光电子器件及其应用

Optoelectronic Devices and Their Applications

· 孙海金 杨国锋 编 ·

科学出版社

光电子器件及其应用

Optoelectronic Devices and Their Applications

孙海金　杨国锋　编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍光传输器件(如光隔离器、光环形器、光波导器件、定向耦合器、光纤光栅器件、光开关、光滤波器、光子晶体器件)、光接收器件(如光热探测器、外光电效应探测器、光电导探测器、光伏探测器、电荷耦合器件)、光发射器件(如发光二极管、激光二极管、动态单模激光器、量子阱激光器、光纤激光器、光放大器)与光显示器件(阴极射线管、液晶显示器与等离子体显示器)的基本结构、工作原理、相关应用。

本书适合作为光电信息科学与工程、通信工程、微电子、应用物理等本科专业在光电子学、光电子技术、光电子器件方面的教材与参考书，也可作为物理电子学方向、光学工程方向的硕士研究生的预备教材。

图书在版编目(CIP)数据

光电子器件及其应用/孙海金，杨国锋编. —北京：科学出版社，2020.3

ISBN 978-7-03-064461-9

Ⅰ. ①光… Ⅱ. ①孙… ②杨… Ⅲ. ①光电器件-教材 Ⅳ. ①TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 028605 号

责任编辑：许 蕾 曾佳佳/责任校对：杨聪敏

责任印制：张 伟/封面设计：许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

北京捷迅佳彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 3 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2020 年 3 月第一次印刷 印张：15 3/4

字数：370 000

定价：79.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

1905 年，爱因斯坦(Albert Einstein，1879—1955 年)发表了题为《关于光的产生和转化的一个启发性观念》的科学论文。11 年后，又发表了题为《关于辐射的量子理论》的科学论文。这两篇论文均涉及光电子的概念，为光电子技术的发展奠定了基础。在前一篇文章中，爱因斯坦解决了外光电效应的理论问题。光是由光子组成的，材料中的电子吸收光子能量之后挣脱材料表面的束缚而逸出，形成光电子，最后形成光电流。在后一篇文章中，爱因斯坦提出了受激辐射、受激吸收与自发辐射的概念，为激光的产生提供了理论基础。材料中低能级的电子吸收入射光子能量后会跃迁到较高能级上完成受激吸收，同时处于高能级的电子受入射光子的激励会从高能级跃迁到空位低能级并放出与入射光子相同特征的光子完成受激辐射，处在高能级上的电子也能自发跃迁到空位低能级上并释放光子完成自发辐射。通过对上述类似情景的广泛研究，科学家们得到了许多有关光子与电子相互作用的规律，按这些规律研制出的能实现特定目标的器件，被称为光电子器件。光电子器件是融合了光子技术与电子技术的构件。

现今，人们已发明了(或正在发明)许许多多、各式各样的光电子器件。按工作波段可分为紫外光光电子器件、可见光光电子器件、红外光光电子器件、X 射线光电子器件等。按功能可分为能量光电子器件、信息光电子器件。按工作过程是否包含光电转换过程，可分为光有源器件与光无源器件，如光接收器件、光发射器件、光显示器件属于光有源器件，光波导器件、光纤光栅器件属于光无源器件。对光电子器件的运用极大地提高了人类的生活质量，提高了人类进行生产实践、科学实验的效率。光电子器件的研发、生产和运用构成了一个巨大的产业群。当今社会，可以随处看到光电子产品的身影。在民用方面，如彩电、数码相机、DVD、电脑等；在军用方面，如精密制导武器、航天武器、瞄准器、跟踪器、监视器等；在工业方面，如激光加工、光控自动控制等；在商业方面，如条形码读入系统、二维码读入系统等；在航空航天方面，如太阳能利用、遥感监测等；在通信方面，如光通信器件、互联网、物联网器件等；在医疗方面，如光子诊断、光子治疗、光子嫩肤等；在轨道交通方面，如火车轴箱温度监测、钢轨磨损监测等；……

本书是根据编者多年执教的同名课程“光电子器件及其应用”的讲课内容改编而成的。编写时参阅了大量的网络文献资源(万方数据、超星读秀、中国知网、维普数据、百度文库)与纸质书籍资料。本书主要介绍与紫外光、可见光、红外光相关的传输器件、接收器件、发射器件的结构、工作原理与相关应用，本书还介绍了主流光显示器件的基本结构与工作原理。这些内容是整个庞大的光电子器件体系的经典与核心。全书共分 5 章，第 1 章是光电子器件基础，主要介绍光的特性、表征，光在介质中的传输，光在介质表面的反射与折射等；第 2 章是光传输器件，主要介绍光传输器件的结构、特性与相关应用，如光隔离器、光环形器、光波导器件、定向耦合器、光纤光栅器件、光开关、光滤波器、光子晶体器件；第 3 章是光接收器件，讨论光吸收特性，介绍光热探测器、外光

