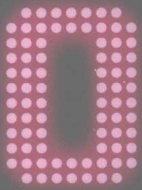




光纤照明 及应用

 *Optical Fiber Lighting
and Application*

江 源 殷志东 编著



化学工业出版社

光纤照明 及应用



*Optical Fiber Lighting
and Application*

江源 殷志东 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是国内第一部系统论述光纤照明的专著，是一本实用性较强的图书，其内容涉及照明光纤、照明光源和照明设计。本书不仅从光纤的角度阐述了照明用石英光纤、多组分玻璃光纤、聚合物光纤和液芯光纤特性，总结了照明光纤的制备工艺、光纤套塑成缆工艺及光纤传光束的制备工艺，并分析了影响光纤传光束的传光照明特性因素，着重论述了光纤传光束的敛集率、填充率及光纤与光源的耦合；而且，还从照明角度介绍了光纤照明用卤钨灯光源、金卤灯光源和发光二极管 LED 光源的性能及点光源、线光源和面光源的特征，综述了光纤照明的原理、特征及其发展史，概述了光纤照明设计原理，并涉足了光纤照明灯头的设计，详细列举了光纤照明在灯箱显示照明、博物馆文物照明、建筑景观照明、广场照明、室内照明装饰、室外照明、汽车照明、成像照明、医学照明和太阳能采光照明系统中的应用。

本书可供照明专业本科生、光纤生产技术人员、从事光纤照明及照明装饰行业相关人士使用参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤照明及应用/江源，殷志东编著. —北京：化学工业出版社，2009.2

ISBN 978-7-122-04064-0

I. 光… II. ①江…②殷… III. 光学纤维-照明
IV. TM923

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 180550 号

责任编辑：夏叶清 张 琼
责任校对：徐贞珍

文字编辑：林 丹
装帧设计：史利平

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：北京云浩印刷有限责任公司

装 订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 24½ 彩插 8 字数 745 千字 2009 年 3 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：78.00 元

版权所有 违者必究

要有光，便有了光，这不再是梦想。

先有电光源，后有光纤，然后才诞生了光纤照明，光纤照明是光源与光纤的组合。所谓光纤照明就是光纤同光源耦合，光纤将光源输出光传输至指定的位置，实现点、线和面不同形式的照明。光纤照明不仅包括可见光照明，而且还包括紫外光照明和红外光照明。

国外在 20 世纪 60 年代开始关注光纤照明，中国是在 20 世纪 70 年代末开始研究光纤照明的。光纤照明不仅可实现装饰照明，营造美轮美奂的意境，还可实现指示照明、背光照明、传感照明和传像照明等，中国第一个有报道的光纤照明使用在毛主席纪念堂，这是因为光纤照明可实现冷光照明。光纤照明还有许多其它优点，这些优点都有力地促进了光纤照明应用领域的不断拓展。

光纤照明不是常规意义上的电光源照明，光纤照明是现代照明技术的一个补充和完善，并将促进现代照明技术的发展。在倡导绿色照明的今天，光纤照明是实现绿色照明的一个重要方式，在充分利用太阳采光照明系统中，将紫外光和红外光转化为可见光，利用光纤实现光纤照明是一个重要研究方向。

仅有光纤专业知识是不能做好光纤照明的，仅有光源专业的知识也是不能做好光纤照明的，还需要掌握照明设计，才能做好光纤照明。因此，本书一方面从光纤的角度阐述了照明用石英光纤、多组分玻璃光纤、聚合物光纤和液芯光纤特性，总结了照明光纤的制备工艺、光纤套塑成缆工艺及光纤传光束的制备工艺，并分析了影响光纤传光束的传光照明特性因素，着重论述了光纤传光束的敛集率、填充率及光纤与光源的耦合。另一方面，本书从照明角度介绍了光纤照明用卤钨灯光源、金卤灯光源和发光二极管 LED 光源的性能及点光源、线光源和面光源的特征，综述了光纤照明的原理、特征及其发展史，概述了光纤照明设计原理，并涉足了光纤照明灯头的设计，详细地列举了光纤照明在灯箱显示照明、博物馆文物照明、建筑景观照明、广场照明、室内照明装饰、室外照明、汽车照明、成像照明、医学照明和太阳能采光照明系统中的应用实例，以期光纤照明的设计应用者提供设计参考，并希望读者融会贯通地掌握光纤照明的精髓。

到目前为止，本书是国内第一部系统介绍光纤照明的专著，其内容包括光纤照明原理、光纤及其传光束的制备工艺和光学性能测试、光纤照明的应用三部分，其中殷志东撰写了第 2 章的石英光纤特性和液芯光纤特性、第 3 章的石英光纤制备工艺和第 5 章，本书的其它内容由江源撰写。此外，还要感谢南京玻璃纤维院的徐明泉、陆小建、张振远、马永红、陈莉、朱云青、唐璐、黄旺、李泽财和李莉在本书撰写中提供的帮助，感谢西南大学的刘德森教授和重庆大学的陈仲林教授的指教。同时，本书还引用了许多文献，在此对引用文献的作者表示感谢。

最后，期望阅读本书的人能指出文中的不足之处，因为您的斧正，本书才更加完善。

江源
于石城南京
2008 年 11 月

第一部分 光纤照明原理

1

第 1 章 光纤照明的基本原理	1
1.1 照明及光纤照明的历程	1
1.2 光纤照明的基本原理	9
1.3 光纤照明的特点及其应用	18
1.4 照明的几个概念	22
参考文献	33
第 2 章 照明光纤的种类及其特性	36
2.1 石英光纤的特性	36
2.2 多组分玻璃光纤特性	42
2.3 聚合物光纤特性	45
2.4 液芯光纤特性	63
2.5 光源照明特性	65
2.6 光纤照明设计	80
参考文献	91

第二部分 光纤及其传光束的制备工艺和性能测试

94

第 3 章 照明光纤的制备工艺	94
3.1 多组分玻璃光纤制备工艺	94
3.2 石英光纤制备工艺	99
3.3 聚合物光纤制备工艺	103
参考文献	121
第 4 章 光纤传光束的制备工艺及其特性	123
4.1 光纤套塑成缆工艺	123
4.2 光纤传光束的制备工艺	141
4.3 光纤传光束的敛集率和填充率	149
4.4 影响光纤传光束的传光特性因素	158
4.5 光纤照明用灯头及其设计	165
参考文献	171
第 5 章 照明光纤的光学性能测试	174
5.1 光纤损耗的测量	174
5.2 光纤透光率的测量	174
5.3 数值孔径和孔径角的测量	175

