

光电子技术

· 杨经国 冉瑞江

· 杜定旭 刘新民

编 著

GDZJS

四川大学出版社

351214

光 电 子 技 术

杨经国 冉瑞江 编著
杜定旭 刘新民



四川大学出版社

1990年·成都

责任编辑：杨守智
封面设计：冯先洁
版式设计：石大明

24/100/59



光 电 子 技 术
杨经国 冉瑞江 编著
杜定旭 刘新民

四川大学出版社出版发行 (成都市望江路29号)
四川省新华书店经销 成都犀浦印刷厂印刷
850×1168mm 32开本 12.25印张 299千字
1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷
印数：0001—4000册

ISBN 7-5614-0362-3/O·50 定价：2.90元

前 言

光电子技术是光学和电子学相结合的产物，是近年来迅猛发展的新兴技术。

以光波作为信息载体，在这个波段进行调制、发射及检测，这一技术已经成功地应用于激光测距、激光通讯、微光电视等许多重要领域。

毫无疑问，激光的问世是近三十年来光电子技术得以迅速发展的必要基础，激光良好的方向性，极高的强度以及单色性好等特点，使它特别适合作为光电测距仪的光源。自1960年世界上出现了第一台红宝石激光器之后，1961年美国休斯飞机公司即研制成第一台原始的红宝石激光测距机，60年代末期，激光制导的“灵巧炸弹”正式投入使用。

光波频率（ $\sim 10^{15}$ Hz）远高于通信用的无线电载波频率（ $\sim 10^{10}$ ），从而用光作为载波可以容纳更多的讯息量。由于激光的良好指向性，使激光通讯保密性极强。光波沿光纤（介质波导）传播特性的理论和实验研究近二十年来获得了极大的成功，光纤通讯技术是世界新技术革命的重要标志之一，是未来社会信息网的主要传输工具。

各种新型激光光源、光调制器以及光电探测器的研制成功，大大地推动了光电子技术的发展，导致一系列新型光电子系统的诞生。如激光测距与跟踪、激光制导、激光陀螺、激光通信、光信息处理、红外雷达、光遥感以及微光电视等。新型的光电子装置无论在测量精度、成像分辨率、抗干扰能力以及机动性等方面均优于传统的光电子装置。

本书编著的目的在于为高等学校有关专业学生提供一本较为详尽、实用的光电子技术教学参考书，同时，该书也适用于有关专业的科研技术工作者参考。

本书共分六章，第一章介绍光电子技术中的常用光源，主要是一般气体放电光源；第二章介绍各类常用激光光源；第三章叙述光束的调制与偏转技术；第四章介绍各种光电探测器件；第五章综述微弱光讯号检测技术；最后一章是介绍光电子技术的一些成熟的应用，主要是激光测距和光纤通信系统。第一、四章由冉瑞江编写，第三章由杜定旭编写，第二、五章由杨经国编写，第六章由刘新民编写，全书由杨经国统稿。

编 著 者

1990年8月

目 录

前 言

第一章 常用电光源

- § 1.1 光度学的基本概念 (1)
 - 一、辐射度单位和光度单位..... (1)
 - 二、发光效率..... (6)
 - 三、色温与相关色温..... (6)
- § 1.2 热辐射光源 (7)
 - 一、热辐射光源的基本原理..... (7)
 - 二、常用热辐射光源..... (9)
- § 1.3 气体放电光源 (14)
 - 一、气体放电光源基本原理..... (14)
 - 二、气体放电光源的稳定与镇流..... (18)
 - 三、气体放电光源的启动器..... (21)
 - 四、常用气体放电光源..... (25)

第二章 常用激光光源

- § 2.1 红宝石激光器 (45)
 - 一、红宝石激光器工作原理..... (45)
 - 二、红宝石激光器光泵系统..... (47)
 - 三、红宝石激光放大器..... (49)
- § 2.2 掺钕钷铝石榴石激光器 (Nd³⁺YAG激光器) ... (53)
 - 一、YAG 激光器工作原理..... (53)
 - 二、重复频率Nd: YAG激光器..... (54)
 - 三、YAG 激光器的电光调 Q..... (60)
- § 2.3 掺钕玻璃激光器 (68)