电效应探测器、光电导探测器、光伏探测器、电荷耦合器件等的结构特性与相关的典型应用；第 4 章是光发射器件，讨论半导体光发射材料的特点，介绍发光二极管、激光二极管、动态单模激光器、量子阱激光器、光纤激光器与光放大器的结构特性、工作原理与相关应用；第 5 章是光显示器件，主要讨论阴极射线管、液晶显示器与等离子体显示器的基本结构与显示原理。

本书在大学物理知识的基础上，运用高等数学工具，分析、理解器件的工作原理，读者阅读后既能感受到器件运作的严密性，也能感受到器件工作结果的简单性，介绍过程深入浅出。为了直观说明器件的结构与工作原理，本书配有大量图片。在每章均特意编入了一些光电子器件的典型应用，涉及民用、军用、工业、通信、医疗、轨道交通等方面，以期尽可能给出光电子器件应用的全貌。在每章的后面，还设置了数量充足的习题，解答这些习题可以协助读者弄清楚相关器件的结构与工作原理。本书中的小字部分，分别是导引、思考、探究与拓展。导引部分主要是一些基本的物理知识或者对问题的切入；思考旨在对正文中相关原理进行顺藤摸瓜式的推敲，能加深读者对原理的理解；探究主要对正文原理进行反刍式的思索，意在加深对原理及相关应用的理解；拓展是对正文原理的深耕式运用，对读者掌握原理等基础知识和相关器件的典型应用很有帮助。教师在安排教学时，可采用讨论式的教学方式，激发学习者的高阶思维，加深对器件结构、工作原理与应用模式的理解。

本书的内容是光电信息科学与工程、通信工程、微电子、应用物理等本科专业关注的中心内容，也是物理电子学方向、光学工程方向硕士研究生的必备知识。所以本书适合作为上述专业在光电子学、光电子技术、光电子器件方面的核心课程、专业课程的教材与参考书。授课教师可根据实际需要选讲相关内容，课时可以是 64、56 或 48 不等。在附录 4 有课时安排的建议。

本书由江南大学理学院光电信息科学与工程系张逸新教授、胡立发研究员审稿。

在本书的编写过程中，编者的老同学朱拓、朱益清给出了不可或缺的支持与建议，编者的学生陈明明(光科 2015 级)在习题方面也给出了不少建议。编者所在的江南大学理学院和光电信息科学与工程系始终给予了支持。本书的出版得到了江南大学理学院的全额资助。本书的责任编辑许蕾付出了非常辛勤的劳动，提出了许多中肯的建议。在此，向所有关心与支持本书出版的单位与个人表示感谢并致敬。

由于编者的水平有限，难免有疏漏、不妥之处。敬请读者指出，编者诚恳接受，争取再版之时改进。

孙海金

2019 年 10 月于江南大学

目　录

前言
第 1 章　光电子器件基础 …… 1
1.1　光的主要信息特征 …… 1
1.1.1　单频光的主要信息特征 …… 2
1.1.2　复合光的信息特征及其表示 …… 4
1.2　光在介质中的传输特性 …… 6
1.2.1　光的材料色散 …… 6
1.2.2　光的增益与衰减 …… 7
1.2.3　某些旋光材料的旋光性 …… 10
1.3　光在介质表面的反射与折射 …… 13
1.3.1　菲涅耳公式 …… 13
1.3.2　全反射 …… 17
1.3.3　双折射 …… 20
习题 1 …… 25
第 2 章　光传输器件 …… 28
2.1　光隔离器　光环形器 …… 28
2.1.1　光隔离器 …… 28
2.1.2　光环形器 …… 34
2.2　光波导器件 …… 39
2.2.1　平面光波导 …… 39
2.2.2　条形光波导 …… 42
2.2.3　光波导的应用 …… 48
2.3　定向耦合器 …… 49
2.3.1　耦合模理论 …… 49
2.3.2　定向耦合器的基本结构与工作原理 …… 50
2.3.3　定向耦合器的应用 …… 53
2.4　光纤光栅器件 …… 54
2.4.1　布拉格光纤光栅 …… 54
2.4.2　长周期光纤光栅 …… 59
2.4.3　啁啾光纤光栅 …… 61
2.4.4　光纤光栅的主要应用 …… 61
2.5　光开关　光滤波器 …… 62
2.5.1　光开关 …… 62