第 6 章 光纤照明用光源	177
6.1 卤钨灯	180
6.2 金属卤化物灯	185
6.3 发光二极管	202
6.4 激光器	214
6.5 荧光灯	223
6.6 其它电光源	229
6.7 光纤照明用光源	236
参考文献	250
第 7 章 光纤的耦合和连接技术	254
7.1 光源与光纤的耦合	254
7.2 光纤与光纤的连接	261
参考文献	264
第 8 章 光纤照明的应用	265
8.1 光纤在博物馆文物照明中的应用	265
8.2 聚合物光纤在天花吊顶的应用设计	279
8.3 垂帘光纤在室内照明装饰的应用	288
8.4 聚合物光纤在灯箱显示照明的应用	294
8.5 聚合物光纤在广场照明中的应用设计	302
8.6 光纤在建筑景观照明中的应用	312
8.7 光纤在室外照明的应用	323
8.8 光纤在室内照明装饰的应用	331
8.9 光纤在汽车照明中的应用	336
8.10 光纤在成像照明中的应用	341
8.11 光纤在仪器设备照明中的应用	353
8.12 光纤在医学照明上的应用	359
8.13 光纤在太阳能采光照明系统中的应用	370
参考文献	383

第一部分

光纤照明原理

第1章 光纤照明的基本原理

1.1 照明及光纤照明的历程

20 世纪是照明光源发展的重要发展阶段，所谓光源就是能发光的物体。在这 100 年中，照明光源从第一代白炽灯和卤钨灯、第二代荧光灯、第三代高强度气体放电灯发展到第四代半导体固体光源，照明效率提高了 100 倍，光源发展的历史就是光效不断提高、寿命不断延长的历史，其中第三代高压气体放电光源包括高压汞灯、高压钠灯和金属卤化物灯等，第四代固体光源包括 LED 和 OLED 等，后一代光源比前一代光源光效高、节电和寿命长，这就是科技发展的力量。

1.1.1 照明的历程

因为有了太阳，才有照明；有了照明，才有光明，光是人类生存与发展的生命之源，光也改变了人类的生活方式。

据研究，在人类获得周围环境及生存的外界信息中，有 80% 是通过光刺激视觉得到的。而人类对照明灯具的使用，要追溯到原始人对篝火的发现和人类自身对照明的需求。

人类照明最初用的是篝火和火把，篝火是在野外架木材、树枝燃烧的火堆，火把也称单植枝烛，是指用单根植物枝条点燃来照明，篝火和火把没有专门的灯具。早在石器时代，人类开始有目的地使用火，用火取暖、烤熟食品，使用松明和人造火把（用动物油脂浸渍木条）作为光源，从而揭开了照明工程的序幕。到了中世纪，人工照明由简单的木柴蘸火演进到油灯和蜡烛，大约在蜡烛作为光源的时期出现了专门的灯具^[1]。火作为照明光源也在不断地演变，从火把、松节油火把、蜡烛发展到煤油灯。

人类的照明方式进入了“见光必见灯”的时代，火焰是唯一发出照明光线的来源，但各种火焰光源有如下缺陷：不安全、不可靠、不清洁，以及发光效率低下、功率太小和发光不稳，无法在火焰四周加上各种控制光分布的光学系统从而得到各种配光分布的灯具^[2]。

1558 年，巴黎街道上设置了装有松脂或木条的容器，天黑时点燃松脂或木条照明。1667 年冬季，在一些街道上改用油灯照明。

随着科学技术的发展，人类进入了电气照明时代，人造照明光源已经历了四个发展阶段：白炽灯、霓虹灯、气体放电灯和半导体固体光源，人造光源有效地避免了火焰光源的缺陷，在保持“见光就见灯”的同时，照明逐渐向“有光必有灯”的方向发展^[2]。

1792 年，William Murdock 发明了气体火焰灯，这种灯是在燃料燃烧之前先将燃料汽化，汽化后再进行燃烧，这种灯提高了燃料的利用率，还提高了火焰的温度，有效地将黑体辐射峰值向可见光谱区移动，从而增加火所发出可见光的效率，这种气体火焰灯被认为是人类利用火作为照明光源的最高水平^[3]。进入 19 世纪，人们开始使用煤气灯。

1802 年，理特发现紫外线，20 世纪 30 年代，第一只紫外灯管才被研制出来^[4]。

1802 年，俄国彼德罗夫教授首次论述了炭极电弧发光现象，并提出了弧光照明的观念，是人类关于电气照明的最早言论。1809 年，英国 Davy 矿灯的发明者——化学家 Humphrey Davy 进行了类似的炭极电弧发光试验，他的实验装置是炭极弧光灯的雏形。1842 年，法国人在弧光装置上加上钟表装置实现自动调节炭棒间距离，第一只炭极弧光灯诞生。不久，电弧灯就应用于

巴黎街道上。

1806年,美国巴尔的摩(Baltimore)市的街道采用汽灯照明。

1851年,英国伦敦海德公园落成了国际博览会展厅——水晶宫,夜晚以铸铁为支架的大玻璃罩屋面将室内光明透射到户外,使得整个建筑晶莹透亮,成为当时伦敦的一大景观,这也是最早的内透光夜景照明形式^[5]。

1854年,德国人 Heinrich Goebel 研制出第一只竹制炭丝真空玻璃灯泡。

1876年,俄国技师雅布洛奇可夫对弧光灯进行了重要改进,两根炭棒轮流作为阴阳极,保证了两根炭棒烧损速度相等,两根垂直的炭棒像蜡烛一样发光,燃烧时间为2h,俗称为“电烛”,其光效率达40~60lm/W,曾在法国巴黎取代了几万盏煤气灯,但其缺点是寿命短,辐射大量的紫外线,并释放有害气体,在白炽灯出现后,全部被淘汰。电应用于照明是从炭极弧光灯开始的,弧光灯的问世开辟了电气照明的新时代^[4]。

1878年,英国物理学家 Joseph Swan 研制出具有实用意义的真空白炽灯泡^[3]。1879年,美国发明家托马斯·爱迪生(Thomas Alva Edison)将钨丝白炽灯实现了商业化生产,从1878年到1928年,爱迪生申请了相关电灯的专利1000个,从此取代了传统的火焰光源,引发了一场照明技术的革命,开创了人类的电光源照明时代。一百多年来,白炽灯成了人们生活中必不可少的东西,但白炽灯用电能转换为光能的平均效率只有10%,其余90%的能量被浪费掉了,最初炭丝白炽灯光效只有1.4lm/W,寿命只有45h,其中碳丝是用棉线烧成的,后来改为由竹子烧成,寿命达1200h。1891年,荷兰皇家飞利浦电子集团(简称飞利浦公司)开始生产白炽灯泡。1906年,美国通用电气GE公司的库里基研制出钨丝白炽灯,钨丝灯的光效和寿命比碳丝灯又提高了一个水准,发光效率提高了3~4倍^[2];目前的白炽灯泡发光效率为14lm/W,寿命约1000~1500h。

