

LED灯

光的本质是什么？这是一个难以用简单语句表述的问题。

吊灯

光的传播、干涉、衍射和偏振现象可以用波动学说解释，早在1864年麦克斯韦（Maxwell）就提出了光是一种电磁波的理论。

白炽灯

而在考虑光和物质粒子相互作用的场合里，光就又具有粒子的性质了。

节能灯

这就是光的波粒二象性。

台灯

节能 照明光源 新进展

JIENENG
ZHAOMING GUANGYUAN
XINJINZHAN

陈育明 陈大华 编著



节能照明光源新进展

陈育明 陈大华 编著



时代出版传媒股份有限公司
安徽科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

节能照明光源新进展/陈育明,陈大华编著. —合肥:
安徽科学技术出版社,2016.1
ISBN 978-7-5337-6846-1

I. ①节… II. ①陈…②陈… III. ①节能-照明光
源-研究 IV. ①TU113.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 287902 号

节能照明光源新进展

陈育明 陈大华 编著

出版人:黄和平 选题策划:倪颖生 责任编辑:倪颖生 叶兆恺
责任校对:陈会兰 责任印制:廖小青 封面设计:王 艳

出版发行:时代出版传媒股份有限公司 <http://www.press-mart.com>
安徽科学技术出版社 <http://www.ahstp.net>
(合肥市政务文化新区翡翠路 1118 号出版传媒广场,邮编:230071)
电话:(0551)63533323

印 制:合肥创新印务有限公司 电话:(0551)64321190
(如发现印装质量问题,影响阅读,请与印刷厂商联系调换)

开本:787×1092 1/16 印张:25 字数:555 千
版次:2016 年 1 月第 1 版 印次:2016 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5337-6846-1

定价:98.00 元

版权所有,侵权必究

前 言

能源已经成为当今社会发展的重要基石,人类社会的迅猛发展正受到能源短缺的制约,目前化石能源的储备已经无法满足人类社会未来的需求。照明的能源消耗占了较大的比重,不同国家从10%~20%不等,因而实现照明光源的节能对实现社会经济的可持续发展具有举足轻重的意义。世界各国对照明节能都十分重视,提高照明光源的效率和性能成为一个重要的研究课题。当今社会科技发展十分迅猛,在新材料和新技术的帮助下,光源也在迅速发展着,其性能得到了不断的提高,例如我们可以欣喜地看到最近LED的发展十分活跃,已经逐步进入各个照明领域。在整个光源大家庭中,各种光源都有其优势和劣势,迄今为止还没有任何一种光源是全能的,而且每种光源都在不停地进步。因此很有必要了解每种光源的进展情况,更好地根据实际情况来选择合理的光源,对于照明光源的应用和发展都有重要的作用。随着科技发展和技术进步,照明光源的效率、性价比将得到更大的提高,推动照明领域向绿色环保和可持续方向发展。

最近几十年电光源的发展十分迅速,电光源的新产品层出不穷,这里无法对它们逐一介绍。本书只能按照发光原理进行分类阐述,希望能够系统介绍各类照明光源的原理、应用和最新进展。编写本书的目的是为从事光源照明研究和应用的研究人员和工程师提供一些有益的系统的信息。我们有一个坚定的信念,科学技术只有在不断的交流和分享中才能得到不断的完善和提高,鉴于长期以来热爱光源与照明事业同仁的无私交流传授,本书在编写过程中参考和引用了大量国内外的著作文献,主要的已列入书后的参考文献,在此谨向这些作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中很多看法会存在不足,难免有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

目录

第1编 光源与照明基础	1
1.1 光源与人类	2
1.1.1 光源的历史	2
1.1.2 能源与照明	10
1.1.3 人类对光的需求	13
1.2 光源技术基础	18
1.2.1 光	18
1.2.2 视觉	21
1.2.3 光度学	30
1.2.4 颜色	34
第2编 热辐射光源	43
2.1 热辐射基础	44
2.1.1 热量传输的基本形式	44
2.1.2 热辐射基本特性	49
2.1.3 黑体辐射	51
2.1.4 实际辐射体	54
2.1.5 热辐射光源的发展历程	56
2.2 白炽灯	60
2.2.1 白炽灯的基本原理	60
2.2.2 白炽灯的结构与材料	62
2.2.3 白炽灯的充气	65
2.2.4 白炽灯的制造工艺	70
2.2.5 白炽灯的特性	75
2.2.6 白炽灯的产品	78
2.2.7 新型白炽灯	82
2.3 卤钨灯	87
2.3.1 卤钨循环	87
2.3.2 卤钨灯产品及其技术参数	92
2.3.3 卤钨灯的结构与制造	94
2.3.4 卤钨灯的应用	98
2.3.5 新型卤钨灯	104
第3编 气体放电光源	109
3.1 气体放电原理	110
3.1.1 气体	110

