

图书在版编目 (CIP) 数据

光电子技术入门/倪星元等编著. —北京: 化学工业出版社, 2008. 5

ISBN 978-7-122-02646-0

I. 光… II. 倪… III. 光电子技术 IV. TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 056914 号

责任编辑: 丁尚林

文字编辑: 孙 科

责任校对: 吴 静

装帧设计: 周 遥

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 装: 北京市兴顺印刷厂

850mm×1168mm 1/32 印张 $7\frac{1}{4}$ 字数 189 千字

2008 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: 22.00 元

版权所有 违者必究

前 言

光电子技术作为一门研究光与物质相互作用而发展起来的新兴学科，已经成为现代科学的一个极为重要的组成部分，以光电子技术为基础的光电信息技术是当前最活跃的技术之一。

光电子技术是研究从红外波、可见光、紫外光、X射线直至 γ 射线波段范围内的光波电子技术，是研究运用光子和电子的特性，通过一定媒介实现信息与能量转换、传递、处理及应用的科学。毫无疑问，光电子技术是光学和电子学发展的高级阶段，也是高技术领域内的先导和核心。光电子技术以光电子学为理论基础，以光电子元、器件为主体，综合利用了光、电、机、计算机和材料等多方面的技术，实现了诸多全新的功能。与电子技术相比，光电子技术具有频谱更宽、信息容量更大、传输速度更快、抗电磁干扰能力更强的特点。

众所周知，光电子技术已渗透到各行各业，并在科学技术、军事装备、工农业生产、交通、邮电、天文、地质、医疗、卫生等国民经济各个部门发挥着重要的作用，在人们的日常生活中也到处可见光电子技术的应用。光电子技术对经济发展、生活质量提高的影响是非常深远的，它所产生的经济效益远远超过光电子产业本身的产值。

光电子技术以其独特的优点——极快的响应速度、极大的带宽与信息容量、极高的信息效率推动着信息科学技术的发展，具有越来越强的竞争力。光电信息产业已成目前世界上最具有代表意义的主导产业。现代信息技术的发展和科技进步需要培养一大批掌握光

电子技术的专业人才，也迫切需要普及光电子技术方面的知识，本着这样的宗旨我们编写了《光电子技术入门》一书。

本书简要概括了光学、电子学、电磁学、晶体学、材料学等多方面的基础知识，以及发光源、激光、光电显示、光电变换、光纤和光传输及光电子技术的应用等知识；从基本原理入手，系统讲解了光电子技术的基本概念、基础知识和各种器件的特性与应用。各章节的编排以及章节内容的安排既注重知识之间的有机联系，又考虑了各自的独立性。

本书取材广泛，叙述深入浅出，通俗易懂，特别还兼顾了非专业人员的特点，便于自学。既可作为新进入光电子行业的专业人士的入门教材，也可作为非专业人员及企业管理人员了解光电子技术的科普读物。

编著者

2008年4月

第 1 章 绪 论

1.1 光电子技术与人们的生活

从人们各自手中的移动电话到家里客厅中的电视机，到办公场所的电话、电脑、打印机、复印机、传真机，这些都是光电子技术产品。这些所谓的光电子技术产品都离不开光学技术和电子学技术，因此是光学技术和电子学技术密切结合的产物。

首先来说说光和光学。人们的生活离不开光和光学，地球上可以采集的 99.98% 的能源都来自太阳能，太阳以“光”的形式抚育大地，施恩于人类。光不仅给了人们生存的能量，同时也是诸多信息的载体。从物质的角度来看，光是一种频率范围很广的电磁波，但人类肉眼所能感受到的光，其波长仅局限在称为可见光的极狭窄范围内，一门称之为光学的学科正是为此而形成和发展起来的。

光学是物理学的一个分支。光学是以人类具有的视觉作为出发点，把若干个世纪以来观察到的物体的明暗和颜色、空间图像等各种各样的光现象加以正确采集、探索和总结，进而记录、再现和显示等发展而来的。经典光学以电磁辐射本身为研究对象，近代科学技术的发展使光与物质的相互作用成为更重要的研究内容。目前，光学已渗透到人们生活的每一个细节，渗透到各个科学技术与应用领域，成为一门蓬勃发展的新兴技术，并产生了无数的对人们生活来说难以或缺的用品，不少分支已形成具有相当规模的新兴产业。