2.5.2　光滤波器 …… 66
2.6　光子晶体器件 …… 70
2.6.1　电子晶体 …… 70
2.6.2　光子晶体 …… 72
2.6.3　光子晶体光纤 …… 73
习题 2 …… 76
第 3 章　光接收器件 …… 82
3.1　光接收器件核心要素 …… 82
3.1.1　半导体的光吸收过程 …… 82
3.1.2　直接带隙与间接带隙半导体的吸收边 …… 84
3.1.3　禁带宽度受温度与电场强度的影响 …… 87
3.2　光电子探测器概述 …… 88
3.2.1　光电子探测器的定义与分类 …… 88
3.2.2　光电子探测器的性能参数 …… 90
3.2.3　光电子探测器的光学变换系统 …… 93
3.3　光热探测器 …… 95
3.3.1　热敏电阻 …… 97
3.3.2　热释电探测器 …… 100
3.4　外光电效应探测器 …… 104
3.4.1　真空光电管与充气光电管 …… 104
3.4.2　光电阴极 …… 105
3.4.3　光电倍增管 …… 108
3.4.4　光电倍增管的应用 …… 112
3.5　光电导探测器 …… 113
3.5.1　光敏电阻的主要特性参数 …… 113
3.5.2　光敏电阻的结构 …… 115
3.5.3　光敏电阻的应用基础 …… 116
3.5.4　光敏电阻的应用 …… 119
3.6　光伏探测器 …… 120
3.6.1　光电池 …… 121
3.6.2　光电二极管 …… 124
3.7　电荷耦合器件 …… 131
3.7.1　MOS 单元的电荷存储能力 …… 131
3.7.2　电荷转移 …… 132
3.7.3　电荷检测 …… 134
3.7.4　信号电荷的注入 …… 134
3.7.5　线阵 CCD …… 134
3.7.6　用线阵 CCD 测量不透明线材直径 …… 135

3.8　其他光电子探测器 …… 136
3.8.1　光敏三极管 …… 136
3.8.2　四象限探测器 …… 138
3.8.3　位置敏感元件 …… 140
习题 3 …… 144
第 4 章　光发射器件 …… 149
4.1　光发射材料 …… 149
4.1.1　光发射与光吸收之间的关系 …… 149
4.1.2　半导体发射光谱的特点 …… 150
4.1.3　非辐射复合 …… 153
4.2　半导体发光二极管 …… 155
4.2.1　发光二极管的芯片结构 …… 155
4.2.2　发光二极管的主要输出特性 …… 160
4.2.3　发光二极管的应用 …… 161
4.3　半导体激光器 …… 163
4.3.1　半导体激光器受激放大条件 …… 163
4.3.2　F-P LD 的波导结构 …… 164
4.3.3　F-P LD 的输出特性 …… 166
4.3.4　F-P LD 的激光输出模式 …… 168
4.3.5　F-P LD 的应用 …… 172
4.4　动态单模半导体激光器 …… 174
4.4.1　分布反馈半导体激光器 …… 175
4.4.2　分布布拉格反射型激光器 …… 179
4.4.3　光栅外腔单模激光器 …… 179
4.5　量子阱激光器 …… 181
4.5.1　超晶格与量子阱 …… 181
4.5.2　量子阱激光器的特征 …… 181
4.5.3　量子线与量子点激光器 …… 189
4.6　光纤激光器 …… 190
4.6.1　稀土掺杂光纤激光器的工作物质 …… 190
4.6.2　光纤激光器的泵浦方式 …… 192
4.6.3　光纤激光器的选模技术 …… 194
4.7　光放大器 …… 198
4.7.1　半导体光放大器 …… 198
4.7.2　掺铒光纤放大器 …… 201
4.7.3　拉曼光纤放大器 …… 204
4.7.4　光放大器的应用 …… 205
习题 4 …… 206

第 5 章　光显示器件 …… 211
5.1　阴极射线管 …… 211
5.1.1　单色阴极射线管 …… 211
5.1.2　彩色阴极射线管 …… 214
5.2　液晶显示器 …… 216
5.2.1　液晶基础知识 …… 216
5.2.2　扭曲向列型液晶显示器 …… 218
5.2.3　超扭曲向列型液晶显示器 …… 220
5.2.4　薄膜晶体管液晶显示器 …… 221
5.3　等离子体显示器 …… 223
5.3.1　气体放电基本知识 …… 223
5.3.2　单色等离子体显示器 …… 224
5.3.3　彩色等离子体显示器 …… 226
习题 5 …… 229
参考文献 …… 231
附录 1　耦合模方程的推导 …… 232
附录 2　光电子探测器的噪声 …… 234
附录 3　有关思考、探究的参考答案 …… 237
附录 4　课时安排建议 …… 242

第 1 章　光电子器件基础

光是什么？如何被感知、表征？光在固体介质中传输时，其物理量会如何变化？光在固体介质表面是如何被反射与折射的？这些问题是处理光电子器件时必会遇到的最基本的问题。这些问题的解答与运用构成光电子器件基础。