3.1.2	原子过程	112
3.1.3	带电粒子在气体中的运动	115
3.1.4	气体放电光源	118
3.1.5	光谱辐射	123
3.2	低气压放电灯	128
3.2.1	低气压放电原理	128
3.2.2	低压钠灯	134
3.2.3	荧光灯	141
3.3	高气压放电灯	190
3.3.1	高气压放电原理	190
3.3.2	高压钠灯	195
3.3.3	高压汞灯	209
3.3.4	金属卤化物灯	222
3.3.5	氙灯	233
3.4	无极放电灯	240
3.4.1	无极放电光源的进展	240
3.4.2	无极荧光灯	247
3.4.3	无极荧光灯原理	252
3.4.4	无极荧光灯的特性	255
3.4.5	无极Ar-Hg放电	258
3.4.6	无极荧光灯系统分析	262
3.4.7	微波光源	265
3.4.8	参量优化	276
3.4.9	微波光源的启动	279
第4编	固态光源	281
4.1	半导体物理基础	282
4.1.1	半导体材料	282
4.1.2	半导体的晶体结构	285
4.1.3	半导体的能带	286
4.1.4	本征载流子浓度	291
4.1.5	杂质半导体	295
4.1.6	辐射复合和非辐射复合	301
4.2	半导体照明光源	307
4.2.1	LED的工作原理	308
4.2.2	LED的设计制造	331

4.2.3 LED的性能	343
4.2.4 功率型LED	350
4.2.5 半导体照明驱动和控制技术	356
4.2.6 LED灯	361
4.2.7 LED的技术展望	370
4.3 有机电致发光	375
4.3.1 有机电致发光历史简介	375
4.3.2 有机发光器件与材料	376
4.3.3 白光OLED	381
4.3.4 OLED照明	382
主要名词术语	385
参考文献	389

第1编 光源与照明基础

在漫长的历史进程中，人类一直对光明孜孜追求，从未停歇。光源在人类文明中有极其重要的作用。从古代的油灯、火把到现在的荧光灯、LED，人类在光源方面取得了丰硕成果。在能源日趋紧张的现代社会，光源的节能也成为人类的迫切需求。随着社会分工和文明的发展，人类对照明光源还提出了更高的要求。本编介绍了光源的发展进程、照明对人类社会的影响、人类对照明的需求以及对照明光源的评价，照明和光源的基本知识和评价标准。



1.1 光源与人类

1.1.1 光源的历史

在漫长的人类文明的发展史中,光源一直起着重要的作用。从早期宇宙的混沌到地球的成长,从地球生命到人类文明,光源一直在这个奇迹般进化的历程中扮演着重要角色。根据目前的科学研究,宇宙的起源可以追溯到 137 亿年以前著名的宇宙大爆炸(如图 1.1.1 所示),新诞生的宇宙充满了“膨胀场”,驱使宇宙膨胀指数为 10^{-32} s 每个周期。宇宙大爆炸之后,意想不到的炽热,产生了大量的粒子,包括电子、正电子、夸克和反夸克等。随后宇宙逐步冷却,大量的粒子开始组成稳定的原子和分子,并很快结合形成恒星和行星。宇宙大爆炸 1 亿年后就开始形成恒星,但这些早期恒星并不稳定,均以聚变反应的爆炸结束生命,在此过程中不断将轻元素合并成重元素,产生相对稳定的恒星和星系。此时的宇宙是十分炽热的,反应时不会产生任何可见光,因此那时的宇宙是黑暗的,并且没有任何生命。

这种黑暗一直持续了近百亿年,直到 46 亿年前太阳诞生,太阳系才开始有可见光。太阳是由大量的重元素粒子产生并通过核聚变反应形成连续稳定的辐射,通过氢原子聚变反应将质量转化为能量,其 15 min 产生的能量可以供地球使用一整年(见图 1.1.2)。据科学家们的研究,太阳一直在进行着稳定的小量聚变反应,因此太阳的生命还在不断延续,至少还有 50 亿年的寿命。太阳的产生使太阳系终于结束了其黑暗的历史,地球也在同一时期形成。在随后地球生命的发展中,太阳光扮演了重要的造物主角色。大约 25 亿年前,有机生物开始出现,光合作用对于有机生物具有创新意义,在太阳光作用下有机生物释放氧气,使地球大气层充满大量的氧气。在随后的地球生态进化中,阳光对植物和动物的产生和发展起了决定性作用,并最终使地球的生物多种多样并产生了人类。太阳是太阳系的第一个自然光源,一直到今天还对人类的生产生活起着至关重要的作用。中午的太阳光的色温约为 6500K,提供地面的照度超过 100000 Lux。