1893年,霓虹灯诞生。1910年,法国科学家克洛德将其制造的第一只商业性霓虹灯安装在巴黎的皇宫大厦,1915年,他的霓虹灯发明专利授权,早期的霓虹灯充的是氖气(Ne)。20世纪30年代,研制出色彩丰富的荧光粉发光型霓虹灯,20世纪70年代,霓虹灯开始应用稀土三基色荧光粉。

城市泛光照明始于19世纪末,20世纪30年代出现第一个高潮。

1901年,美国工程师 Peter Cooper Hewitt 研制出水银灯并申请了专利,但水银灯发出的一种带蓝色的白光,其显色指数不高,曾用于道路照明和黑白影室摄影。

1906年,底库赫和雷欣斯凯发现了高压汞蒸气放电现象,而第一只高压汞灯的研制成功是在1935年,并开始大量用于道路照明^[2],但高压汞灯的光效和显色指数不佳。

1913年,美国通用电气(GE)公司兰米尔发明了功率大、寿命长、效率高的充氮气钨丝灯泡。后来兰米尔又把小直径灯丝圈成螺旋形,减少了热传导损失,并发明了小功率高效率的充氩气灯泡。

1917年,爱因斯坦提出了辐射的吸收及发射理论,这是激光技术的理论基础。

1923年,康普顿和范沃希斯点燃了第一只低压钠灯,1932年以后,低压钠灯进入市场,荷兰人开始在街道上用低压钠灯照明。1983年,改进型低压钠灯发光效率达200lm/W。

20世纪30年代,科学家开始研究光致发光机理;同期,研制出摄影用化学闪光灯。

1932年,飞利浦(Philips)公司推出气体放电灯——低压钠灯。

1936年,在居里夫人的巴黎实验室工作的乔治·优斯特里安发现了硫化锌在交变电场中的发光现象,这是一种电场激励发光的电光效应,称为电致发光或场致发光,简称EL(electroluminescence)^[6]。20世纪50年代初,科学家开始研究场致发光机理,1958年,研制出实用的场致发光板(EL光源)。

1935年9月,美国GE公司发明了GE Inman 荧光灯,它是由其研究人员 Inman 研制的,他突破了启动装置的设计与制作大关,制作出实用的荧光灯照明系统,这种荧光灯在水银灯管内壁涂上荧光物质。1938年,美国通用电气公司在纽约世界博览会展示了直径为38mm 荧光灯^[2],光效为40lm/W。由于荧光灯的光线成分与日光相似,因此又称为“日光灯”,从此日光灯开始

了广泛的应用,其光效从最初的 30lm/W 逐步提高至目前的 105lm/W。

背光源最早产生于 20 世纪二战时期,用于军用设备上的仪表显示^[7]。

1948 年,联邦德国奥斯拉公司开始研制短弧氙灯,1951 年,开始销售短弧氙灯,这是第一种用于投影的光源^[8]。

1953 年,A. B. Bernanose 等人最初在蒽单晶片的两侧加 400V 的直流电压时观测到发光现象,这是人类首次发现了有机材料的电致发光现象。

1958 年,GE 公司研制出第一只卤钨循环白炽灯——碘钨灯,这是在石英泡壳的钨丝灯中充入卤化物,从而使其发光效率提高了 1 倍,达到 20lm/W,寿命提高了 1 倍以上,长达 2000~3000h^[2]。

1962 年,美国 GE 公司推出金属卤化物灯,1972 年,联邦德国慕尼黑奥运会第一次使用金属卤化物灯作为体育场馆照明。现今的金卤灯光效在 80lm/W 以上,金属卤化物灯的雏形可追溯到 1912 年 GE 公司 Charles Steinmetz 申请的专利,在 20 世纪 50 年代末期,在联邦德国的 Osram 和美国 GE 实验室都研制出具有实用意义的金属卤化物灯。

1962 年,研制出红色发光二极管 LED,光效为 0.1lm/W。1968 年研制出绿色 LED。1994 年,研制出蓝色 LED。1996 年,研制出白色 LED。

1963 年,发明了溴钨灯。

1965 年,研制出第一支高压钠灯;1966 年,美国 GE 公司首先推出高压钠灯,它的光效大于 100lm/W,寿命大于 2000h,它为道路照明提供了一种新的高光效长寿命的光源;如今高压钠灯光效达到 120~150lm/W,寿命可达 20000h,为白炽灯的 10~15 倍,相当于当时广泛用于道路照明高压汞灯光效的 3~4 倍。在 1973 年世界性的能源危机之后,高压钠灯的应用更为广泛,并在很多场合取代了高压汞灯。另一种高效低压钠灯的发展也极为迅速,它的光效高达 180~200lm/W^[9]。

20 世纪 60 年代,研究表明荧光灯的发光性能与使用的电源频率有很大关系,频率越高发出的光通量越多。

1973 年,稀土三基色荧光灯问世,其显色指数 R_a 值为 84,而普通荧光灯的显色指数为 63,目前稀土三基色荧光灯显色指数 R_a 已达 98。

1974 年,国际照明委员会(CIE)正式公布了评价光源显色指数的方法。

1978 年,Philips 公司采用三基色荧光粉研制出细管径紧凑型高效节能荧光灯——PL 灯以及与白炽灯使用方法相同的内藏镇流器的 SL 灯,光效达到 50lm/W 以上,这一光效值是白炽灯的 4~6 倍,从而开创了用紧凑型荧光灯代替白炽灯的新时代^[2]。

1979 年,中国香港的 C. W. Wang 发现了有机蓄电池的发光现象,并开始了对有机电致发光(OLED)的研究。1987 年,Tang 和 Van Slyke 研制出具有双层结构在 EL 器件,获得了较高的发光亮度($1000\text{cd}/\text{m}^2$),并证明了小分子有机材料与金属半导体类似,能在电场作用下发光,亮度高,工作电压低,电光转换效率高。

20 世纪 70 年代末期,Philips 公司推出了直径为 26mm、功率为 36W 的细管径直管荧光灯 T8,其光效比直径为 38mm 的荧光灯 T12 提高近 20%。

20 世纪 70 年代末,荧光灯用高频电子镇流器研制成功,20 世纪 90 年代中期出现了可调光的荧光灯用电子镇流器。

20 世纪 80 年代,出现了 LED 背光源^[7]。

1982 年,世界上第一只陶瓷金卤灯问世。

1986 年,日本明拓公司发明了导光板照明技术^[10]。

1990 年,日本松下公司首先推出灯具一体化的无极荧光灯,而无极灯的研制始于 20 世纪 70 年代^[11]。

1991 年,美国环境保护署首先发起实施“绿色照明”,提出“在保证照明质量的前提下,节约照明用电,减少因发电产生的 SO_2 、 CO_2 、 NO_2 等废气和飘尘,达到保护环境的目的”。