在当今世界人们的生活与电和电子学已经变得密不可分。与光学相同，电子学也是建立在电磁学的基础上发展起来的。与光学

不同的是电子学并不能直接来自人类感官（如视觉）的感觉，而是应用人类知识活动所产生和积累的知识，从 19 世纪末期开始酝酿建立了这种称为电磁学的学科体系。从 1949 年晶体管诞生起，电子学和电子技术开始了具有革新意义的飞跃。电波的波长比可见光长得多，且具有相干性，电子学在实际应用上已形成了大容量的信息传输、信息处理、信息记忆和数据演算等强大的技术体系，电子学的发展使人类的生活质量和生产效率的提高产生了难以估量的飞跃。

考虑到这两种学科技术领域各自所拥有的优点，如果能互相吸收这些优点并加以巧妙结合的话，不就可以实现更为优异的性能和具有更新和更广泛的效能吗？于是光电子学及相应的光电子技术逐渐形成了，光电子学是光学与电子学相结合的产物。20 世纪 60 年代以前，虽然对光电现象的研究已有了相当的成就，也出现了不少实用的光电子器件，但光学和电子学基本上仍然是两门独立的学科。

随着信息化社会的到来，对在扮演尖端技术角色的微电子器件如何实现更快的速度和更小的耗能及更大的容量提出了要求。由于 20 世纪 60 年代激光的出现，人们对光与物质相互作用过程的研究呈现出了空前活跃的状态，导致了半导体光电子学、导波光学、非线性光学等一系列新学科的涌现。经过几代人的努力，不仅光电子学和光电子技术得到了广泛而深入的发展，还发明和产生了大量服务于人类的先进的光电子器件和产品。到了 20 世纪 70 年代，光纤、半导体激光器和接收光元件等的生产技术有了惊人的进步，加速了光电子学的发展，其潜力大大出乎当时人们的预料之外。

再回到生活中，可以清楚地看到光电子技术给人们的工作和生活带来的影响。移动电话、电脑和电视机等的显示屏是光电子器件，用到的是光电子显示技术；传真机、复印机、扫描仪及自动照相机等，它们中的关键部件是光电传感器，用到的是光电子转换技术；电话机和电信网络中进行长距离对话和信息交流的载体——光纤也是光电子产品，用到的是光纤、激光等一系列复杂的光电子技

术；在今天，人们已经从光盘的实用化中体验到高密度信息记录给人们生活、工作和学习带来的巨大实惠，这涉及到的是激光存储、传输等光电子技术；利用光的双向传输性，光电子技术已被扩展到能将图像、影像信息相互进行通信的可视化电视多媒体等应用领域，构筑了使用光纤通信以及卫星通信的信息高速公路，通过局域网和互联网编织成了全球通信网；在能源危机日益威胁到人类生存和发展的今天，太阳能光电池提供了化解这一危机的新的出路，太阳能电池作为光电子技术及其产品，正日益显现出其巨大的生命力。

综上所述，可以毫不夸张地说，在当今的时代光电子技术已经逐步深入到人们日常生活和工作的每一个细节，深刻地影响着人们生活及工作的质量和效率，并且将进一步推动人们的生活向着更优质的灿烂前景发展。

1.2 光电子技术和器件

从光电子技术研究初期开始，人们就总是在不停地探索和开拓其应用价值时，特别更多考虑的是军事及武器方面的应用，为此投入了大量的人力、物力和财力。20世纪50年代末，美军将光电探测器用于空-空导弹，取得了明显的作战效果。之后，美、英、法等国相继开发了多种波长的红外光电探测器组件、红外焦平面阵列等，广泛应用于夜视、侦察、扫描、火控、制导等系统。自20世纪60年代起开创了激光技术到现在，激光器的波长覆盖了从软X射线到远红外的各个波段，最高的峰值功率可达 10^{14} W的量级，最高的平均功率可达到兆瓦级。在激光脉冲输出性能大为提高的同时，其结构、工艺日趋成熟，稳定性、可靠性和可操作性显著改进，因此进一步扩展了其应用领域。