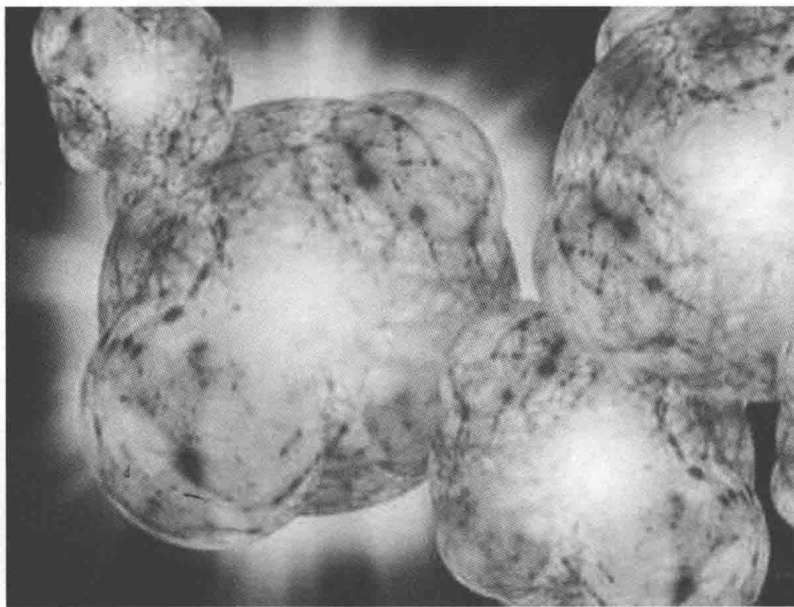


图 1.1.1 宇宙大爆炸示意图

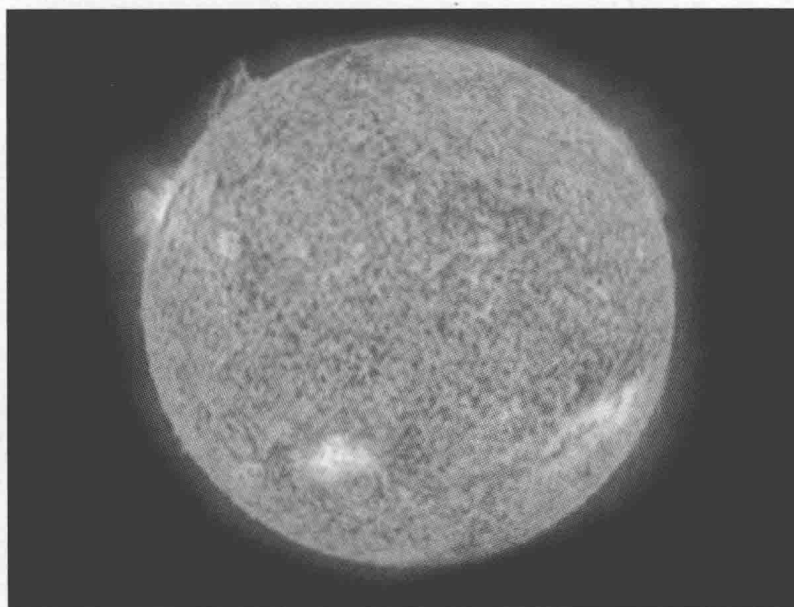


图 1.1.2 太阳的产生

大约在公元前 40 000 年,原始人发现了火。闪电造成灌木或草丛的燃烧,使原始人意识到利用火的方法。现在的发现表明最早用火的原始人类是北京猿人,火对加速人类文明的进程有深远的影响。火把是人类历史的第一个人工光源,使人类冲破了夜晚的黑暗,而且火把是可以移动的光源,原始人类可以在阳光不能照射的地方进行照明,扩大了人类活动的空间和时间,如法国 Lascaux 洞穴发现了公元前 30 000 年的绘画(如图 1.1.3 所示),如果没有火的照明是无法完成的。

随后人类不断对火进行认识,一个重要的进展发生在公元前 13 000 年左右,人类开始使用原始的油灯,采用石头、贝壳和动物的犄角来盛放油脂,并在中间使用纤维作为



图 1.1.3 法国 Lascaux 洞穴的壁画

灯芯制成简易的灯,那时的油脂主要是简单收集的动物或植物的天然油脂,比较著名的是在法国 Lascaux 洞穴发现的大量石头灯(如图 1.1.4 所示)。这是人类第一次实现可控制长时间的照明方法。