1.1　光的主要信息特征

导引：

光具有波粒二象性。

从波动角度看，光波是一种电磁横波，沿 z 方向传播的单频简谐光波可表达为

$$\vec{E}(z,t)=\vec{E}_0\cos\left[2\pi\left(\nu t-\frac{z}{\lambda}\right)\right] \tag{1-1-1a}$$

$$\vec{H}(z,t)=\vec{H}_0\cos\left[2\pi\left(\nu t-\frac{z}{\lambda}\right)\right] \tag{1-1-1b}$$

式中，$\vec{E}$ 是电场强度矢量；$\vec{H}$ 为磁场强度矢量；$\vec{E}_0$ 为电场强度矢量振幅；$\vec{H}_0$ 为磁场强度矢量振幅。许多情况下，电场强度是影响人眼感受和使照相底片感光的主要原因，所以常将电场强度矢量称为光矢量。ν 是光振动的频率；λ 是光波的波长。根据光在真空中的波长从小到大排列，可把电磁波分为 γ 射线、X 射线、紫外光（5～400nm）、可见光（400～760nm）、红外光（760nm～600μm）、无线电波等[①]。光的强度与光矢量振幅的平方成正比。

从粒子角度看，在真空中频率为 ν 沿 z 方向传播的单频光是一束射向 z 方向的光子流。每个光子的能量 E 与动量 $\vec{P}$ 依次为

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

$$\vec{P}=\frac{h}{\lambda}\vec{k} \tag{1-1-2b}$$

式中，m 是光子质量（光子静质量为 0）；c 是真空中的光速（$3\times10^8\,\mathrm{m/s}$）；$h$ 是普朗克常量（$6.63\times10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}$），$\vec{k}$ 是 z 方向单位矢量。设单位时间内通过垂直于光传播方向的单位横截面积的光子数为 N，则光的强度为

$$I=Nh\nu \tag{1-1-3}$$

本课程讨论的光电子器件均在电磁波谱中的可见光、红外光与紫外光波长范围内工作。人眼对紫外光、红外光无明度感觉，对可见光的感受却比较丰富。除了有明度感受外，还有色调与色饱和度感受。在较强的光照射与较弱的光照射下，人眼的感受也有差

① $1\mathrm{nm}=10^{-9}\mathrm{m}$；$1\mu\mathrm{m}=10^{-6}\mathrm{m}$。

异，依次称明视觉与暗视觉。这主要是由于人眼中有两种视神经细胞：圆锥视神经细胞（视锥细胞）与圆柱视神经细胞（视杆细胞）。视锥细胞负责在明亮状态下观察外界，视杆细胞负责在灰暗状态下观察外界。人眼对单波长（频率）可见光的颜色感受可参见表 1-1-1。

表 1-1-1　光在真空中的颜色与波长

颜色	紫	蓝	青	绿	黄	橙	红
波长/nm	400～446	446～464	464～500	500～578	578～592	592～620	620～760

1.1.1　单频光的主要信息特征

原则上，光波的频率、波长、相位、振幅、偏振方向均可携带信息。如我们可以定义光矢量水平偏振为 0，竖直偏振为 1，用光矢量的偏振方向来携带信息；我们也可以用光振动振幅小表示 0，光振动振幅大表示 1。后者正是传统光通信、光信息存储的主要逻辑依据。光振动振幅大，就是光强大，相同的照射面积，对应的光功率就大。所以我们称，在传统意义上，光功率是单频光的主要信息特征。

在传统的光纤通信中，使用的是红外光，一般用光功率的强弱来携带信息 1 与 0，如图 1-1-1 所示。我们可以约定光功率大记为 1，光功率小记为 0，于是图 1-1-1 中的读数（按时间先后）为 10101101001（非归零码）。光纤中传输的光功率 P 可通过专用功率计测定。一般地，光功率的单位采用国际单位制中的瓦特（W）。但在实际应用时，也常用毫瓦（mW）、微瓦（μW）来表示[①]。光纤中传输的光功率也常用毫瓦分贝（dBm）、微瓦分贝（dBμ）来表示。dBm、dBμ 与 mW 、μW 之间的换算关系如下：

$$P' = 10\lg\frac{P(\mathrm{mW})}{1\mathrm{mW}} \qquad (\mathrm{dBm}) \qquad (1\text{-}1\text{-}4a)$$

$$P'' = 10\lg\frac{P(\mu\mathrm{W})}{1\mu\mathrm{W}} \qquad (\mathrm{dB}\mu) \qquad (1\text{-}1\text{-}4b)$$

式中，lg 是以 10 为底的常用对数。换算是简单的，比如输出 1mW 就等于输出 0dBm 与 30dBμ，输入 10dBm 就等于输入 10mW 与 40dBμ 。