总之，由于光电子技术带来的优异性能特征越来越多地被发掘，这使得它具有越来越大的实用价值和应用范围，概括如图1.1所示。

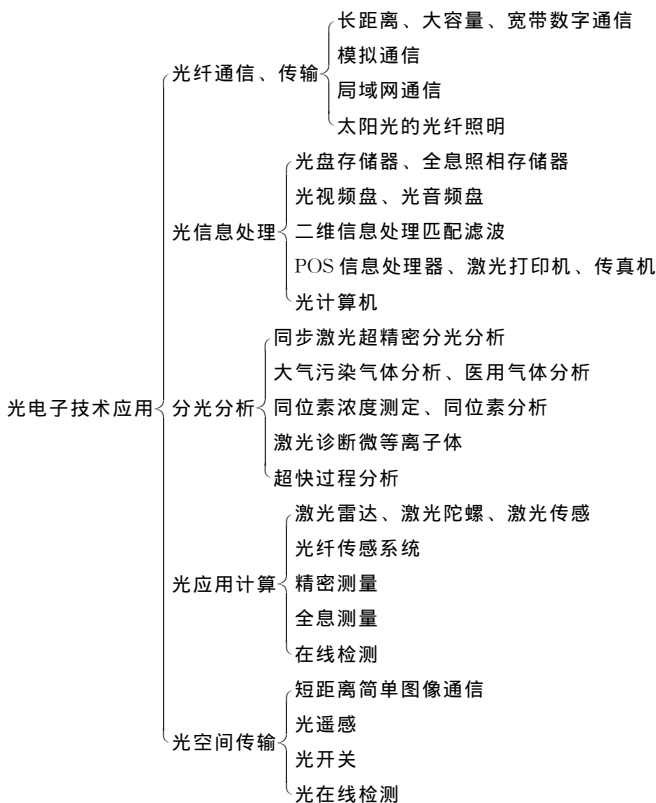


图 1.1 光电子技术的应用

光电子技术各个方面的应用特点大概可以归纳如下。

① 光纤通信 从信息传输的角度看，光波与电波相比具有近乎无限的带宽，利用光纤进行信号传输，由于光纤微小的传输损耗，使得其在长距离、大容量、超高速通信和信息处理中成为主体。

② 光存储 半导体材料激光器体积小，驱动功率也小，可以对衍射极限尺寸的微光斑进行聚焦，可以制成小型、大容量的光存储装置，利用激光的并行性十分有利于二维、三维图像信息的存储与处理。

③ 光计算机 利用光电子技术中的弱光激发和三次非线性等现象可实现光学双稳态，在光计算机上有重要的价值。

④ 在线检测 根据光波具有直线传播的性质和定向性，利用光电子技术可以进行非接触式测量和控制，也可以在有电磁场感应噪声干扰的环境中进行有效的在线传输、测量和控制，并可实现在线检测。

⑤ 危险环境测量 随着光纤技术的发展，可以方便地利用光纤直接对正在运行的有危险的设备进行信息的传输、测量和控制，即使在使用高电压的机器内部和外围设备上也不会引起绝缘的破坏，而且在易爆的气体、液体、固体等物质或环境中都不会有产生电火花危险，可以确保地进行通信、测量和控制。

⑥ 激光医学 光电子技术中采用的光纤，其耐热、耐潮性高，芯径细，柔性好，使得进入人体的血管、内脏、器官内部进行测量和治疗成为可能；激光输出的焦点小，适合作角膜焊接、激光碎石等；由于热效应好，还适合作穴位治疗仪等。

⑦ 激光加工 激光的方向性好，单位能量密度极高，可以方便地进行激光加工，施行切割、打孔、焊接等工艺操作。高功率的强激光还可用于激光可控核聚变等。

⑧ 军事应用 光电子技术可用于精确制导、侦察、瞄准、跟踪、监测、频谱分析等军事活动。

⑨ 遥感测量 光电子技术利用激光不仅可以改变振幅、相位、偏振，而且还可以改变频率，因而可以进行物质的光谱分析，以此还可以进行遥感测量。

⑩ 光传感 光电子技术利用光波的直线传播性质、光调制的非接触性、光纤的柔韧性以及各种光调制性质，可以制作温度、湿度、位移、加速度光传感器，特别是各类小型轻便的光纤型传感器备受瞩目。

⑪ 精密计量 光波长为微米量级，因此十分适合进行距离、时间等数据的精密计量。

上述各光电子技术的应用，需要依靠各类光电子器件来实现。

电子技术经过 100 多年发展已产生了比较完善的电子器件，并已实现了高度集成化，而光电子技术从激光出现以来仅有 40 多年历史，正处在发展期，有关器件尚不完善，集成化也仅在探索之中，因此发展空间很大。