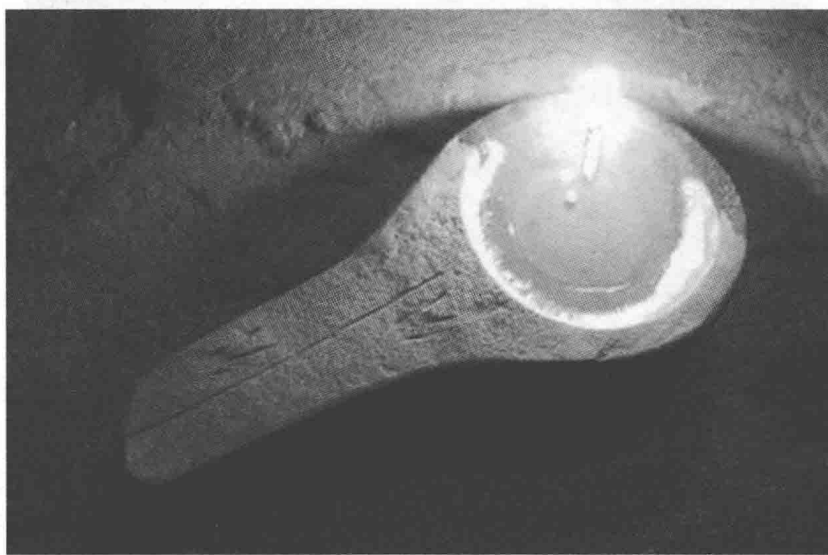


图 1.1.4 法国 Lascaux 洞穴发现的石灯复原图

在随后的人类文明进程中逐步对油灯进行改进,将动物或植物的脂肪进行加工,利用贝壳和石头进行发光并扩大光线的照射范围,人类利用灯光的知识和能力得到不断提高。大约在公元前 5 000 年,人类可以加工油灯的燃料,主要包括芝麻油、蓖麻油、鱼油和坚果油等,那时油灯的燃料还是人类宝贵的食物,因此当时只能是富贵人的奢侈品。另一个重要的发明在公元前 400 年,是固态脂肪添加纤维制成蜡烛。最好的蜡烛采用蜂蜡制成,由于其价格昂贵,大部分用于圣庙和贵族需要。人们普遍采用动物脂肪

来制成蜡烛,燃烧时会产生大量的浓烟,因此直到 14 世纪才开始普遍使用蜡烛。18 世纪末,随着玻璃技术的提高,油灯有了改进,在火焰周围加了一个玻璃罩,提高了燃烧效率和光强。在人类文明漫长的古代,人类主要照明用品就是油灯、蜡烛。

在人类文明历史上一个重要的发明是 1792 年苏格兰的 William Murdock 发明了煤气灯(如图 1.1.5 所示),与原来的油灯相比,其出射的光通量可以增加几十倍,可以将大范围的空间进行照明,这极大地扩展和提高了照明的范围和质量,被广泛使用于室外和室内照明。煤气灯的使用使 19 世纪的舞台文化得到了空前的发展,但煤气灯的明显缺点是需要燃点启动,并需要空气作为燃料,因此使用十分不方便还容易发生火灾事故。人类还需要寻找更好的照明光源。



图 1.1.5 William Murdock 和他的煤气灯

人类文明历史上一个重要的里程碑是电气照明时代的到来。1809 年,英国 Humphrey Davy 爵士(如图 1.1.6 所示)在伦敦皇家研究院第一次展示了碳电弧灯,是由两根分开的炭棒构成,它们接到电池两端,由此开始采用气体放电灯方式的照明。由于当时采用电池供电,直到 1877 年碳电弧灯也仅在巴黎歌剧院使用。虽然碳电弧灯没有得到普及使用,但它开创了采用电力进行照明的先河,因此具有里程碑的意义。

在人类历史上,白炽灯是第一代被普遍使用的光源。尽管爱迪生并不是第一个发明白炽灯的,但他是第一个把白炽灯从实验室转变为实用的形式并成功推向市场的人。在他之前很多人都做了很多相关的研究工作,如 Swan、Cruto、Gobel、Farmer、Maxim、Lane-Fox、Sawyer、Mann 等。第一个白炽灯的专利是加拿大的 Henry Woodward 和 Matthew Evans,在 1874 年 7 月 24 日登记,这比爱迪生的发明早了 5 年(如图 1.1.7 所示)。可能在此前,德国化学家 Herman Sprengel 早在 1865 年就开始真空灯泡的研究。