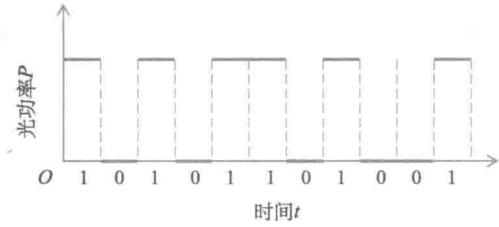


图 1-1-1　光功率携带信息

① $1\mathrm{mW}=10^{-3}\mathrm{W}$；$1\mu\mathrm{W}=10^{-6}\mathrm{W}$ 。

探究：

第一代光纤通信用的光波长为【　】。

(A) 1.55μm　(B) 1.31μm　(C) 0.85μm　(D) 1.0mm

在光检测方面，电磁辐射对敏感单元面积上的投射，称辐照度，其单位为瓦特/米^2（W/m^2），用字母E_e表示，如1.0W的光功率均匀投射到2.0mm^{2}的探测器敏感单元表面上时，其辐照度$E_e=5.0\times10^5\,W/m^2$。倒过来，若投射到探测器敏感单元表面的辐照度为$1.0\times10^{-5}\,W/m^2$，敏感面面积为8.0μm^2，辐射功率即为$8.0\times10^{-17}\,W$；若是可见光，则常用照度E_V来表示，其单位是勒克斯（lx）。对于可见光，光功率也常用光通量来代替，光通量的单位是流明（lm）。1W的波长为560nm的光辐射，对应的光通量为683lm。若是1W的波长为600nm的光辐射则对应光通量为$0.750\times683=512lm$，这里的0.750是视见函数的值。图1-1-2所画出的是视见函数曲线。其中$V(\lambda)$是明亮照明下的视见函数，对应视锥细胞工作；$V'(\lambda)$是弱照明状态下的视见函数，对应视杆细胞工作。

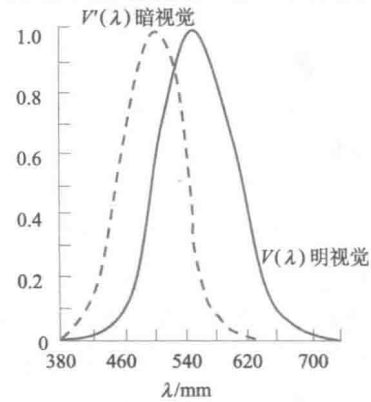


图 1-1-2　光视见函数

表1-1-2是人眼的明视见函数值。若光的波长不是恰为表1-1-2中所示的值，则可用线性内插法计算它的视见函数值。如$\lambda=614nm$的光的视见函数值为$0.631+(614-610)\times(0.503-0.631)/(620-610)=0.580$。若是1lm的光通量均匀照射在1m^{2}上，则对应1lx。若是100lx的光照射在3.0mm^{2}光敏面上，则对应光通量为3.0×10^{-4}lm。表1-1-3所列为自然界的常见照度数量级。

表 1-1-2　人眼的明视见函数值

λ / nm	V(λ)	λ / nm	V(λ)	λ / nm	V(λ)
400	0.0004	530	0.862	660	0.107
410	0.0012	540	0.954	670	0.061
420	0.0040	550	0.995	680	0.032
430	0.0116	560	1.000	690	0.017
440	0.023	570	0.995	700	0.0082
450	0.038	580	0.952	710	0.0041
460	0.060	590	0.870	720	0.0021
470	0.091	600	0.750	730	0.00105
480	0.139	610	0.631	740	0.00055
490	0.208	620	0.503	750	0.00025
500	0.323	630	0.381	760	0.00006
510	0.503	640	0.265		
520	0.710	650	0.175		

表 1-1-3　自然界的常见照度数量级

场景	照度/lx	场景	照度/lx	场景	照度/lx
夏日阳光下	100000	室内日光灯下	100	夜间路灯	0.1
阴天室外	10000	黄昏室内	10	星光	0.0001