1992 年,国际电光源科技界提出了微波硫灯的新概念,在石英泡壳内充填硫和低压氙气,

在频率为 2450MHz 微波驱动下,通过硫分子的振动能和转动能的跃迁,微波硫灯辐射出连续的可见光光谱。

1994 年,美国 Fusion 公司发明并推出了首个微波硫灯照明系统,其功率为 3400W,其光效达 120lm/W,寿命 60000h,显色指数为 86,色温 6000K,其辐射光谱接近太阳光谱,可在很大范围内调光,并在任意方向点燃。

1995 年,荷兰飞利浦公司开发成功超高压汞灯,其极距约 1.3mm,功率 100W 灯的寿命达 12000h。在灯工作时,汞蒸气压可达 200 个大气压,汞蒸气压越高,灯的亮度也越高,而且汞原子谱线宽度变大,分子连续谱与带电粒子复合光谱也更强,特别是 595nm 以上的红光辐射随灯内工作压强增大而增强,从而提高灯的显色性。

随着半导体技术的发展,研制开发出多种半导体发光材料,LED 输出光开始只有红、黄和绿三种颜色,是颜色纯的单波长光,主要用于电子设备的指示灯,未能引入照明领域。20 世纪 90 年代末,随着对半导体材料氮化镓材料的研究实现突破,蓝光、绿光、白光发光 LED 光源相继问世,半导体引入照明领域取得重大突破,半导体照明成了新的产业方向,作为新型高效固态照明光源,半导体照明光源具有寿命长、节能等显著优点,同样亮度下,半导体灯耗电仅为普通白炽灯的 1/10,而寿命却可以延长 100 倍,现今半导体灯逐步替代白炽灯和荧光灯,并将掀起全新的照明革命。

在 20 世纪的 100 年中,欧洲城市照明进程分为三个阶段:从 20 世纪初至二战结束为工业化阶段(industrialization);从二战结束至 20 世纪末为重建再建阶段(reconstruction);从 20 世纪末至今为可持续发展阶段(environment)^[12]。而照明光源从弧光灯、白炽灯发展到卤钨灯、荧光灯、高压气体放电灯和半导体固体光源,照明的效率提高了 100 倍,光源发展的历史就是光源光效不断提高、寿命不断延长的历史。自从 20 世纪 70 年代发生能源危机后,照明工程进入了节能照明时代;1991 年,美国环境保护署率先提出绿色照明计划,并积极付诸实施,随后得到了联合国和世界上众多国家的关注和支持,2001 年,我国正式启动绿色照明工程计划。

1.1.2 我国照明的发展

中国照明发展的历史可分为四个阶段:古代烛灯照明历史阶段、近代煤油金属灯具照明历史阶段、早期电光源照明历史阶段和现代灯具灯饰照明历史阶段。

在距今约 70 万至 20 万年前,旧石器时代的北京猿人已经开始在生活中使用火,并用篝火照明,随后逐渐学会了使用火把。古代取火的工具称为“燧”,有金燧和木燧之分,其中金燧取火于日,木燧取火于木,公元前 2 世纪,就有人用冰作透镜,会聚太阳光取火。在史书记载中,灯具始见于传说中的黄帝时期,《周礼》中也有专司取火或照明的官职。

油灯和烛灯是中国历史上两类主要灯具,最早的灯具光源是脂烛。我国在春秋时期就已经有成型的灯具,当时灯具按使用燃料而言,分油灯和烛台,就功能而言,分照明灯和礼仪灯^[13];随着脂烛的不断进步,人们逐渐减少脂烛中枝条数量而增加油脂并用液态的植物油代替动物油脂,油中的固态细条作为灯芯使用,这种使用液态油质燃料有灯芯的照明灯具称为油灯。

油灯采用的是液体的燃料,一般是植物油,中国古代也曾用过石油作为油灯燃料。古代民间灯芯常用的是灯心草,可将几根细灯芯拧在一起成为粗灯芯,灯油一般就是百姓家里的食用油,最初人们用盛食物的陶器作为灯具,如单盏盛油的油灯、圆管固定灯芯的油灯、内部装油的油灯、“夹瓷盏”构造的省油灯,随后又发明了蜡烛,它最迟是在东汉时期出现的,进而出现专门的烛灯,这种烛灯具的特点是有盘状或碗状的烛盘,其种类包括带烛钎的烛灯、带烛插管的烛灯、带插烛凹洞的烛灯和用圆环固定蜡烛的灯具^[1]。到了盛唐时期,灯具的分类更为细致,实用兼装饰性的灯大量出现,如灯树、灯楼、灯笼、走马灯和孔明灯等^[13]。

1865 年,香港中环首次安装了煤气灯作为路灯,上海南京路上安装了 10 盏煤气灯。

1882 年 7 月 26 日,中国第一家发电公司——上海电气公司正式投入商业运营,上海外滩安装了 10 盏电弧灯。

1888年,清朝宫廷点亮第一盏电灯。

1890年12月,香港电灯公司成立,白炽灯开始照亮中环^[14],上海在街道上开始使用白炽灯。

1908年,美国GE公司首次将照明制造业引入中国。

1923年,中国的第一只白炽灯诞生在上海亚明灯泡厂,开创中国照明新纪元。

1926年,我国上海南京路上出现了一块英文“皇家牌”霓虹灯打字机的广告。

1927年,第一只国产霓虹灯安装在上海中央大旅社。

1948年,上海亚明灯泡厂试制出中国第一支日光灯管。

20世纪50年代,我国生产和应用的只有白炽灯和直管荧光灯两类,中国城市普遍使用白炽灯,高大工业厂房使用低光效的500~1000W白炽灯^[15]。

20世纪50年代和60年代,香港开始使用低压汞灯及高压汞灯。

20世纪60年代初,中国开始生产卤钨灯^[15]。

1963年,上海亚明灯泡厂研制成功我国第二代电光源高压汞灯。

20世纪60年代末,中科院长春物理所研制成功GaAsP红色LED。

1964年,我国研制成功短弧氙灯。

20世纪70年代初,我国开始有了高压钠灯,其光效比汞灯高一倍;复旦大学和南京灯泡厂合作制成我国第一只金卤灯。

20世纪70年代,香港开始使用高压钠灯,它比低压钠灯有较好的显色性,光效比汞灯高一倍,并逐渐取代了高压汞灯的地位,直至20世纪90年代初期,新一代的高压钠灯完全取代低压汞灯、高压汞灯和低压钠灯这三种灯。