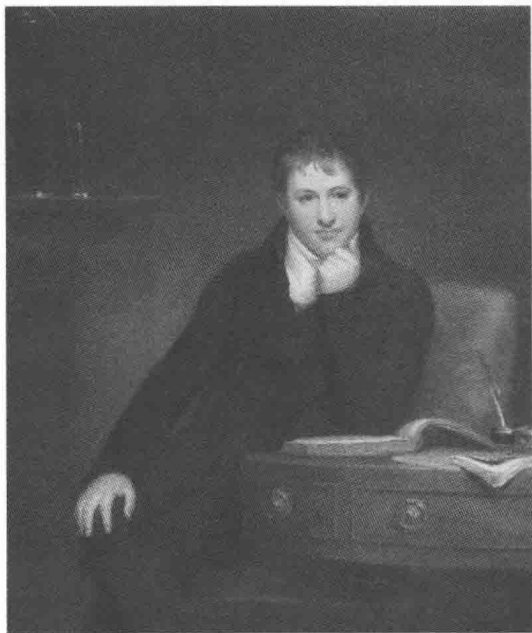


图 1.1.6 Humphrey Davy 爵士

1879年,爱迪生最先成功发明白炽灯(如图1.1.8所示)。在一个抽掉了空气的灯泡中放入一段炭化的棉线做灯丝,灯泡连续发光13h后灯丝才被烧断。后来,采用炭化的竹纤维为灯丝并加工做成产品,当时的功率为60W,光效仅1.4lm/W,寿命约100h。白炽灯是照明领域最成功的产品。目前在几乎所有家用照明应用中占主导地位。然而由于白炽灯只能将约 $\frac{1}{20}$ 的电能量转化为光能,它的效率很低。

随后人类文明迎来了电气照明迅猛发展的时代。1911 年,美国发明家 Peter Cooper Hewitt 申请了低压汞灯的专利,该灯是现今荧光灯的雏形(如图 1.1.9 所示)。1936 年,GE 的 George E. Inman 和 Richard N. Thayer 改进了先前的设计,制成第一个实用的荧光灯 38 mm(T12),光效约为 35 lm/W,显色指数为

1920 年, Arthur H. Compton 开始利用硼硅玻璃管研究钠蒸气的放电, 并发现钠会与玻璃作用形成黄褐色的吸光膜。1922 年 M. Pirani 和 E. Lax 开始进行钠蒸气放电的