思考：

人眼作为人体光探测器官对不同的电磁辐射有着不同的敏感性，其他光探测器是否也存在类似现象？

在光显示方面，常用三种方法来调节光通量的大小(灰度)。第一种方法是直接控制发光物体(显示单元)的发光强度。比如，阴极射线管中用控制射到荧光粉上的电子束剂量的大小来控制荧光粉的发光强度。电子束剂量大，发光单元就亮；电子束剂量小，发光单元就暗。第二种方法是控制显示单元的发光时间。将显示周期分为 N 个子场，其中第 N 个子场有 2^{N-1} 个发光脉冲，设每个发光脉冲有相等的光通量，则显示单元能显示 2^N 级灰度。如若将显示周期分为 8 个子场，则显示单元共能显示 256 个灰度等级。第 1、2、3、4、5、6、7、8 子场拥有的光脉冲数目依次是 1、2、4、8、16、32、64、128 个，通过控制各子场是否参与发光，可控制 0 ~ 255 共 256 级的灰度显示。若一个显示周期中，第 1 子场、第 5 子场、第 7 子场发光，而其他子场不发光，则在一个显示周期中有 $1+16+64=81$ 个发光脉冲参与显示。反过来，若要在一个显示周期中有 122 个发光脉冲参与显示，则只要控制第 7 子场、第 6 子场、第 5 子场、第 4 子场、第 2 子场参与发光显示即可，$64+32+16+8+2=122$。第三种方法是控制显示单元的发光面积。如欲实现 5 级的灰度显示，可将发光单元的空间面积分为相等的 4 块，控制这 4 块发光面积是否参与发光可实现 0、1、2、3、4 共 5 级灰度显示。

1.1.2　复合光的信息特征及其表示

复合光的光谱分布可用光谱功率函数 $P(\lambda)$ 来描述。$P(\lambda)$ 表示波长 λ 附近单位波长范围内的光功率。于是，复合光总光功率

$$P=\int_0^{\infty}P(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{1-1-5}$$

复合光的光通量

$$\phi_{\mathrm{V}}=683\int_0^{\infty}V(\lambda)P(\lambda)\mathrm{d}\lambda \quad (\mathrm{lm}) \tag{1-1-6}$$

当受光面积为 A，则照度为

$$E_{\mathrm{V}}=\frac{\phi_{\mathrm{V}}}{A} \tag{1-1-7}$$

在彩色显示方面，人眼对彩色的感受有三种效果：明度、色调与色饱和度。明度是人眼感受到的彩色的总的明亮程度。色调对应彩色的光谱主波长。色饱和度是彩色光所显示的颜色深浅程度或纯洁程度。对于同一色调的彩色光，色彩越纯，饱和度就越高。

饱和度越低，彩色就越浅。人眼这种对颜色的三种感受是由于人眼的视网膜上有三种颜色敏感的视锥细胞，它们分别对红色(R)、绿色(G)和蓝色(B)光敏感。如图 1-1-3 呈示了人眼红、绿、蓝三种视锥细胞的单色视见函数复合成明视见函数的原理。其中蓝色视见函数放大了 20 倍，将红、绿、蓝三色的视见函数值相加就成为总的明视见函数(明度曲线)值。

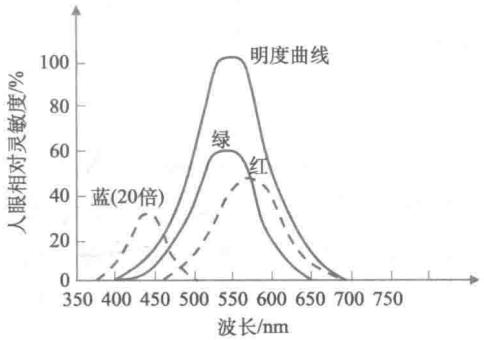


图 1-1-3　人眼单色视见函数与明视见函数的关系

实验表明，绝大部分颜色对人眼的刺激效果可用红 R(700nm)、绿 G(546.1nm)、蓝 B(435.8nm)三原色光按不同的比例强度混合来表示(三刺激理论)。颜色 C 可表示为

$$C = R(\mathrm{R}) + G(\mathrm{G}) + B(\mathrm{B}) \tag{1-1-8}$$

式中，三原色红(R)对应光通量为 1lm 的波长为 700nm 的红光、三原色绿(G)对应光通量为 4.5907lm 的波长为 546.1nm 的绿光、三原色蓝(B)对应光通量为 0.0601lm 的波长为 435.8nm 的蓝光；R、G、B 依次为颜色 C 中等效的拥有三原色(R)(G)(B)的份额。当 $R = G = B = 1$ 时，颜色 C 是光通量为 5.6508lm 的白光。若每种颜色的份额用 0～255 中的整数来表示，就可显示 $256 \times 256 \times 256$ 种颜色，即可显示 1677 万种以上的颜色。其中，$R = G = B = 0$ 时为黑色，$R = G = B = 255$ 时为最亮的白色，$0 < R = G = B < 255$ 为介于黑色与最亮白色之间的灰色。研究颜色的色度时，常用颜色中含有三原色(R)(G)(B)份额的相对比例 r、g、b 来表示。

$$c = r(\mathrm{R}) + g(\mathrm{G}) + b(\mathrm{B}) \tag{1-1-9}$$

式中，

$$r = \frac{R}{R+G+B},\quad g = \frac{G}{R+G+B},\quad b = \frac{B}{R+G+B} \tag{1-1-10}$$

