

激光产品的 安全与辐射防护

陈虹 © 编著



中国质检出版社
中国标准出版社

激光产品的安全与 辐射防护

陈 虹 编著

中国质检出版社

中国标准出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

激光产品的安全与辐射防护/陈虹编著. —北京: 中国标准出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-5066-7893-3

I. ①激… II. ①陈… III. ①激光—光辐射—辐射防护
IV. ①TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 087945 号



内 容 提 要

本书共分 8 章, 分别讲述了光与激光、辐射种类与辐射伤害、激光辐射损伤预防、激光辐射对人体的伤害、激光安全标准化工作、激光产品的安全分级、激光产品的安全防护措施、非光辐射危害与实验室安全等内容。

本书主要读者对象为从事激光技术领域工作的科研人员、工程技术人员及高年级研究生, 还可供普通大众作为科普读物。

中国质检出版社
出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100029)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010) 68533533 发行中心: (010) 51780238

读者服务部: (010) 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/32 印张 6.625 字数 173 千字

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月第一次印刷

*

定价 28.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

序 言

激光作为一种制造光源，具有高指向性、高亮度、高能量、可变波长和良好的时间特性，可以将很高的能量聚集在微小的光斑内，其应用领域不断拓宽，在工业、国防、医疗、照明、显示等领域逐渐显示出广阔的发展前景，几乎“无所不在”。

激光可以制导，也可以致盲。国内有很多激光秀、激光表演，这其中都存在着激光辐射伤害隐患。目前，人们对核辐射安全有一定的认识，但对激光辐射的概念及其危害的特殊性和隐蔽性认识不足，激光辐射安全宣传和教育显得尤为重要。在这种情况下，本着以人为本的理念，作者对激光安全做了一个科普性的介绍。

希望本书的出版能够抛砖引玉，在促进我国激光技术应用发展的同时，使激光安全领域的科学研究得到更多的重视，为我国激光事业未来发展奠定科学的、安全的、健康的基础。



2015年7月13日

前言

科学技术是第一生产力，科学技术服务于人类，任何科学技术的发展最终都将归结到人文层面，体现“以人为本”的科技本质。自20世纪中后期以来，计算机、互联网、电子电气技术、医疗技术、通讯技术、制造技术、激光技术等新兴技术层出不穷，其发展欣欣向荣。每当一种新的技术或方法进入科学领域，总会引起人类生活的革命性变化，产生了许多创新研究、创新管理和创新服务，这些新东西使我们或多或少能够领悟到严肃的思想，是非观念，使我们得到教育和启迪，进一步思考人类面对的机遇和挑战。

半个多世纪前的一天，即1960年5月16日，那天也许是个晴朗的日子，年仅32岁的工程师Theodore Maiman在他的实验室研制成功了世界上第一台红宝石激光器，他搬动开关的那一刻，就是激光诞生的时刻。几个月后，同样在1960年，第一台氦氖激光器在贝尔实验室诞生。1962年，第一台半导体激光器二极管激光器在美国通用电气研究室诞生。自激光器诞生后，有超过10项诺贝尔奖授予了激光相关研究，包括理论研究和应用研究。1961年，诺贝尔物理学奖授予美国加利福尼亚州斯坦福大学的霍夫斯塔特（Robert Hofstadter, 1915—1990），以表彰他对核子结构和穆斯堡尔效应的发现。1963年，诺贝尔物理学奖授予美国物理学家维格纳（Eugene Paul Wigner, 1902—1995），以表彰他对原子核和基本粒子理论，特别是通过基本对称原理的发现和所做贡献。1964年，诺贝尔物理学奖一半授予美国马萨诸塞州坎布里奇麻省理工学院的汤斯（Charles H. Townes, 1915—2015），另一半授予前苏联的莫斯科苏联科学院列别捷夫物理研究所的巴索夫（Nikolay G. Basov, 1922—2001）和普罗霍罗夫（Aleksandr