1978年,北京照明学会正式成立。

20世纪80年代初期,我国研制出中显色型高压钠灯,1985年,上海亚明灯泡厂引进第一条高压钠灯生产线。

20世纪80年代中期,我国研制出直管荧光灯电子镇流器,随后研制出紧凑型荧光灯^[15]。

20世纪80年代末期,我国生产出长寿命高光效的T8直管荧光灯,其光效比我国生产几十年的T12型灯管光效提高了15%~30%,20世纪90年代又研制出T5型灯管。

1987年6月,中国照明学会成立。

1990年,上海亚明灯泡厂引进美国先锋公司金卤灯生产线。

20世纪90年代以后,高压钠灯用电子镇流器才研制成功。

1992年,上海在外滩和南京路开启了中国城市夜景照明工程序幕。

20世纪90年代中期,研制出管径更细的T5型荧光灯以及无频闪、无电磁辐射直流荧光灯。

1996年,中国正式制订了《中国绿色照明工程实施方案》,通过照明节电,从而减少发电量,即降低燃煤量,以减少SO₂和CO₂以及氮氧化物等有害气体的排放,而目前我国70%以上的发电量还是通过燃煤获得的。

1998年,我国研制成功微波硫灯,球泡中的硫元素在微波激发下发出白色光,因无钨丝电极,所以寿命很长,相同功率的微波硫灯与汞灯相比,其视觉亮度比汞灯高4倍,光效高,光源显色指数高,光色稳定性好,紫外线成分低。1999年,推出VEC-1000微波硫灯产品,其技术指标接近国际同类产品水平。

我国城市景观照明的发展经历了如下历程^[16]。

1989年以前——萌芽时期,只有北京、上海等特大城市核心地区的标志性建筑才有装饰照明,以白炽灯为轮廓勾边灯为主要照明方式,平日很少开灯。

1989~1999年——初始阶段,1989年开始在上海在外滩沿线的欧式建筑群进行了外景照明,并有计划地实施城市区域性的景观照明工程,这一时期的照明手法以泛光照明为主,建筑及景物的表现更丰满,更立体化,并且尝试用区域性的照明总体规划控制整体光环境,使之达到优美、和谐和完善。

1999年~现今——普及阶段。城市照明工程建设进一步在地级市、县普遍展开,照明手法

多样化, 光纤、发光二极管 (LED)、陶瓷管金卤灯 (CDM)、数控电子调光等先进技术进入城市照明领域。

2001 年 9 月, 国家经贸委与联合国开发计划署 (UNDP) 和全球环境基金 (GEF) 共同组织开发的“SETC/UNDP/GEF 中国绿色照明工程促进项目”正式启动。绿色照明是指通过科学的照明设计, 采用效率高、寿命长、安全和性能稳定的照明电器产品 (如电光源、灯用电器附件、灯具、配线器材, 以及调光控制器件), 改善提高人们工作、学习、生活的条件和质量, 从而创造一个高效、舒适、安全、经济、有益的环境并充分体现现代文明的照明。

1.1.3 照明技术

光源的进步推动了照明技术的发展, 照明技术是一门边缘学科, 它综合了建筑技术、电气技术、光源技术和控制技术, 力求为人们创造出舒心悦目的光环境^[17]。

目前采用的照明方式主要有三种: 其一是直接照明, 光线直接投射在物体上显示出物体的形与色; 其二是间接照明, 光线经过反射后投向空间, 有助于气氛的渲染和环境的烘托; 其三是混合照明, 以期取得较为理想的装饰照明效果^[13]。

城市照明最能显现照明科技的发展, 这是由于照明涉及城市的多个方面, 具体如下^[16]。

① 交通照明——公路、城市街道、停车场、桥梁、车站、码头和空港的照明, 保证城市动脉的安全畅通。

② 景观照明——历史文物、建筑、城市标志、商业中心和风景园林的照明, 彰显城市的文化和风光。

③ 公众活动照明——市民广场、休闲园地和户外文化体育娱乐设施的照明, 体现城市的人文关怀, 使城市充满活力。

20 世纪 60 年代, 道路照明在理论上有大的突破, 著名学者德波尔 (De Boer) 等人提出了一套完整的道路照明理论, 它是建立在以“亮度”作为评价标准基础上的理论。照度只是在某一个面积上光的接收量, 它并不反映人眼睛看到这块面积时的感觉。能真正反映人的眼睛感受的, 并不在于这块面积上接收了多少光, 而主要的是看这块面积能够发射 (或者反射) 出多少光, 这就是亮度。德波尔提出了用亮度作为评价标准的基本理论, 建立了从照度 (E) 过渡到亮度 (L) 的基本公式:

$$E=qL$$

也就是将道路表面上接收到的光线通过亮度系数 q (与路面的反射特性有关) 转换成路面亮度。

道路照明的光源已经经历了 20 世纪 60 年代前的白炽灯和荧光灯, 20 世纪 60 年代的高压汞灯, 从 20 世纪 70 年代到现今的高压钠灯的几个阶段, 这些变化归结为在不增加 (或减少) 能耗的条件下提高道路表面亮度和照明质量, 使目前的道路照明单位面积总能耗降到 1W 以下^[9]。

1.1.4 光纤照明

光学纤维又称光导纤维, 简称光纤, 它在 20 世纪 50 年代以后特别是在 20 世纪 70 年代以后获得了迅猛的发展, 光纤不仅可传送紫外光、可见光和红外光, 还可传送高能激光及光信号等, 如今光纤已广泛用于通信业上, 大大提高了通信质量与效率。光纤还可用于军事上, 如光纤陀螺和光纤制导等; 用于仪器仪表中, 如可制作光纤温度传感器和光纤压力传感器等; 用于医疗器械中, 如光纤头灯和光纤医用内窥镜等; 用于汽车工业中, 如汽车仪表照明和匙孔照明等; 用于工业中, 如可制作光纤工业内窥镜和锅炉监视器等。光纤照明是由光源、耦合单元、光纤和光输出单元 (灯头) 组成的照明系统, 光纤照明的基本原理是光纤与光源耦合, 光源发出光耦合进光纤中, 光在光纤不同折射率的芯皮界面上发生全反射, 实现光在光纤中传输, 并通过与光输出单元组合, 使输出光达到所需照明的效果。下面就简要介绍光纤照明的发展。

古代玻璃吹制艺人很早就观察到光在透明柱体中通过多次全反射向前传播的现象, 而首次科学阐述这一现象的是英国皇家学会的 John. Tyndall (约翰·丁达尔), 他在英国皇家学会演示了

一个著名的实验：照明光源放置在一只盛满水的透明器皿旁边，水从器皿的侧孔中流出，这时投射在水中的光也随着水流传导出来，这一实验证实了光沿着从水管喷射出来的水柱折射前进的现象，这实际上是一次锥形液芯光纤传光演示，参见示意图 1-1。