一、钕玻璃激光器工作原理.....	(69)
二、钕玻璃激光器的锁模.....	(70)
§ 2.4 氦氖激光器	(76)
一、氦氖激光器工作原理.....	(76)
二、激励电源.....	(78)
三、氦氖激光器稳频.....	(79)
§ 2.5 二氧化碳激光器	(81)
一、二氧化碳激光器工作原理.....	(81)
二、封离型CO ₂ 激光器.....	(87)
三、横激励高气压 CO ₂ 激光器 (TEA)	(88)
四、其它CO ₂ 激光系统.....	(90)
§ 2.6 氩离子激光器	(91)
一、氩离子激光器工作原理.....	(91)
二、氩离子激光器装置的特点.....	(92)
三、激励电源.....	(93)
§ 2.7 准分子激光器	(95)
§ 2.8 染料激光器	(99)
一、染料激光器的工作原理.....	(99)
二、染料激光器激励系统.....	(101)
§ 2.9 半导体激光器	(103)
一、半导体激光器工作原理.....	(103)
二、同质结半导体激光器.....	(105)
三、异质结半导体激光器.....	(106)
四、半导体激光器的激励与调制.....	(108)
§ 2.10 自由电子激光器.....	(108)
第三章 激光光束的调制与偏转	
§ 3.1 激光的调制原理	(111)
一、引言.....	(111)
二、幅度调制.....	(113)
三、频率调制和相位调制.....	(115)

四、强度调制	(119)
五、脉冲调制	(121)
六、脉码调制	(123)
§ 3.2 电光调制	(125)
一、线性电光效应	(125)
二、纵向电光调制	(128)
三、横向电光调制	(134)
四、电光相位调制器	(137)
五、电光高频调制问题	(139)
六、GaAs 电光调制器	(144)
§ 3.3 声光调制	(146)
一、声光衍射	(146)
二、声光调制器	(158)
三、声光Q 开关	(161)
§ 3.4 磁光调制	(162)
§ 3.5 激光光束的偏转	(164)
一、机械偏转	(164)
二、电光偏转	(165)
三、声光偏转	(169)

第四章 光辐射探测器

§ 4.1 光辐射探测方法	(172)
一、光热法	(172)
二、光电法	(172)
三、光压法	(173)
§ 4.2 真空光电管	(174)
一、光电阴极材料	(174)
二、真空光电管的构造原理与分类	(175)
三、工作特性	(177)
四、常用真空光电管	(178)
§ 4.3 光电倍增管	(179)

一、二次电子发射和二次电子发射体·····	(179)
二、光电倍增管的结构和工作原理·····	(180)
三、光电倍增管的特性参数·····	(184)
四、光电倍增管的工作电路·····	(185)
五、通道式光电倍增管·····	(192)
§ 4·4 光电池·····	(194)
一、光生伏特效应与结型光电器件原理·····	(194)
二、硅光电池·····	(196)
三、光电池的主要特性·····	(197)
四、光电池的基本电路·····	(198)
五、太阳能电源装置·····	(199)
§ 4·5 半导体光电二极管·····	(203)
一、常用半导体光电二极管·····	(203)
二、光电二极管的工作特性·····	(207)
三、光电二极管的基本电路·····	(209)
§ 4·6 红外探测器·····	(210)
一、碲镉汞(HgCdTe)·····	(217)
二、热释电探测器·····	(217)
§ 4·7 变象管和象增强器·····	(224)
一、象管的基本原理和分类·····	(224)
二、象管的结构·····	(226)
三、象管的特性参数·····	(227)
四、常用变象管·····	(229)
五、常用象增强器·····	(232)
§ 4·8 摄象器件·····	(235)
一、摄象器件的基本工作原理·····	(235)
二、光电导式摄象管·····	(238)
三、光电发射式摄象管·····	(242)
§ 4·9 电荷耦合器件(CCD)·····	(244)
一、CCD 的基本工作原理·····	(245)

二、CCD 的物理特性	(247)
三、CCD 的驱动电路	(248)
四、CCD 摄像器件	(250)
五、CCD 的应用简介	(256)

第五章 微弱光电信号检测

§ 5.1 引 言	(259)
§ 5.2 噪声及其特性	(260)
一、热噪声	(260)
二、散粒噪声	(261)
三、闪烁噪声	(262)
四、等效噪声带宽	(262)
§ 5.3 电路元件及放大器的噪声	(264)
一、电路元件噪声	(264)
二、放大器的噪声特性	(265)
三、前置放大器的低噪声度计	(266)
§ 5.4 有源滤波(选频放大)	(271)
一、有源低通滤波	(271)
二、有源高通滤波	(274)
三、有源带通滤波	(275)
§ 5.5 相关检测原理	(277)
一、自相关函数与自相关检测	(278)
二、互相关函数与互相关检测	(280)
§ 5.6 锁相放大器 (Lock-in)	(282)
一、锁相放大原理	(282)
二、相敏检波电路 (PSD)	(285)
三、EG & G9503 型锁相放大器	(287)
§ 5.7 取样积分器 (Boxcar)	(289)
一、取样积分原理	(289)
二、单点及扫描式取样积分器	(291)