由光电子器件组成的光电子信息系统按信息传递的各个环节来划分，应包括光电子发射源、光的控制或信号加载模块、光信号的传输体系、光信号的接收和处理装置等几个基本部分，每一部分都存在一个或数个光电子器件分别执行各自的功能。根据功能不同可以将光电子器件分为光源器件、光传输器件、光控制器件、光探测器件、光存储器件等几大类，如图 1.2 所示。

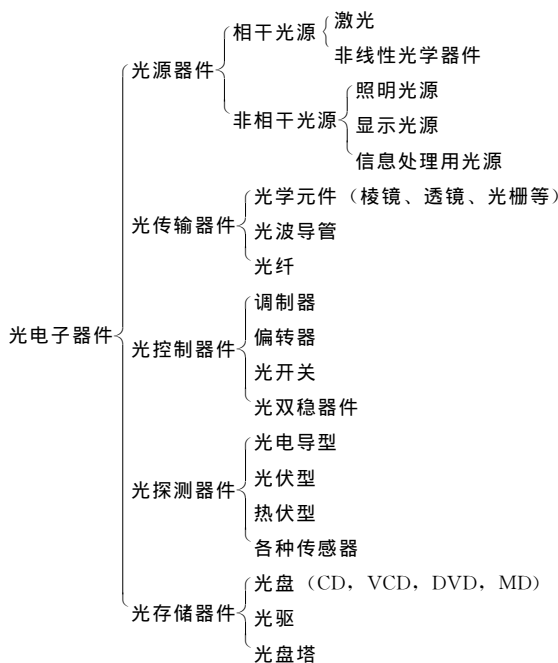


图 1.2 光电子器件

在光电子技术中光源器件包括发光元件和波长转换元件，波长转换元件还可以包含全光学型的器件，即输入和输出都是光波的器

件，在信息光电子技术中，光源主要指各种激光器，特别是半导体激光器；光控制器件涉及了开关、偏转、调制、传感等功能器件；光传输器件包括光波导管、光纤、光耦合器、光隔离器、偏振器、中继和反馈器件等；光探测和显示技术涉及光信号的解调、整形、放大、探测和显示等光电子器件；光存储器件的主要功能是信息的写入、储存、读出等。

1.3 日益进步的光电子技术

图 1.3 所示的是新兴的光学工程和光电子技术的应用领域，显示了光电子学和光电子技术在人类文明进程中发挥的重要作用。从图中可以看出，光电子技术已经涉及到了人类生产、生活以及可持续发展的各个方面，比如绿色能源技术、光电子信息及通信、光电