1874 年，俄国 Chikolev 利用多根镜面反射管从单一光源中实现了光的传输。镜面反射管最早之一的大规模应用是在俄国 Okhtinsk 的火药厂。

1880 年，美国的 William Wheeler、Molera 和 Cebrian 在申请的美国专利（USP 247229）中提出了光导管的设想，当时称之为“管道照明”，它是由内涂反射层的管子把光源光引至若干个需要照明的地点^[18]，这实际上是一种空芯光纤的传光设想，参见示意图 1-2，同年俄国 Chikolev 也单独公布了类似的发明设想。

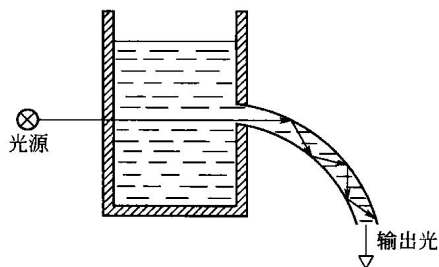


图 1-1 约翰·丁达尔传光实验演示

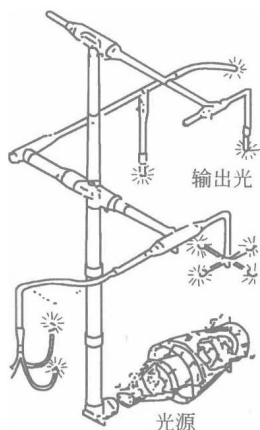


图 1-2 “管道照明”
原理示意图

20 世纪 30 年代，随着光纤制造技术和电光源技术的发展，提出了以光纤为载体，实现光电分离的照明思路。

1953 年，Van Heel 将一种折射率为 1.47 的塑料涂覆在玻璃纤维上，制成了玻璃芯塑料涂层的光纤，满足了全内反射条件，但因塑料涂层不均匀，传光效果并不理想。

1955 年，美国的 B. J. Hirschowitz 把高折射率的玻璃棒套进低折射率的玻璃管中，放在高温炉中拉制，解决了光纤的光绝缘问题。

1964 年，美国杜邦（DuPont）公司开始研制聚合物光纤（polymer optical fiber，简称 POF），并于 1966 年向市场推出了 CROFON 牌号的 SI 型聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）芯 POF。

1970 年，美国康宁（Corning）玻璃公司 F. P. Kapron 等人研制出世界上第一根损耗低于 20dB/km 的低损耗石英光纤（silica optical fiber，简称 SOF）。

1972 年，日本东丽 Toray 公司研制出聚苯乙烯（PS）芯 POF，其在波长 670nm 处的最低损耗为 1100dB/km。

侧面发光 POF 研究始于 20 世纪 70 年代。

1974 年，美国、日本和联邦德国有大量文章报道了钠钙多组分玻璃光纤（multi-component glass optical fiber，简称 GOF）的制造方法，随着性能优异价格低廉的多组分玻璃光纤推出，多组分玻璃光纤应用于光纤照明，光纤照明开始得到真正的发展。

1976 年，中国首次在毛主席纪念堂使用了光纤照明系统。

1982 年，DuPont 公司将 POF 及其光缆专利和生产技术卖给日本三菱公司，三菱公司成功掌握了 POF 相关技术，并将之发扬光大，实现规模化生产，并推出了系列 POF。

1986 年，北京玻璃研究所和南京玻璃纤维研究设计院分别鉴定了涂覆法拉制 PS 芯 POF 工艺。

1986 年，日本富士通公司和帝人公司等多家公司研制出聚碳酸酯（PC）芯 POF。

1988 年，日本三菱公司制成第一种大芯径聚合物光纤（large core POF，简称 LCPOF），这种光纤的直径通常在 6~12mm 左右。

2003 年 6 月，四川汇源塑料光纤有限公司 PMMA 芯 POF 实现了规模化生产。

2006 年 9 月，中科院理化所采用连续化本体聚合法研制出 SI 型 PMMA 芯 POF，2007 年，深圳大圣光电技术有限公司采用这一技术实现了规模化生产。

光纤照明系统具有极高的使用安全性、设计自由度高、维护简单、寿命长、节省能源和应用范围广等优点，自 20 世纪 60 年代以来受到各国学术界的高度重视，各国先后投入大量的研究开发力量，因此光纤照明技术得到迅速发展。我国在 20 世纪 70 年代后期已开始极小规模实验性光纤照明开发应用，其中南京玻璃纤维研究设计院是国内最早从事照明光纤研发的机构之一，经过

长期的研究和应用实践,已形成以多组分玻璃光纤、石英光纤、聚合物光纤和液芯光纤为主的四大系列光纤照明产品,广泛应用于国民经济各个领域。

在光纤照明技术应用的早期,大多采用价格昂贵的多组分玻璃光纤和石英光纤,其应用领域仅限于需要精细照明、视觉要求高的场合或其它照明手段无法替代的场合,如医用内窥镜、显微照明、印刷线路板检验、牙科的光固化和痕迹检测等,后来光纤逐渐推广应用于工业、科学研究和医疗卫生等领域。进入20世纪80年代,随着低成本性能好的聚合物光纤(POF)和高效光源的开发成功,光纤照明开始步入实用普及阶段,逐渐应用于工业照明、博物馆照明、购物中心照明、医院手术室照明、汽车仪表照明、汽车前照灯及尾灯检测照明、娱乐场所照明、广告灯箱照明、建筑装饰照明、艺术景观照明和街道标志照明等照明领域^[19]。在实际应用中,通常根据照明光纤的发光特性和使用方式的不同,又将光纤分为端面发光光纤和侧面发光光纤,这两种类型的照明光纤的应用参见图1-3所示。



图 1-3 照明光纤的应用

光纤照明是由光源、耦合单元、光纤和光输出单元四要素构成的照明系统,其基本特征是光源可放置在远离被照明区域的其它地方,光源产生的热量及其供电系统与被照明物体可分离隔开,光源输出光通过光纤传输至指定位置,特别适用于易燃易爆等危险环境照明及游泳池和喷泉等潮湿场合的照明。

光纤照明柔和而丰富的光色使照明设计具有更加完美的视觉效果,而且随着聚合物光纤(POF)性能的不断完善,质优价廉的POF促进了光纤照明的发展,近年来在各种日常的室内外照明工程中,光纤照明开始呈现出替代传统照明的趋势,在室内照明方面,光纤照明应用包括装饰照明,如幻彩动感装饰照明,以及展示照明,如博物馆、商店的展示柜照明等;在室外照明方面,光纤可用于公共区域照明、建筑物轮廓照明、道路的视觉引导性照明和富有创造力的装饰效果,如日本某一大楼的中庭采光,就是通过一组光纤把阳光引入室内,进行中庭的绿色植物照明,照明效果好。