三、取样积分的主要参数·····	(293)
四、MODEL 162 取样积分器·····	(296)
五、多通道取样平均·····	(299)
§ 5.8 光子计数器 (PC) ·····	(300)
一、光子计数方法·····	(301)
二、光子计数器工作状态选择·····	(303)
三、MODEL 1112 光子计数器·····	(305)
§ 5.9 光学多道分析器 (OMA) ·····	(307)
一、固体列阵检测器·····	(309)
二、光学多道系统介绍·····	(312)
三、扫描与信号提取·····	(315)
四、OSA 系统主要电路分析·····	(317)
五、新一代 OMA 系统—OMA II ·····	(321)

第六章 光电子技术应用实例

§ 6.1 光纤通信 ·····	(323)
一、引言·····	(323)
二、光纤·····	(325)
三、光纤通信发送机·····	(327)
四、光纤通信接收机·····	(337)
五、光纤通信系统·····	(346)
§ 6.2 激光测距 ·····	(353)
一、引言·····	(353)
二、相位式激光测距·····	(354)
三、脉冲式激光测距·····	(366)
§ 6.3 静止图象通信 ·····	(372)
一、引言·····	(372)
二、静止图象的扫描和记录·····	(373)
三、静止图象通信传输方式及设备·····	(376)
四、静止图象传输系统举例·····	(379)

第一章 常用电光源

光源可分为自然光源和人造光源，在人造光源中那些通电而发光的光源，统称为电光源。根据其从电能转化为光能的不同形式，电光源大致可分为三类。第一类是热辐射光源，它是物体通电后温度升高而发光的光源，例如钨丝白炽灯和在它的基础上研制的卤钨灯等；第二类是气体放电光源，即电流通过气体（包括某些金属蒸汽）放电而发光的光源，例如汞灯、钠灯、金属卤化物灯等；第三类是固体发光光源，例如场致发光屏、发光二极管等。上述三类光源属于非相干光源，还有一类新型的相干光源——激光，虽然也是由电能转换而来，但其性质、用途和发光机理与普通电光源迥然不同，各种激光器在现代光电子技术中处于十分重要的地位。

光源的研究是一门专门的技术学科，涉及光学、原子物理、电真空和色度学等多门知识。本章仅对热辐射光源和气体放电光源作简要介绍，激光光源将在第二章介绍。下面首先扼要介绍辐射度学和光度学中常用单位，然后介绍与光源有关的术语和概念，最后介绍几种常用的热辐射光源和气体放电光源。

§ 1.1 光度学的基本概念

一、辐射度单位和光度单位

对于光辐射的探测和计量，存在着辐射度单位和光度单位两套不同的单位体系。

在辐射度单位体系中，辐射功率（又称辐通量）或者辐射能是基本量，是只与辐射客体有关的量，其基本单位是瓦特（W）或者焦耳（J）。

然而，人眼的视觉细胞对频率不同的辐射有不同的响应，故用辐射度单位描述光辐射不能反映人的亮暗感觉。光度单位体系是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位，它与在光波区域内的辐射度单位之间存在一一对应的关系，如表1·1-1所示。

在光度单位体系中，被选作基本量的不是光量或光通量而是发光强度，其单位坎德拉是按国际惯例取自拉丁文烛光 *Candela* 一词的音译（简称坎）。坎德拉不仅是光度单位体系的基本单位，而且也是国际单位制（SI）的七个基本单位之一，其定义如下：“坎德拉是某一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $1/683$ 瓦每球面度（W/sr）。”

光度学的各量与辐射度对应量之间由光视效能 $K(\lambda)$ 和光视效率 $V(\lambda)$ 加以联系和换算。

(1) 光视效能 $K(\lambda)$ 。它定义为光通量 ϕ_v 和辐射通量 ϕ_e 之比，是辐射频率的函数，其定义式为：

$$K(\nu) = \frac{\phi_v(\nu)}{\phi_e(\nu)} \quad \text{或} \quad K(\lambda) = \frac{\phi_v(\lambda)}{\phi_e(\lambda)} \quad (1\cdot1-1)$$