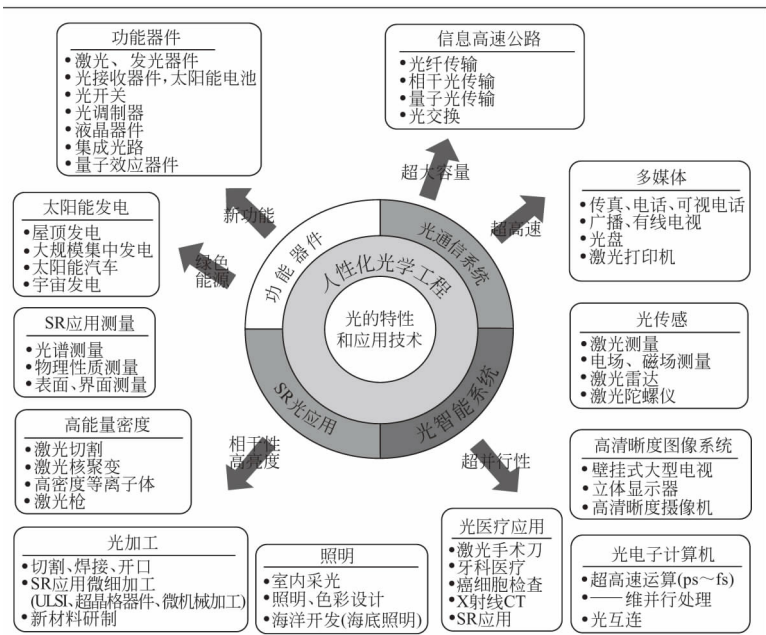


图 1.3 新兴的光学工程和光电子技术的应用领域

子加工技术、光电子测量技术、光电子医疗技术等。

从前面的叙述中已经看到光电子学和光电子器件的一个非常重要的应用领域是与能源和光源有关的。在新能源和高功率密度光源领域内，科学家通过不断研究和努力开发，探求太阳能发电、激光加工、激光核聚变、光纤照明、激光医疗等新的应用。其中，太阳能发电可以有效地解决化石燃料枯竭和地球环境污染的问题，所以成为了绿色能源的首选，被寄予了厚望。此外，激光的高能量密度的特性已经在激光加工、激光手术医疗、激光切割、新材料和新工艺的开发和研制等领域内得到越来越广泛的应用。通过同步加速器的同步辐射（SR）所产生的被称为神奇之光的高亮度 X 射线，可以进行微量元素分析和蛋白质结构分析，还可以对各种材料进行特性测量。另外，利用 SR 光的焦点深和精度高两个特点，SR 光的应用技术正在不断地推广到微机械加工等精加工领域。

根据光电子学和光电子技术的特性，相关的科学家还开发了各种各样具有新功能的装置，包括更高容量、更快速度、更安全的信息处理与信息传输等，这些新研发的装置将成为 21 世纪高新技术的重要标志。“光”是高频率的电磁波，可以快速传输。最近，由此产生了 10^{-7} s 的非常短的光脉冲，使得超高速光电子计算机、平面图像并行处理的超高速信息处理器、超大容量存储器等新技术相继问世。此外，还有新的光电子技术利用激光的相干性，光波携带高密度信息进行传输的光通信，使更大容量信息传输成为了可能。新的光电子技术将在已有的光盘基础上实现更高密度信息的记录和存储。光电子技术利用光的双向传输性，已经实现了把图像、影像信息和通信融合为一体的可视电话等多媒体应用，而且，还可以构筑使用更高水平的光纤通信和卫星通信的信息高速公路，通过局域网和互联网编织成全球通信网。

从物质文明的角度来看，20 世纪日新月异的进步极大地丰富了人们的日常生活。但是，从另一个角度来看，物质文明的建设大量消耗了化石燃料，也导致了森林和海洋资源等自然界留下来的遗产面临枯竭，以至于地球环境的破坏达到了非常严重的程度。在

21 世纪高度文明的建设中，需要努力保护包括人类自身在内的整个生态系统的循环周期，要根据生态平衡的理念，将生活方式转移到追求更合理、更舒适的文明生活中来。从利用环保能源的角度来考虑，除了通过上述的太阳能发电来防止污染之外，在视觉信息上要增加心理学感性因素，制作出使人们感到舒适的具有高雅气息的影像资料，通过颜色和影像信息控制生理上的活力，真正营造出人性化光学工程这一新的领域。

第 2 章 光电子技术的基础光学知识

2.1 光的基本属性——波粒二重性

光学作为一门学科的真正发展约在 17 世纪，由 1621 年斯涅尔发现光的折射定律，与早先发现的光的直线传播定律和反射定律一起构成了几何光学的基础。与此同时，关于光的本性问题的研究和讨论很多，最终可以归纳为两种不同的学说：一种是以牛顿 (Newton) 为代表的微粒理论，另一种是以惠更斯 (C. Huygens) 为代表的波动理论。

微粒理论认为，光是由发光体发出的光粒子（微粒）流所组成的，这些光微粒具有质量，与普通的实物小球一样遵从相同的力学规律。而波动理论则认为，光和声一样是一种波动，是由机械振动的传播引起的一种波动。尽管这两种学说都能解释光的反射和折射现象，但是，在解释光线从空气进入水中的折射现象时，微粒理论需要假设水中的光速大于空气中的光速，而波动理论则需要假设水中的光速小于空气中的光速。由于当时人们还不能准确地用实验方法测定光速，因而难以根据折射现象去判断这两种学说的优劣。但由于牛顿在科学界的崇高威望，使得光的微粒理论在很长一段时间内占据着统治地位。

19 世纪初，杨 (T. Young) 和菲涅耳 (A. J. Fresnel) 等人在研究光的干涉、衍射和偏振等现象时，发现波动理论可以解释这些现象，而微粒理论则无能为力。1850 年，佛科 (J. B. L. Foucault) 用实验方法测定了水中的光速，证实水中的光速小于空气中的光速。这些事实都为波动理论提供了重要的实验论据。

19 世纪 60 年代，麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 建立了电磁场理论，并认为光是一定频率范围内的电磁波，具有一般电磁波的波动特性，为波动学说建立起了更为坚实的理论基础。