上述颜色模型称为 RGB 相加色混合模型，被广泛用于照明、视频、显示器等相关领域。

拓展：

伪彩色显示：在印刷制版、遥感和医学图像处理中，有时图像仅仅是一张灰度变化的单色图，并无真实的色彩。为了增强人眼的感受，将一定灰度值的地方用一定颜色着色，不同的灰度与不同的颜色对应，可形成一张感受深刻的彩色图片。

对于染料、涂料等领域，常用C(青色)、M(品红)、Y(黄色)、K(黑色)相减色模型进行描述。

1.2　光在介质中的传输特性

光在介质中传输时，光波的波阵面向前推进，光波的振幅会发生改变。光在某些介质中传播时，其光矢量的振动方向还会发生旋转。

1.2.1　光的材料色散

复合光通过三棱镜时，不同颜色(波长)的光被三棱镜折向不同的方向，形成棱镜色散光谱。这主要是因为材料的折射率 n 是光的频率(或波长)的函数，频率不同，折射率也不同。研究结果表明，光在透明介质中传播时，其折射率随波长的减小(频率的增加)而增加，称正常色散。折射率与波长的关系可由柯西公式来表达

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \tag{1-2-1}$$

式中，A、B、C 为与具体材料有关的常数。介质在其他的一些波段中，折射率随波长的增加而增加，这种色散关系称反常色散。反常色散往往伴随较大的选择性吸收。

色散将引起光信号波形的畸变，对光信号的正确传输产生干扰，甚至引起误码。色散限制了准确进行光通信的传输速率。或者说，为了保持通信质量，光信号的有效传输距离将受到色散的限制。称 D_n 为材料色散系数，它的单位为 $\mathrm{ps}/(\mathrm{km}\cdot\mathrm{nm})$[①]。由于光源发出的光有一定的波长宽度 $\Delta\lambda$，所以，光源发出的光脉冲在传输距离 L 后的时延差 $\Delta\tau$ 可表达为

$$\Delta\tau = D_n L \cdot \Delta\lambda \tag{1-2-2}$$

式中，材料色散系数 D_n 可表示为

$$D_n = \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{\mathrm{d}^2 n}{\mathrm{d}\lambda^2} \tag{1-2-3}$$

式中，c 为真空中的光速。对于光纤通信，除了材料色散外，还存在其他色散形式，如波导色散、模间色散与偏振色散。光纤通信中，光电子探测器能分辨的光信号时延差 $\Delta\tau$ 应小于 BT，即

$$\Delta\tau < BT \tag{1-2-4}$$

式中，T 是光信号周期；B 是与光信号类型(模拟信号、数字信号)和信号码型(归零码、非归零码)等有关的常数。如对于非归零码的数字信号，$B = 0.7$；对于归零码的数字信号，$B = 0.35$。

【例 1-2-1】 已知光源波长 $\lambda = 0.85\mu\mathrm{m}$，半功率光谱宽度 $\Delta\lambda = 45\mathrm{nm}$，$\dfrac{\mathrm{d}^2 n}{\mathrm{d}\lambda^2} =$

① $1\mathrm{ps} = 10^{-12}\mathrm{s}$。

$2.5\times10^{10}\,\mathrm{m}^{-2}$。采用非归零码进行数字通信。若光源脉冲的传输速率为10Mbit / s，只考虑材料色散。试求光信号有效传输的最大距离。

解：光脉冲间隔周期

$$T=\frac{1}{10\times10^{6}}=1.0\times10^{-7}\,\mathrm{s}$$

单位长度的时延差为

$$\Delta\tau=D_{\mathrm{n}}\cdot\Delta\lambda=\frac{\lambda}{c}\cdot\frac{\mathrm{d}^2n}{\mathrm{d}\lambda^2}\cdot\Delta\lambda=\frac{0.85\times10^{-6}}{3.0\times10^{8}}\times2.5\times10^{10}\times45\times10^{-9}=3.2\times10^{-12}\,\mathrm{s/m}$$

有效传输的最大距离

$$L_{\max}=\frac{0.7T}{\Delta\tau}=\frac{0.7\times1.0\times10^{-7}}{3.2\times10^{-12}}=2.18\times10^{4}\,\mathrm{m}=21.8\mathrm{km}^{①}$$

在折射率为 n 的材料中，光矢量传播方程(1-1-1a)可用复数表达为

$$\vec{E}(z,t)=\vec{E}_0\exp\left[\mathrm{j}\left(2\pi\nu t-\frac{2\pi}{\lambda}nz\right)\right]=\vec{E}_0\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-\beta z)\right]\tag{1-2-5}$$