通过对标准光度观察者的实验测定，在辐射频率为 540×10^{12} Hz 或波长为 555nm 处 $K(\lambda)$ 有最大值，其值为 683lm/W，即

$$K_m = K(\lambda) \Big|_{\lambda=555nm} = 683lm/W \quad (1\cdot1-2)$$

(2) 光视效率 V （或光谱光视效率 $V(\lambda)$ ）。它是 $K(\lambda)$ 用 K_m 归一化的结果，其定义式为：

$$V(\lambda) = K(\lambda)/K_m = \frac{1}{K_m} \frac{\phi_v(\lambda)}{\phi_e(\lambda)} \quad (1\cdot1-3)$$

表1.1-1-1 常用辐射度量 and 光度量

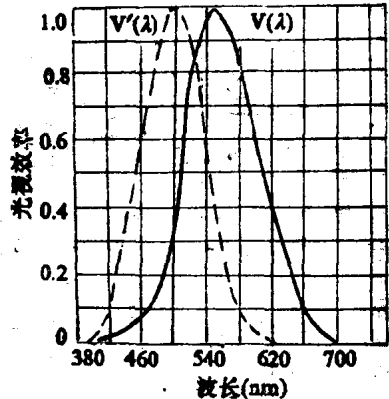
辐射度物理量及其单位		对应的光度量及其单位			
物理量名称	符号	定义或定义式	注	单位	
辐射能 radiant energy	Ω W	以辐射形式发射、传播或接收的能量		Ω (Ω_e)	$\text{lm}\cdot\text{s}$
辐射(射能)通量 radiant flux	ϕ P	$\phi = \frac{d\Omega}{dt}$	$\int \phi_\lambda d\lambda$	ϕ (ϕ_e)	流(明) lm 11m $= \text{cd}\cdot\text{sr}$
辐射功率 radiant power					
辐射强度 radiant intensity	I (I_e)	$I = \frac{d\phi}{d\Omega}$	$\int I_\lambda d\lambda$	I (I_e)	坎(德拉) cd
辐射(射)亮度 radiance	L (L)	$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\theta} = \frac{d^2\phi}{d\Omega dA \cos\theta}$	$\int L_\lambda d\lambda$	L (L_e)	cd/m^2
辐射(射)出(射)度 radiant exitance	M (M_e)	$M = \frac{d\phi}{dA}$ 离开表面一点处的面元上的辐射通量除以该面元的面积	$\int M_\lambda d\lambda$	M (M_e)	lm/m^2
辐射(射)照度 irradiance	E (E_e)	$E = \frac{d\theta}{dA}$ 照射到表面一点处的面元上的辐射通量除以该面元的面积		E (E_e)	勒(克斯) 1x $11\text{x} = 11\text{lm}/\text{m}^2$

表1·1—1注：1. 本表摘自国家标准 GB3102·6-82，单位、名称中括号内的字可省略，符号栏中加括号者，用于区分光度量与辐射度量。
 2. Ω ，立体角； A ，光源或受光的面积； θ ，面元 dA 的法线与观察方向之夹角； sr ，球面度。

这是无量纲量，它与波长的关系如图1·1-1所示。

光视效能过去曾被称为“视见函数”，光视效率则曾被称为“相对视见函数”或“相对可见度”，现均按国家标准 GB3102·6-82 改正。利用实测值 K_m 和 $V(\lambda)$ ，就可以通过光谱辐射度的测量来确定光谱光度量。

在光度单位中，亮度和照度这两个光度量曾有过不同的单位，有些现在仍有人使用。为方便读者，将这些单位与标准单位间的关系列于表1·1-2和1·1-3中。



$V(\lambda)$ ，明视觉光视效率，锥体细胞视觉，环境亮度为数 cd/m^2
 $V'(\lambda)$ ，暗视觉光视效率，杆体细胞视觉，环境亮度， $<0.001cd/m^2$

图1·1—1 光谱光视效率

表1·1-2 光照度换算表^[1]

	勒克斯 (lx)	辐透 (phot)	毫辐透 (milliphot)	英尺烛光 (Footcandle)	透射/面积 (lumen/A)
1 勒克斯 [lx]	1	10^{-4}	10^{-1}	9.290×10^{-2}	$1lm/m^2$
1 辐透 [ph]	10^4	1	10^8	9.290×10^2	$1lm/cm^2$
1 毫辐透 [mph]	10	10^{-8}	1	9.290×10^{-1}	$10^2lm/cm^2$
1 英尺烛光 [fcd]	1.076×10	1.076×10^{-8}	1.076	1	$1lm/ft^2$