但是，从 19 世纪末到 21 世纪初，人们又陆续发现了一系列波动理论难以合理解释的现象，如黑体辐射、原子的线状光谱和光电效应等。以后，人们在努力解释有关光和物质相互作用的现象时，越来越多地认识到必须承认光具有粒子特性。1900 年普朗克 (M. Planck) 提出辐射的量子理论，1905 年爱因斯坦 (Einstein) 发展了普朗克的量子化假设，形成了一种全新意义的光子学说。这个光子学说的理论认为，光是由具有一定能量和动量的粒子所组成的粒子流，这种遵从崭新量子力学规律的粒子称为光子。于是，人们对光具有波动和粒子的双重性质，即光具有波粒二重性取得了较普遍的共识。

2.2 光的波动性

光具有波动性，其波动特性符合电磁波的特征。1864 年麦克斯韦发表了“电磁场的动力理论”这一著名论文，建立了描述电磁场变化规律的麦克斯韦方程组及相关的理论。1887 年赫兹 (H. Hertz) 应用电磁振荡的方法证实了电磁波的客观存在，并证明了电磁波和光波具有共同特性。电磁场理论认为，光实际上是一定频率范围内的电磁波，电磁波的传播实际上就是将变化的电磁场进行传播。若在空间某区域有变化电场 (或变化磁场)，那么将在邻近区域引起磁场的变化 (或电场的变化)，这种变化的电场和磁场相互激发、相互感生，由近及远以有限的速度在空间传播，形成电磁波。

与此相关的电磁场的基本性质如下。

① 在电磁场中，电场矢量 E 、磁场矢量 H 和传播方向 k 三者相互垂直。 E 、 H 和 k 三个矢量的方向成右手螺旋关系。

② 电磁波是横波，沿给定方向传播的电磁波， E 与 H 的振动方向都是在各自垂直于传播方向 k 的平面内，这一特性称为偏振性。

③ 空间各点 E 和 H 都作周期性变化，并且它们的相位相同。

④ 电磁波在真空中的传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.1)$$

式中, ϵ_0 为真空中的介电常数; μ_0 为真空中的磁导率。在国际单位制中, 指定 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 由精密测定 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, 推算得 $c \approx 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

电磁波的波谱范围很广, 包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和 γ 射线等。这些电磁波从波动特性的角度、本质上完全相同, 只是波长不同而已。真空中电磁波的波长 λ 与频率 ν 的关系为

$$\lambda = c/\nu \quad (2.2)$$

真空中电磁波的传播速度 $c \approx 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为常量, 所以频率不同的电磁波在真空中具有不同的波长。频率越高, 对应的波长就越短。按照电磁波频率或波长的顺序可以排列成电磁波谱图, 如图 2.1 所示。