光纤照明中输出光几乎没有红外热量,故称为冷光照明,而且滤除了绝大部分的紫外线,尤其适合博物馆、美术馆、画廊等艺术品和文物照明^[19],现今光纤照明的应用已从专业性美术馆、博物馆逐步扩大到道路、绿地、树木、易燃易爆等危险环境、建筑室内外装饰照明及游泳池、喷泉等潮湿场合的照明。随着电光源技术的进步,光源发光效率的提高及其相应价格的降低,为光纤照明系统的推广应用提供了可靠的保障。

总而言之,随着光纤用新材料的出现,光纤及光源制造工艺不断改进,光纤性能不断改善,光纤品种不断增多,光纤照明系统综合性能也不断提高,这是光纤照明成为新兴照明技术的关键,也是光纤照明替代部分传统照明的决定性因素,光纤照明逐步成长为照明产业中一个重要的组成部分。

1.1.5 其它照明方式

光纤照明实际是一种导光照明。导光照明特点在于使用光源数量少、功率低或者光输出端多的照明方式,通过一种导光通道将光输送到多个需要的地方^[20]。

人们早已通过光学实验发现一个内部具有镜面反射层的管道可传输光线。1874年,俄国的

弗拉基米尔·尼古拉也维奇·契科列夫首先制造出世界上第一个光导管，他在室外安装了大功率弧光灯作为光源，经过集光系统，将产生的平行光通过长管内的镜面反射引到室内，用于导线车间的照明，但由于材料和工艺水平的限制，早期的光导管效果并不理想。1880年，俄国《电》杂志上就刊出了弗拉基米尔·尼古拉也维奇·契科列夫的论文，他阐述了利用具有反射表面的玻璃、棱镜和管道的组合装置，将一个集中的强光源分散成许多小光源的光学方案。1881年，William Wheeler设计了一种内壁为镜面的导光管，并获美国247229号专利。导光照明包括镜面反射照明、棱镜组多次反射照明、导光管照明、卫星反射镜照明和高空聚光照明等。

(1) 镜面反射照明 用反光镜将太阳光反射到室内实现照明采光，这种方法对提高侧窗采光的均匀度具有较明显的效果，但每一次镜面反射都要吸收5%~20%的光能，而光线从“光源”到达工作点时经过多次反射，效率低。

(2) 棱镜组多次反射照明 用多透镜、棱镜、反射镜将集光器收集的太阳光传送到室内，实现照明采光，如澳大利亚用这种方法把光输送到房间10m进深的部位进行照明，英国采用这一方法解决地下和无窗建筑的采光等问题。虽然光经过一次透射的损失比一次镜面反射损失小，但效率还是比较低的。

(3) 导光管照明 用导光管将太阳聚光器收集的光线传送到室内需要采光的地点，如无窗厂房和地下建筑等处，它包括有缝导光管和棱镜式导光管两种。用导光管输送天然光还需要一个太阳聚光器，即跟踪和收集阳光的定日镜及聚光系统^[20]。

① 有缝导光管照明 这种导光管的光效约30%~40%，其中辐射导入装置的效率在60%~75%之间，导光管本身的效率为50%~60%，亮度分布均匀度约(10:1)~(15:1)。

② 棱镜导光管照明 20世纪80年代，棱镜导光管出现在美国，它由折射率为1.5的聚丙烯材料制成，外表面带有许多外棱顶角等于90°的等腰三棱锥。从理论上可推出：当入射光与轴线夹角不大于27.6°时，光线就可经多次全内反射传播开来，而每一个全内反射的吸收率最大为0.2%，传输损耗低。

(4) 卫星反射镜照明 用高空卫星反射镜把太阳光反射送到需要光线的地区。

(5) 高空聚光照明 用反光镜把太阳光聚集在高空，形成的高亮度光源用于夜间照明。

1.2 光纤照明的基本原理

通常把光学分成几何光学、物理光学和量子光学。

几何光学是研究光的传播问题，它利用光的概念以及折射定律、反射定律来描述光在各种介质中传播的途径，其中反射定律是人们很早就认识的光学定律之一。物理光学是从光的波动性研究光在传播过程中所发生现象的学科，又称为波动光学，它研究光的干涉、光的衍射和光的偏振现象，以及光在各向异性的介质中传播时所表现的现象。光纤照明属于几何光学的范畴。

光既表现出波动性又表现出粒子性，这称为光的波粒二象性。

公元140年，古希腊的托勒密(Claudius Ptolemaeus, 90~168)撰写的《光学》记载了对折射现象的研究。

1621年，荷兰莱顿大学数学教授斯涅耳(W. Snell, 1591~1626)叙述了折射定律：对于给定的两种介质，入射角*i*和折射角*r*的余割之比总是保持相同的值。

即
$$\sin r / \sin i = \csc i / \csc r = \text{常数}$$

1637年，法国数学家笛卡儿(R. Descartes, 1596~1650)在《光学》一书中，首次正式公布了具有现代形式的折射定律： $\sin i / \sin r = n_2 / n_1$ ，式中*n*₁、*n*₂分别为第一种媒质和第二种媒质的折射率，光线是从第一种媒质进入第二种媒质的，笛卡儿是从光的微粒说出发推导出折射定律的。

1657年，法国数学家费尔马(P. Fermat, 1601~1665)提出了“费尔马原理”：光在介质中传播时所走的路程最短。

1666年，英国科学家牛顿(Sir Isaac Newton, 1642~1727)发现太阳光是由多种颜色的光谱组成的。牛顿在发现太阳光谱和牛顿环现象后，根据光的直线传播特性认为，光是一种微粒流，并且走的是最快的直线运动路径。

1690年,荷兰物理学家惠更斯(Christian Huygens, 1629~1695)在其《光论》一书中正式提出了光的波动说,建立了著名的惠更斯原理,并推导出光的反射和折射定律。他认为光同声音一样,是以球形波面振动传播的,还正确解释了双折射现象并预测光衍射现象的存在。在整个18世纪,光的微粒流理论和光的波动理论都不很完整。

1801年,英国医生兼物理学家托马斯·杨(Thomax Young, 1773~1829)进行了著名的杨氏干涉实验,提出光的干涉原理,为光的波动说奠定了基础,并利用波动说解释了牛顿环的成因和薄膜的彩色。他第一次测量了7种颜色光的波长,并建立了三原色原理:一切色彩都可从红、绿、蓝三原色的不同比例混合而成。

1818年,法国物理学家菲涅耳(Fresnel Augustine Jean, 1788~1827)以杨氏干涉原理补充了惠更斯(Huygens)原理,形成了惠更斯-菲涅耳原理(Huygens-Fresnel principle),可解释光的干涉、衍射现象以及光的直线传播现象。