激光产品的安全与辐射防护

M. Prokhorov, 1916—2002), 以表彰他们从事量子电子学方面的基础工作, 这些工作帮助了基于微波激光器 and 激光原理制成的振荡器和放大器。1968 年, 诺贝尔物理学奖授予美国加利福尼亚州伯克利加州大学的阿尔瓦雷斯 (Luis W. Alvarez, 1911—1988), 以表彰他对基本粒子物理学的决定性贡献。1971 年, 诺贝尔物理学奖授予英国伦敦帝国科技学院的匈牙利裔物理学家伽博 (Dennis Gabor, 1900—1979), 以表彰他发明和发展了全息术。1981 年, 诺贝尔物理学奖的一半授予马萨诸塞州哈佛大学的布隆姆贝根 (Nicolaas Bloembergen, 1920—) 和美国加利福尼亚州斯坦福大学的肖洛 (Arthur L. Schawlow, 1921—1999), 以表彰他们在发展激光光谱学所做的贡献; 另一半授予瑞典乌普萨拉 (Uppsala) 大学的凯·西格班 (Kai M. Siegbahn, 1918—2007), 以表彰他在高分辨率电子能谱学所做的贡献。1989 年, 诺贝尔物理学奖授予美国物理学家拉姆齐 (Ramsey, Norman F, 1915—2011), 以表彰他发展了原子精确光谱学和发明了分离振荡场方法以及将其用于氢微波激光器和原子钟。1997 年, 诺贝尔物理学奖授予美国加州斯坦福大学的朱棣文 (Stephen Chu, 1933—)、法国巴黎法兰西学院和高等师范学院的科恩-塔诺季 (Claude Cohen-Tannoudji, 1933—), 以表彰他们在发展用激光冷却和陷俘原子的方法方面所做的贡献。2000 年, 诺贝尔物理学奖授予三位科学家, 他们是俄罗斯圣彼得堡约费物理技术研究所的泽罗斯-阿尔费罗夫 (Ihores I. Alferov, 1930—)、美国加利福尼亚大学的赫伯特—克勒默 (Herbert Kromer, 1928—) 和德州仪器公司的杰克·S·基尔比 (J. S. Kilby, 1923—)。以表彰他们为现代信息技术做出的基础性贡献, 特别是他们发明的快速晶体管、激光二极管和集成电路 (芯片)。2005 年, 诺贝尔物理学奖授予两名美国科学家格拉布尔 (Roy J. Glauber, 1925—) 和哈尔 (John L. Hall, 1934—) 以及一名德国科学家汉什 (Theodor W. Hänsch, 1941—), 表彰格拉布尔在光学相干的量子理论领域做出的贡献, 表彰哈尔和汉什两人在激光精密光

谱学，包括光频梳技术领域取得的成就。2009年，诺贝尔物理学奖授予英国华裔科学家高锟（Charles K. Kao, 1933—）以及美国科学家威拉德·博伊尔（Willard Boyle, 1924—2011）和乔治·史密斯（George Smith, 1930—），表彰高锟在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”取得了突破性成就，表彰博伊尔和史密斯发明了半导体成像器件——电荷耦合器件（CCD）图像传感器。

1961年8月，中国第一台激光器在中国科学院长春光学精密机械研究所诞生，王之江教授被称为“中国激光之父”。在此后50多年的时间里，激光技术作为新兴角色在中国科学技术大舞台崭露头角，从最初的测距、数据存储、数据传输，逐渐发展到激光表演、激光医疗、国防、激光制造，渗透到教育、科学、经济等关系到国计民生的各个领域，并与机械、电子、生物、医学、材料等多个学科交叉，在科研、工业、商业和医疗领域发挥着先导性作用，展示了强大而深厚的发展潜力。中国激光技术经历了长时间的探索和积累，加之中国改革开放和市场经济的发展，极大地推动了激光科学技术的研发和应用，激光成为过去50多年来最具革新性的技术。

科学技术的发展与经济、社会的发展相互促进，最终都将归结到人文层面，激光技术也不例外。随着激光技术在人们日常生活中的普及，对激光辐射危害隐蔽性和特殊性的认识迫在眉睫。通常人们对高功率激光器可以直观地意识到激光辐射对人体的危害，具有本能的防护意识。实际上，具有一定强度的激光束即使仅仅通过一张纸或者一面墙的反射，也有可能对眼睛造成永久性的伤害。而激光辐射安全防护首先需要的就是“认知”，所谓“无知者无畏”，这正是激光辐射伤害事件频发的基本原因。在已知的激光辐射伤害事故中，70%以上是激光对眼睛的伤害，而在对眼睛的伤害事故中，90%以上是对视网膜的永久性损伤。现在一些旅游热点地区、海边，经常可以看到小贩兜售绿光激光笔，绿光能够发射到很高很远的天幕，而且通过模板还能够变幻出不同的形状，吸引了许多游客，特别是小朋友的注意力。另外，在大型室内舞台演出中，为防