注：圆括号 () 内为英文名称，方括号 [] 内为单位符号，[fcd] 在美国手册上作 fc。

表1·1-3 光亮度单位换算表 [1]

	(Candela/ metre ²) 坎德拉/米 ² [cd/m ²]	(Nit) 尼特 [nt]	(Stilb) 熙提 [sb]	(Apostilb) 阿熙提 [asb]	(lambert) 朗伯 [L]	(Milli- lambert) 毫朗伯 [mL]	(Foot- lambert) 英尺朗伯 [FL]	(Candle/ feet ²) 烛光/英尺 ² [cd/ft ²]	(Candle/ inch ²) 烛光/英寸 ² [cd/in ²]
1 坎德拉/米 ²	1	10 ⁻⁴	3.1416	3.142 × 10 ⁻⁴	2.919 × 10 ⁻¹	9.290 × 10 ⁻²	6.450 × 10 ⁻⁴		
1 尼特 (坎德拉/米 ²)	1	10 ⁻⁴	3.1416	3.142 × 10 ⁻⁴	2.919 × 10 ⁻¹	9.290 × 10 ⁻²	6.450 × 10 ⁻⁴		
1 熙提 (坎/厘米 ²)	10 ⁴	1	3.142 × 10 ⁴	3.1416	2.919 × 10 ³	9.290 × 10 ²	6.450 × 10 ⁴		
1 阿熙提 ($\frac{1}{\pi}$ 坎/米 ²)	3.183 × 10 ⁻¹	3.183 × 10 ⁻¹	1	10 ⁻⁴	9.290 × 10 ⁻²	2.957 × 10 ⁻²	2.050 × 10 ⁻⁴		
1 朗伯 ($\frac{1}{\pi}$ 烛光/厘米 ²)	3.183 × 10 ³	3.183 × 10 ³	3.183 × 10 ¹	1	10 ³	9.290 × 10 ²	20050		
1 毫朗伯	3.183	3.183	3.183 × 10 ⁻⁴	10 ⁻³	1	9.290 × 10 ⁻¹	2.050 × 10 ⁻³		
1 英尺朗伯 ($\frac{1}{\pi}$ 坎/英尺 ²)	3.426	3.426	1.076 × 10 ⁻⁴	1.076 × 10 ⁻³	1.076 × 10 ⁻³	1	3.183 × 10 ⁻³		
1 烛光/英尺 ²	1.076 × 10	1.076 × 10	3.382 × 10 ⁻³	3.382 × 10 ⁻³	3.382	1	6.940 × 10 ⁻³		
1 烛光/英寸 ²	1.50 × 10 ³	1.550 × 10 ³	4.870 × 10 ⁻¹	4.870 × 10 ³	4.870 × 10 ⁻¹	4.870 × 10 ²	1.440 × 10 ²		

注：圆括号内为英文名称，方括号内为单位符号。

二、发光效率

发光效率简称光效，是指电光源所发出的光通量 ϕ 和该光源所消耗的电功率 p 之比。

$$\eta = \phi / p \quad (1.1-4)$$

众所周知，加在电光源的电功率并非全部变成了可见光，其中有相当一部分变成了其它形式的能量（例如热能），因此，可将上式改写成如下形式：

$$\begin{aligned} \eta = \frac{\phi}{p} &= \frac{K_m \int_{380}^{760} \phi_\lambda V(\lambda) d\lambda}{p} \\ &= \frac{\int_{380}^{760} \phi_\lambda d\lambda}{p} \cdot \frac{K_m \int_{380}^{760} \phi_\lambda V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{760} \phi_\lambda d\lambda} = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (1.1-5) \end{aligned}$$

其中 $\eta_1 = \frac{\int_{380}^{760} \phi_\lambda d\lambda}{p}$ 表示可见辐射通量在输入功率 p 中所占的比例

例， $\eta_2 = \frac{K_m \int_{380}^{760} \phi V_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{760} \phi_\lambda d\lambda}$ 是当 $\eta_1 = 1$ 时灯的发光效率，称为灯

的理想光效。

对于照明光源来说，总是希望光效 η 越高越好，对于实际的光源，提高光效的途径常常是选择适当的发光物质，创造合理的工作条件，使它有更多的辐射落在可见光区，特别是落在 $V(\lambda)$ 大的地方，即落在波长接近555毫微米处。

三、色温和相关色温

在光源的研究工作中，经常采用“色温”这个表示光源颜色的量。色温是与色度相联系的，确定光源的色温要用到色度计算