1850年,法国物理学家傅科(Jean Bernard Leon Foucault, 1819~1868)进行了决定性的实验,使光的波动说有了实验依据,并最终证实光的波动说是正确的,他准确地测定了空气中的光速为 $(289000 \pm 500)\text{km/s}$ 。

1864年,英国物理学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831~1879)指出光与无线电波、X射线以及 γ 射线一样都是电磁波,它们之间仅是波长的不同。1888年,德国物理学家海因里希·鲁道夫·赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857~1894)用实验证实了电磁波的存在。

1896年,荷兰物理学家、数学家洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz, 1853~1928)创立电子论,解释了发光和物质吸收光的现象,也解释了光在物质中传播的各种特点,包括对色散现象的解释。

1900年,德国伟大的理论物理学家马克斯·普朗克(Max K. E. L. Planck, 1858~1947)提出了量子论,量子论的诞生被认为是近代物理学的起点。

1905年,德国阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein, 1879~1955)运用量子论解释了光电效应,将光的微粒学说和波动学说统一起来,提出了光子说概念,光以不连续的形式在空中传播,每一份光叫做一个光量子,光量子既是一种微粒,又是一种电波。

1925年,德国理论物理学家玻恩(Max Born, 1882~1970)提出了波粒二象性的统计解释,把波动性和粒子性联系起来,统一了粒子概念和波动概念,这样光不仅具有波粒二象性,而且电子、原子等一切实物粒子也都具有两重性。

20世纪初,科学家一方面从光的干涉、衍射、偏振以及运动物体的光学现象确证了光是电磁波;另一方面又从热辐射、光电效应、光压以及光的化学作用等证明了光的量子性——微粒性。

光是认识一切视觉现象的要素之一,没有光就没有照明;所谓光纤照明,就是光源同光纤耦合,利用光纤将光源输出光传输至指定的地点进行照明。

1.2.1 发光的概念

发光是超出温度辐射部分的发光,并非能引起视觉的光亮都是发光,这部分光中只有余辉明显长于光波周期的部分才发光,也就是只要有余辉,不管是长是短,都是发光,但发光是可利用猝灭剂使其猝灭的^[21]。

发光有许多分类方式,按发光方式可分为自发发光和受激发光;按发光弛豫时间可分为荧光和磷光;按发光材料可分为绝缘体、半导体、液体和气体,或粉末、薄膜和单晶,或非晶、多晶和晶体,或纳米、低维、介观及体材料。

按激发方式可分为光致发光、阴极射线发光、X射线致发光、场致发光、核辐射致发光、P-N结发光、摩擦发光、化学发光、结晶发光和生物发光。其中,有机场致发光有三类材料:小分子、高聚物及配合物,其发光的机理是双极注入电子及空穴,然后二者复合,导致发光,为提高注入效率,需要选用合适电极,也可使用载流子输运层改进注入,使注入的电子及空穴流量趋于平衡,既可提高效率,也可增加亮度^[21]。

只有有了发光体,才有可能发光和照明。

1.2.2 光的性质

在电磁波谱中，电磁波频率由低到高，可分为无线电波（超长波、长波、中波、短波、微波）、光波（红外、可见光、紫外）、X 射线、 γ 射线和宇宙射线等，其中光波是一定波长范围内的电磁辐射，光的物理性质是由它的波长和能量决定的，波长决定了光的颜色，不同波长的光具有不同的能量，波长越短能量越高；光映射到我们的眼睛时，波长不同决定了光的色相不同。波长相同能量不同，则决定了色彩明暗的不同。

电磁辐射的波长范围很广，到达地球表面的太阳光波长范围从 290~1700nm，它远比可见光波长的范围宽；在太阳辐射光中，波长低于 290nm 的部分被大气层中较高部位的臭氧所吸收，也就是在 220~280nm 的中紫外波段的光波几乎被地球的臭氧层所吸收，波长在 220~280nm 之间光谱区域即为“太阳光谱盲区”。而波长大于 1700nm 的部分则被大气层中较低部位的水汽和二氧化碳所强烈吸收；紫外辐射的短波段可延伸到 1nm，低于 1nm 的是 X 射线、 γ 射线和宇宙射线；波长为 380~780nm 的电磁波作用于人眼能产生视觉感受，这部分电磁波就是可见光；波长在 780~1500nm 为近红外光，中红外波段波长范围为 1.5~25 μm ，远红外光谱波长范围 25~300 μm ，比远红外光频率更小或波长更长的是无线电波，即毫米波、微波和短波等，参见图 1-4 所示。

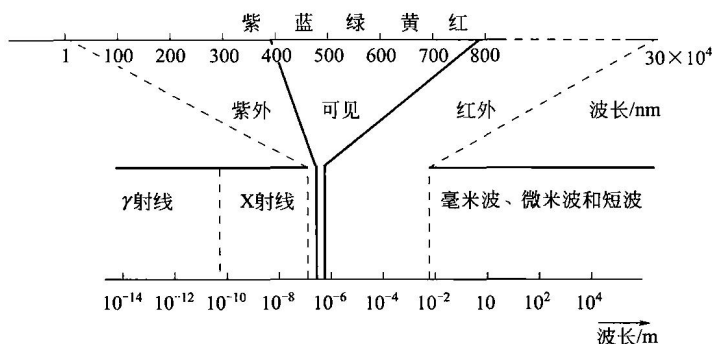


图 1-4 光的分类

1666 年，英国牛顿发现，太阳光经过三棱镜折射投射到白色墙壁上时，会显现出彩虹一样美丽的彩色光谱带，依次为红色、橙色、黄色、绿色、青色、蓝色和紫色。这是由于太阳光是由多色光组成的，不同波长的光折射率不同，经过三棱镜折射后投射位置也不同，可见光是由七种单色光组成的，其波长范围为 380~780nm，参见表 1-1。

表 1-1 可见光的组成

单 色 光	波长 λ/nm	单 色 光	波长 λ/nm
红(red)	780~630	青(cyan)	500~470
橙(orange)	630~600	蓝(blue)	470~420
黄(yellow)	600~570	紫(violet)	420~380
绿(green)	570~500		

三原色是红色、绿色和蓝色，三原色是独立的，三原色中任何一色都不能用其余两种色彩合成，而其它色彩可由三原色按一定的比例混合出来，白光可看成是由红、绿、蓝三原色等量相加而合成的。1931 年，国际照明委员会统一规定，水银光谱中波长为 700.0nm 的红光为红基色光，波长为 546.1nm 的绿光为绿基色光，波长为 435.8nm 的蓝光为蓝基色光。红色、绿色和蓝色三原色的补色分别是青色、品红色和黄色，三原色同其相对应的补色可混合成白光。

1.2.3 光源

能自行发光的发光体叫做光源。光源分为自然光源和人造光源。不同的光源，由于发光物质