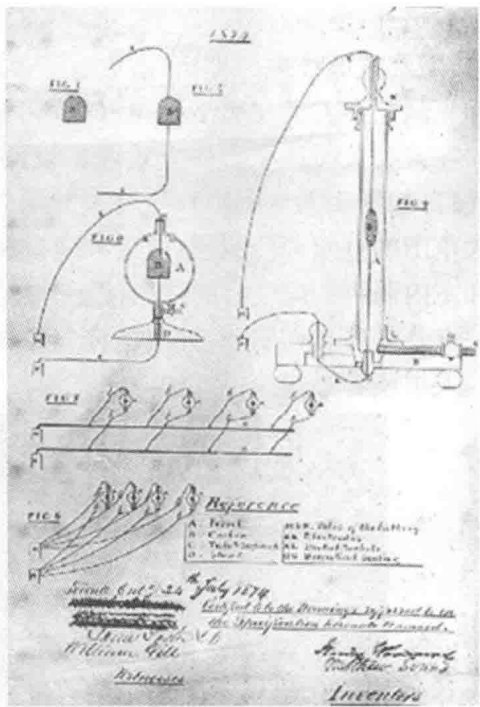


图 1.1.7 第一个白炽灯专利的设计图

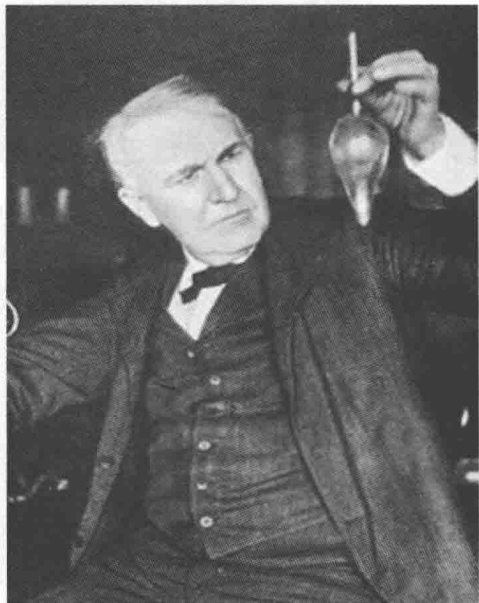


图 1.1.8 爱迪生和他发明的白炽灯泡

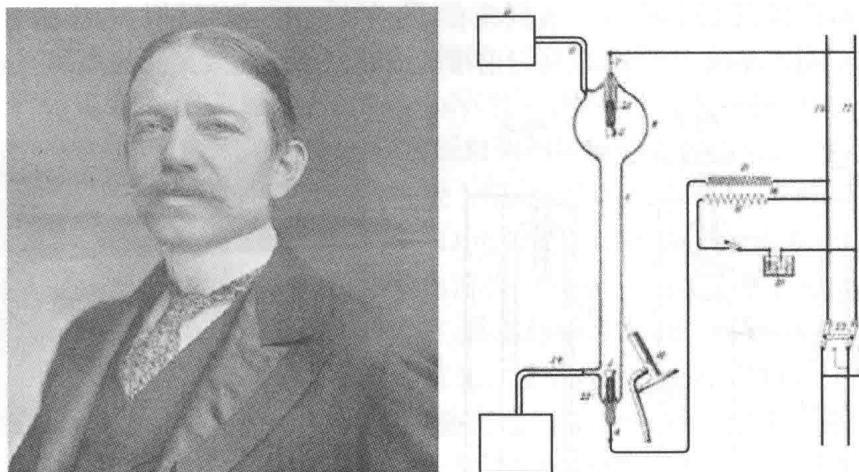


图 1.1.9 Peter Cooper Hewitt 和他申请的荧光灯专利

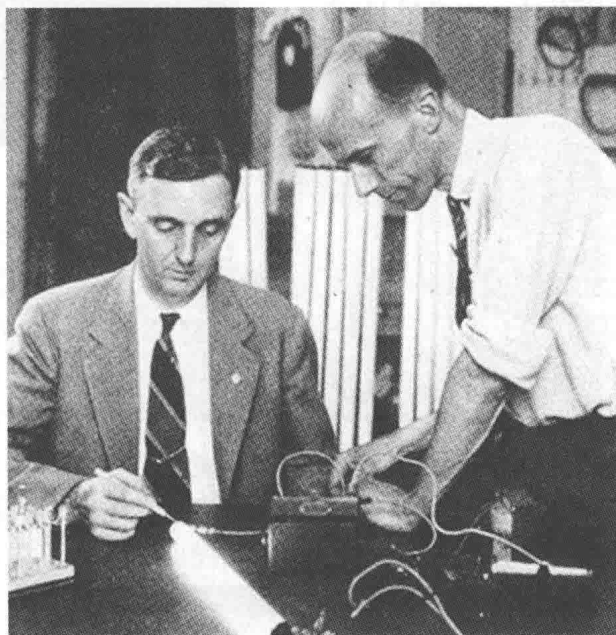


图 1.1.10 George E. Inman 和 Richard N. Thayer 设计荧光灯

照明实验。次年,Compton 和 C. C. Van Voorhis 成功得到了一个发光效率为 340 lm/W 的低压钠灯,该灯通过外部的炉子加热,计算光效时并没有考虑维持灯管最佳工作温度是炉子的能量消耗。1932 年,低压钠灯才真正进入市场。1927 年,德国科学家 Edmund Germer 申请了高压汞灯的发明专利(如图 1.1.11 所示)。1932 年,第一支高压汞灯的销售标志着“水银灯下”的高强度气体放电灯(HID)时代正式开始。

1961 年,GE 的 Gilbert Reiling 申请了第一个金属卤化物灯的专利(如图 1.1.12 所示),该灯适合用作商业、街道和工业的照明,金属卤化物灯在 1964 年的世界博览会上展出。1965 年,GE 公司发明的高压钠灯问世,主要用于道路照明。金属卤化物灯和高压钠灯的发明和应用,开辟并扩展了大功率高强度气体放电灯(HID)的应用场所,为道路照明、工业照明、商业照明和体育场馆照明提供了合适的照明解决方案,高强度气体