式中，$\mathrm{j}=\sqrt{-1}$ 为纯虚数；β 被称为传播常数

$$\beta=\frac{2\pi}{\lambda}n\tag{1-2-6}$$

传播常数表明光传播单位长度时，光波振动相位的减小量。不同的 β，传播相等长度时，相位的改变是不同的。光的强度与复光矢量的模的平方成正比。

思考：

光在自由空间中传输时，波矢的大小与传播常数有何关系？

1.2.2　光的增益与衰减

光在增益介质中传播时，由于受激辐射的影响，光功率会加强。从波动的角度看，光矢量振幅增大了。设一束光刚进入活性介质时的光功率为 P_0，传输一定距离后光功率为 P，则定义增益 G 为

$$G=\frac{P}{P_0}\tag{1-2-7a}$$

光的增益常发生在器件的有源层中，常用分贝为单位来描述增益的大小。

$$G'=10\lg\frac{P}{P_0}\tag{1-2-7b}$$

如 $G'=40\mathrm{dB}$ 时，$\dfrac{P}{P_0}=10000$，光功率是原光功率的 10000 倍。一般地，器件的增益随波长而变，增益与波长之间的变化曲线常被称为增益曲线或增益谱。影响增益谱的因素有

①为了保证通信质量，采用舍去末位的近似方法。

多个方面。泵浦方式与介质能级间的弛豫过程是决定增益谱的重要因素。增益介质几何结构等也对增益谱有一定的影响。

【例 1-2-2】有一个两端面几乎平行、长为 L、折射率为 n、单程材料增益为 G_S 的固体材料构成法布里-珀罗(F-P)腔。设固体界面与空气间的反射率为 R。求证：最终增益为 $G=\dfrac{G_S(1-R)^2}{(1-G_SR)^2+4RG_S\sin^2\left(\dfrac{2\pi nL}{\lambda}\right)}$，式中，$\lambda$ 为真空中的波长。

证明：设入射光波为

$$\vec{E}_{in}=\vec{E}_0\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t)\right]$$

如图 1-2-1 所示，设光波透入激活介质的透射系数为 t，从激活介质透出的透射系数为 t'，激活介质向内的反射系数为 r。则由几何光学的知识可知

$$tt'=1-r^2=1-R \tag{1-2-8}$$

式中，R 为激活介质向内的反射率。设增益介质长 L，光波单程振幅增益为 g_S，于是光波射出增益介质的光矢量依次为

$$\vec{E}_1=t\vec{E}_0\cdot g_St'\cdot\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-\beta L)\right]$$

$$\vec{E}_2=t\vec{E}_0\cdot g_S^3r^2t'\cdot\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-3\beta L)\right]$$

$$\vec{E}_3=t\vec{E}_0\cdot g_S^5r^4t'\cdot\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-5\beta L)\right]$$

……

将上面多个式子相加，得输出相干叠加的光矢量为

$$\begin{aligned}\vec{E}&=t\vec{E}_0\cdot g_St'\cdot\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-\beta L)\right]+t\vec{E}_0\cdot g_S^3r^2t'\cdot\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-3\beta L)\right]\\&\quad+t\vec{E}_0\cdot g_S^5r^4t'\cdot\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-5\beta L)\right]+\cdots\\&=tt'\vec{E}_0\cdot g_S\cdot\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-\beta L)\right]\cdot\left\{1+g_S^2r^2\cdot\exp\left[\mathrm{j}(-2\beta L)\right]+g_S^4r^4\cdot\exp\left[\mathrm{j}(-4\beta L)\right]+\cdots\right\}\\&=tt'\vec{E}_0\cdot g_S\cdot\frac{1}{1-g_S^2r^2\cdot\exp\left[\mathrm{j}(-2\beta L)\right]}\cdot\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-\beta L)\right]\end{aligned}$$

设单程功率增益为 $G_S=g_S^2$，于是，利用式(1-2-8)可将上式化为

$$\vec{E}=(1-R)\vec{E}_0\cdot\sqrt{G_S}\cdot\frac{1}{1-RG_S\cdot\exp\left[\mathrm{j}(-2\beta L)\right]}\cdot\exp\left[\mathrm{j}(2\pi\nu t-\beta L)\right]$$

于是，增益

$$G=\left|(1-R)\cdot\sqrt{G_S}\cdot\frac{1}{1-RG_S\cdot\exp\left[\mathrm{j}(-2\beta L)\right]}\right|^2=\frac{G_S(1-R)^2}{(1-G_SR)^2+4RG_S\sin^2\left(\dfrac{2\pi nL}{\lambda}\right)} \tag{1-2-9}$$

结论得证。

光在一般的介质中传播时，强度会逐渐下降。光的这种光功率的衰减现象可用损耗(Loss)来定量描述。