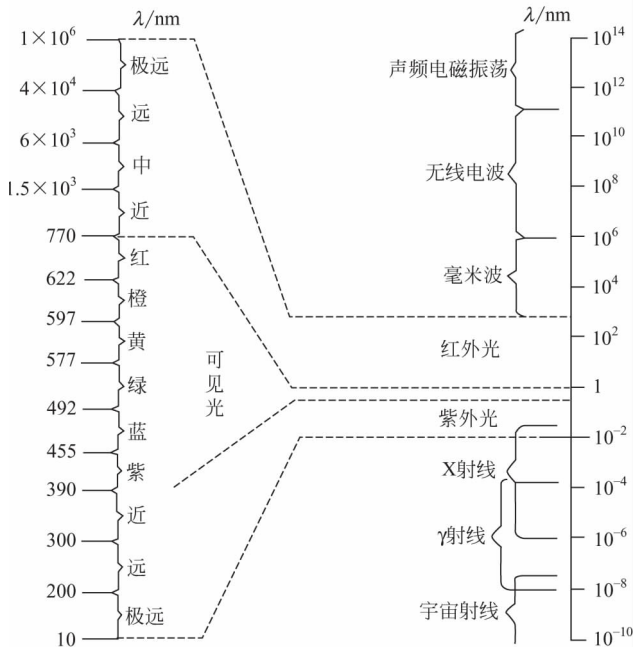


图 2.1 电磁波谱图

表 2.1 列出了电磁波的形成、波段划分及应用，涵盖了目前已经发现并得到广泛应用的不同波长的各类电磁波。下面对各种不同性质的电磁波分别作简单的介绍。

表 2.1 电磁波的形成、波段划分及应用

电磁波谱		主要形成手段	波长范围	频率范围/MHz	目前的主要应用	
无线电波	长波	电子线路	3~30km	0.01~0.1	越洋长距离通信、导航	
	中波		200m~3km	0.1~1.5	AM 广播、电报通信	
	短波		10~200m	1.5~30	AM 广播、电报通信	
	超短波		1~10m	30~300	FM 广播、电视、导航	
	微波	行波管、调速管、磁控管	1mm~1m	300~3×10 ⁵	电视、雷达、导航	
光波	红外线	热体	激光	0.76μm~1mm	3×10 ⁵ ~4×10 ⁸	雷达、导航、光纤通信
	可见光	电弧灯		0.4~0.76μm	(4~7.5)×10 ⁸	
	紫外线	汞灯		0.03~0.4μm	7.5×(10 ⁸ ~10 ¹⁰)	医用、照相制版
X 射线	X 射线管		0.1nm~0.03μm	10 ¹⁰ ~3×10 ¹²	医用、探伤、物相分析	
γ 射线	加热器		1.0pm~0.1nm	3×(10 ¹² ~10 ¹⁴)	探伤、物相分析	

波长超过 1mm 的电磁波统称为无线电波，其频率不超过 300MHz。除了自然界本身具有的以外，通常研究和使用的无线电波主要是由包括各类晶体管等元器件制作的特定的电子线路产生的，因此频率的纯度可以很高。通过对电子线路进行调制，可用来承载和传递各种信息。无线电波已被广泛地应用于无线电广播、电视、移动电话、卫星转播和雷达等众多领域，已经成为日常生活中不可或缺的东西。

无线电波无法用肉眼直接看见，而可见光却是肉眼就能见到的。可见光其实也是电磁波，但只占整个电磁波谱中很小的一部分，只有波长范围在 0.4~0.76μm 之间的电磁波能使人眼产生光的感觉。不同波长的电磁波对人眼所呈现的效果各不相同，随着波长的缩短，呈现的感官效果，也可称为“颜色”，依次为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。人们日常感受到的白光则是各种颜色可见光

的混合，也是 $0.4\sim 0.76\mu\text{m}$ 之间的电磁波的混合。

红外线波比人们所见到的红光的波长更长，人的眼睛一般看不见，其波长范围在 $0.76\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 之间。它可进一步按照波长由短到长被细分为近红外、中红外、远红外和极远红外几个部分。尽管人们的眼睛看不见红外线，但能以温度的形式感觉到部分红外线的存在。自然界中凡是温度高于绝对零度的物体都会发射出各自特定的红外线，这个特性对于观察和测定肉眼看不见的对象具有特殊的意义。利用目标和背景温度及物体发射红外线能力的差异可做成各种红外线传感仪器，对目标进行探测、跟踪、搜索及成像，并能直接反映物体的温度分布、空间方位及运动状态等若干特征参量。目前红外技术已被广泛应用于军事、科学研究、工农业生产、医学和日常生活等各个领域。

紫外线波比所见的紫色光的波长短，同样人们的眼睛也看不见，其波长范围在 $0.03\sim 0.4\mu\text{m}$ 之间。它也可以进一步按照波长由长到短细分为近紫外、远紫外和极远紫外三部分。炽热物体的温度很高时，除了辐射红外线外还会辐射紫外线。太阳光中有大量紫外线，人工制造的汞灯中也能发射出大量紫外线。紫外线有显著的化学效应和荧光效应，可用于医疗杀菌和照相制版等行业。

比紫外线的波长更短的电磁波称为 X 射线，其波长范围在 $0.1\text{nm}\sim 0.03\mu\text{m}$ 之间。除了自然界本身具有的以外，可以用高速电子流轰击原子中的内层电子而产生 X 射线，从 X 射线管发射出来。X 射线由于波长短，具有很强的穿透能力，它透过各种物体的本领与组成物质的原子量有关。另外 X 射线还具有使胶片感光，使荧光屏发光的特殊能力。利用 X 射线的这些性质可透视人体内部的病变，可检查金属部件的内伤和分析物质的晶体结构，并留下可供查阅的照片。

波长在 $1.0\text{pm}\sim 0.1\text{nm}$ 之间的电磁波称为 γ 射线。 γ 射线是放射性原子衰变或用高能粒子与原子核碰撞时所发出的一种波长极短的电磁波。 γ 射线作为一种更具穿透力的放射线，常用于更高要求的金属探伤和对原子核结构的探测及研究。