放电灯光效可以达到 150 lm/W 。直到现在,除荧光灯外、高压钠灯和金卤灯等电光源产品仍然是照明产品的主力军,也是目前市场成熟产品中光效最高的照明产品。

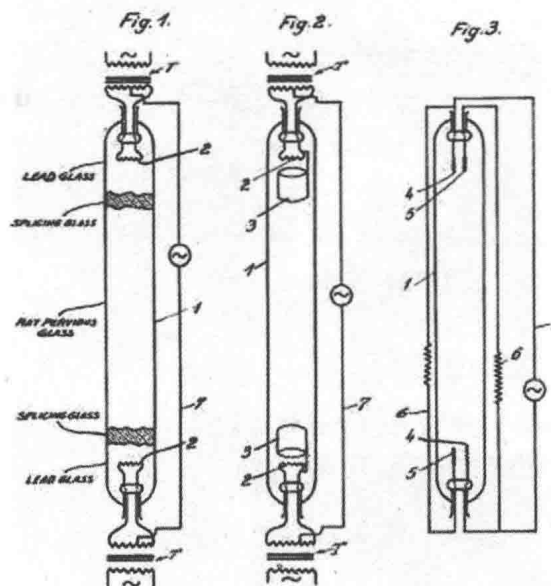


图 1.1.11 Germer 申请的汞灯专利



图 1.1.12 Gilbert Reiling 发明的
金属卤化物灯

20 世纪 70 年代开始,半导体材料的发光二极管(LED)引起人们的关注,经过 30 多年的研究和发展,LED 取得了长足的进步,现在半导体照明已被认为是传统光源在未来最有希望的替代品。1962 年 GE 先进半导体实验室的 Nick Holonyak Jr. (图 1.1.13) 发明了第一个实用的发出可见光的 LED 光源。当时所用的材料是 GaAsP(磷砷化镓),发红光,在驱动电流为 20 mA 时,光通量只有千分之几个流明,相应的发光效率仅约 0.1 lm/W 。他还认为未来能够发出其他波长的光,意味着 LED 将有很多种不同颜色的光,未来白炽灯一定会被 LED 取代。

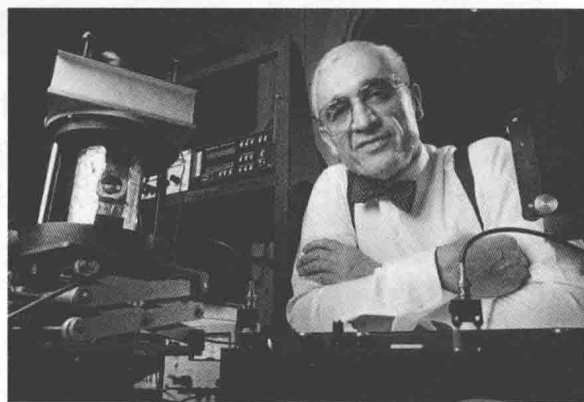


图 1.1.13 照明 LED 的发明者 Nick Holonyak

从 20 世纪 70 年代初期到中期,技术进展很快,光效提高到 1 lm/W ,而且发其他颜色的 LED 光源也相继面世,覆盖了从红色到黄-绿色的光谱范围。到了 80 年代初,出

现了 GaAlAs(砷化镓铝) LED 光源,使得 80 年代后期时红色 LED 的光效达到 10 lm/W 。在 20 世纪 90 年代初,两种新材料的 LED 光源被开发出来,即发红光、黄光的 GaAlInP(镓铝铟磷)和发绿、蓝光的 GaInN(氮化镓铟)。这两种材料的开发成功,使 LED 的光效又得到大幅度的提高。伴随着新材料的发展和光效的提高,单个 LED 光源的功率和光通量也在迅速增加。原先,一般 LED 的驱动电流仅为 20 mA 。到了 90 年代,一种代号为“食人鱼”(“Piranha”)的 LED 光源的驱动电流增加到 70 mA ,而代号为“梭子鱼”(“Barracuda”)的 LED 光源驱动电流为 $300\sim 500\text{ mA}$ 。现在已经有了驱动电流为安培级的大功率的 LED 光源。1994 年,日本科学家 Shuji Nakamura(如图 1.1.14 所示)在 GaN 基片上研制出了第一只蓝色发光二极管,由此引发了对 GaN 基 LED 研究和开发的热潮。1997 年成功开发生产出由蓝光激发荧光粉而产生白光的 LED 照明芯片,21 世纪后,光效不断提高,真正进入普通照明领域(110 lm/W)。LED 真正进入白光普通照明,其间也只用了 20 年不到的时间,其各方面性能指标都有赶超气体放电灯的趋势,是被公认为最具潜能的照明产品。

