放的光具有固定的颜色。

（1）自发辐射 如图 1-2-1 所示，高能级的电子在没有外界作用下自发地迁移至低能级，并在跃迁时产生光（电磁波）辐射，辐射光子能量为两个能级之间的能量差，即

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1-2-1)$$

这种辐射的特点是每一个电子的跃迁是自发的、独立进行的，其过程全无外界的影响，彼此之间也没有关系。因此它们发出的光子的状态是各不相同的。这样的光相干性差，方向散乱。



图 1-2-1 自发辐射

（2）受激吸收 如图 1-2-2 所示，受激吸收就是处于低能态的原子吸收外界辐射而跃迁到高能态。电子可通过吸收光子从低能级跃迁到高能级。普通常见光源的发光（如电灯、火焰、太阳等的发光）都是由于物质在受到外来能量（如光能、电能、热能等）作用时，原子中的电子吸收外来能量而从低能级跃迁到高能级，即原子被激发。激发的过程是一个“受激吸收”过程。

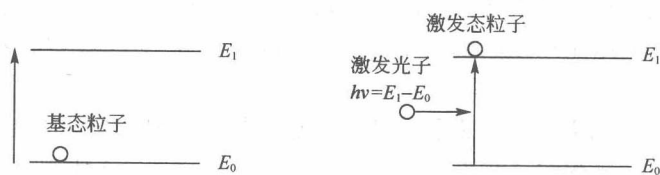


图 1-2-2 受激吸收

（3）受激辐射 如图 1-2-3 所示，受激辐射是指处于高能级的电子在光子的“刺激”或者“感应”下，跃迁到低能级，并辐射出一个和入射光子同样频率的光子。受激辐射的最大特点是由受激辐射产生的光子与引起受激辐射的原来的光子具有完全相同的状态。它们具有相同的频率和相位、相同的方向，完全无法区分出两者的差异。这样，通过一次受激辐射，一个光子变为两个相同的光子。这意味着光被加强了，或者说光被放大了。这正是产生激光的基本过程。入射光子与释放的光子有相同的波长，此波长对应于两个能级的能量差。

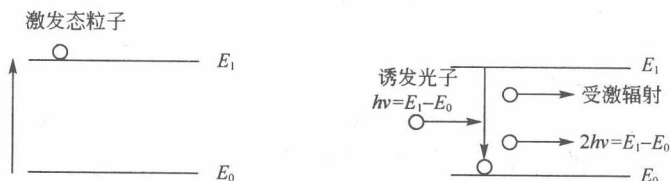


图 1-2-3 受激辐射

原子吸收外来的光子后，是表现为受激吸收还是受激辐射呢？在一个原子体系中，总有些原子处于高能级，有些处于低能级。而自发辐射产生的光子既可以去刺激高能级的原子使它产生受激辐射，也可能被低能级的原子吸收而造成受激吸收。因此，在光和原子体系的相互作用中，自发辐射、受激辐射和受激吸收总是同时存在的。如果想获得越来越强的光，也就是说产生越来越多的光子，就必须使受激辐射产生的光子多于受激吸收所吸收的光子。怎样才能做到这一点呢？我们知道，光子对于高低能级的原子是一视同仁的。在光子作用下，高能级原子产生受激辐射的机会和低能级的原子产生受激吸收的机会是相同的。这样，是否能得到光的放大就取决于高、低能级的原子数量之比。若位于高能态的原子远远多于位于低能态的原子，我们就得到被高度放大的光。但是，在通常热平衡的原子体系中，原子数目按能级的分布服从玻尔兹曼分布规律。因此，位于高能级的原子数总是少于低能级的原子数。在这种情况下，为了得到光的放大，必须到非热平衡的体系中去寻找。

(4) 粒子数反转 一个诱发光子不仅能引起受激辐射，而且它也能引起受激吸收，所以只有当处在高能级的原子数目比处在低能级的还多时，受激辐射才能超过受激吸收，而占优势。由此可见，为使光源发射激光，而不是发出普通光的关键是发光原子处在高能级的数目比低能级上的多，这种情况，称为粒子数反转。但在热平衡条件下，原子几乎都处于最低能级（基态）。因此，如何从技术上实现粒子数反转则是产生激光的必要条件。那么如何才能达到粒子数反转状态呢？这需要利用激活媒质。所谓激活媒质（也称为放大媒质或放大介质），就是可以使某两个能级间呈现粒子数反转的物质。它可以是气体，也可以是固体或液体。用二能级的系统来做激活媒质实现粒子数反转是不可能的。要想获得粒子数反转，必须使用多能级系统。

(5) 波尔兹曼分布规律 在通常热平衡条件下，处于高能级 E_2 上的原子数密度 N_2 ，远比处于低能级的原子数密度低，这是因为处于能级 E 的原子数密度 N 的大小会随能级 E 的增加而指数减小，即

$$N \propto \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)$$

(1-2-2)

这就是著名的波尔兹曼分布规律。在上、下两个能级上的原子数密度比为：

$$\frac{N_2}{N_1} \propto \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right)$$

(1-2-3)

式中， K 为波尔兹曼常量， T 为热力学温度。因为 $E_2 > E_1$ ，所以 $N_2 < N_1$ 。例如，已知氢原子基态能量为 $E_1 = -13.6\text{eV}$ ，第一激发态能量为 $E_2 = -3.4\text{eV}$ ，在 20°C 时， $KT \approx 0.025\text{eV}$ ，则 $N_2/N_1 \propto \exp(-400) \approx 0$ 可见，在 20°C 时，全部氢原子几乎都处于基态，要使原子发光，必须外界提供能量使原子到达激发态，所以普通广义的发光是包含了受激吸收和自发辐射两个过程。一般说来，这种光源所辐射光的能量是不强的，加上向四面八方发射，更使能量分散了。

2. 激光产生过程

以红宝石激光器为例如图 1-2-4 所示，原子首先吸收外部注入的能量，跃迁至受激态 (E_3)。原子处于受激态的时间非常短，大约为 10^{-9}s 后，它便会落到一个称为亚稳态 (E_2) 的中间状态。原子在亚稳态的时间很长，大约是 10^{-3}s 或更长的时间。原子长时间停留在亚稳态，导致在亚稳态的原子数目多于在基态的原子数目，此时的状态称为粒子数反转。其产生的结果就导致使通过

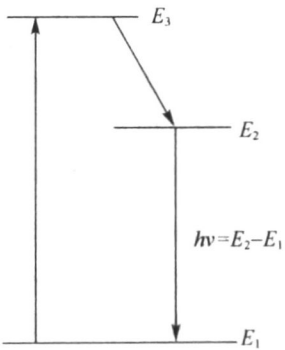


图 1-2-4 红宝石激光器能级图