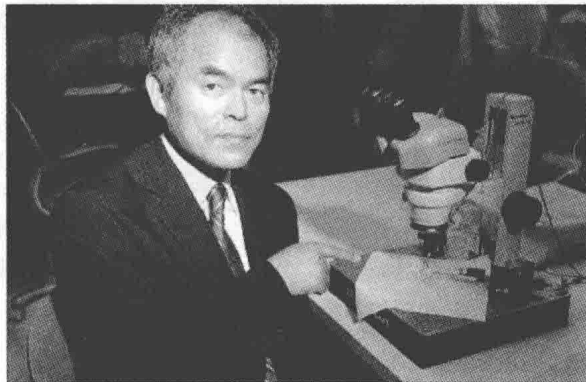


图 1.1.14 蓝光 LED 的发明者 Shuji Nakamura

目前各种光源的发展进程如图 1.1.15 所示,从人类文明进程中可以看到人类一直致力于光源的发展,满足人类照明的需求并实现保护环境可持续发展是当今社会人

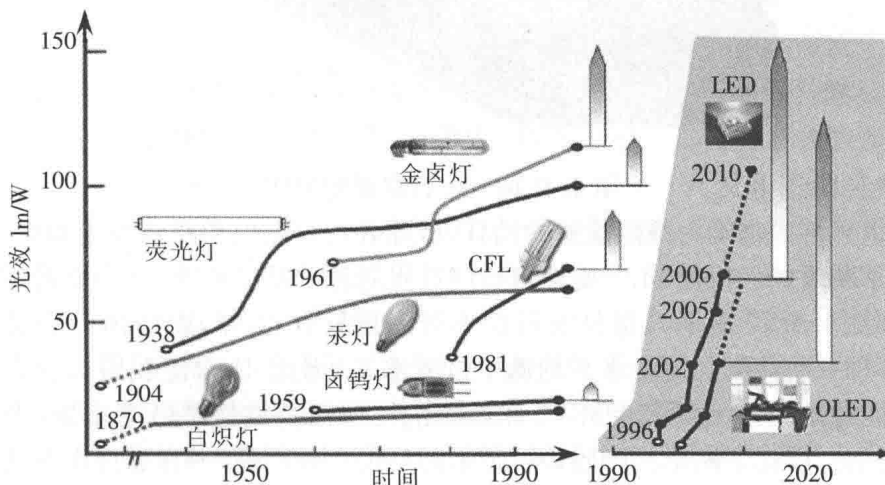


图 1.1.15 各种光源的发展历程



类的追求目标,因此无污染、高光效和长寿命是照明光源发展的方向与趋势。

1.1.2 能源与照明

1.1.2.1 能源概况

在传统的能源消费结构中,以石油、天然气和煤炭为主的化石能源占有重要比例。这些化石能源的产生如图 1.1.16 所示,亿万年前的古生物吸收太阳能辐射到地球上的部分能量后经过沧海桑田的演化才变成了今天的化石能源。随着人类近百年的消费,这些化石能源的消耗非常快,根据专家预计地球上通过 25 亿年累积的化石能源,人类只要 400 年就可以消耗殆尽,因此能源危机在人类进入 21 世纪以来显得更加严重。

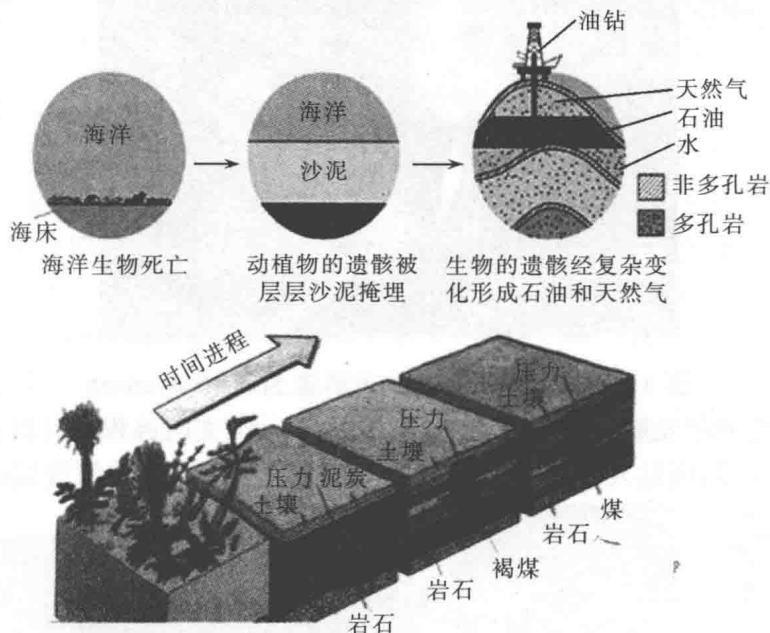


图 1.1.16 化石能源的形成

尽管世界各国都竭力降低能源的消耗,但随着人口规模和经济体量的增大,能源的消耗还在不断增加。根据 21 世纪初进行的世界能源储备的调查,化石能源的储备已经不多了(如图 1.1.17 所示),世界上石油的可采量只有 35 年,而中国的能源储备量更少,中国各种一次能源的储量水平均低于世界水平,因此 21 世纪我国高速发展的重要瓶颈就是能源短缺。一百多年来,全球能源消耗增幅基本趋于稳定态势,平均每年呈 3% 指数增加。能耗不断增长的趋势所带来的后果十分严重:一方面伴随着化石燃料消耗的增加,大气中 CO_2 的含量相应增加,地球不断变暖,生态环境恶化,自然灾害及其造成的损失逐年增加,另一方面将愈来愈快地消耗掉常规化石能源储量。能源的潜在危