激光产品的安全与辐射防护

止观众录影录像，常有工作人员手持绿光激光笔，发现录影录像的观众，就将绿光直接照射到摄影摄像机上，起到提醒警告的作用。殊不知这种绿光激光笔属于 3R 类激光产品，如果直接照射眼睛，可能会造成视网膜的永久损伤。可以预见，在不久的将来，人们装修房屋时都会用激光器测量尺寸、找平，激光舞台表演将更普及，儿童激光玩具也会层出不穷，激光笔也会拓展除教学外更多用途……如果对激光辐射伤害不进行系统地防护或者未能给予足够的重视，“激光”是不安全的。

激光安全是所有从事这一领域的科研和工程技术人员首先应该注意并尽到责任的问题。“基本知识—认知与经验相结合—规则—程序—习惯养成”，遵循这一基本规律，对我们来说“激光”是安全的。本书正是依据这一规律，从激光技术的起源出发，以国际标准化组织、国际电工组织、美国激光学会、中国国家标准化管理委员会发布的激光技术标准为基础，对激光辐射安全防护进行系统而通俗的讲述，以揭示激光辐射伤害、激光辐射安全防护的机理。同时，从另一个侧面，对人类与科技发展的相互作用进行理性的探讨。因此，本书不仅对从事激光技术领域工作的科研人员、工程技术人员及高年级研究生有一定的参考价值，还对普通大众有一定程度的科普意义。

激光辐射安全防护在我国还像是一个刚出生的婴儿，在这一领域开展工作无疑是一项新的和有意义的工作，它要求研究者必须把科学逻辑思维与通俗讲述的形象思维巧妙结合并加以综合运用。本书作者作为一名普通的教师，对此要求感到力不从心，书中的不当之处，恳请广大读者指出。

编 者

2015 年 1 月

| CONTENTS | 目 录

第一章 光与激光 / 1

- 1.1 什么是光? / 1
- 1.2 光源和光谱 / 6
- 1.3 光强和光的亮度 / 7
- 1.4 什么是激光? / 9
- 1.5 激光光束特性 / 20
- 1.6 什么是激光科学与工程? / 25

第二章 辐射种类与辐射伤害 / 28

- 2.1 辐射种类 / 28
- 2.2 辐射计量 / 37
- 2.3 辐射伤害 / 38

第三章 激光辐射损伤机理 / 51

- 3.1 热效应 / 52
- 3.2 光化学效应 / 57
- 3.3 等离子体诱导蚀除 / 61
- 3.4 光致破裂 / 61
- 3.5 非线性效应 / 61
- 3.6 压力效应 / 62
- 3.7 电磁场效应 / 62

第四章 激光辐射对眼睛的伤害 / 63

- 4.1 眼睛的生理结构 / 63
- 4.2 激光辐射对眼睛伤害的波长依赖 / 71

激光产品的安全与辐射防护

4.3 激光辐射对视网膜的损伤 / 78

4.4 激光辐射对皮肤的伤害 / 81

第五章 激光安全标准化工作 / 84

5.1 国际标准化机构 / 84

5.2 中国标准化工作 / 93

第六章 激光产品的安全分级 / 105

6.1 激光产品安全分级的物理量依据 / 106

6.2 激光辐射的定量描述 / 109

6.3 其他术语和定义 / 110

6.4 人眼观察激光辐射的常见方式 / 112

6.5 激光产品的分类 / 114

6.6 激光产品危害评估的环境因素 / 133

6.7 激光辐射危害参数的计算 / 135

6.8 激光产品分级计算 / 155

第七章 激光产品的安全防护措施 / 167

7.1 工程防护措施 / 167

7.2 管理防护措施 / 171

7.3 个人防护措施 / 172

第八章 非光辐射危害与实验室安全 / 173

8.1 非光辐射危害 / 174

8.2 实验室安全 / 179

附录 物理量名称及符号表 / 195

参 考 文 献 / 197

第一章 光与激光

什么是光？什么是激光？本章将主要回答这两个问题。

关于“光”，似乎很简单，有人说，光就是“亮”，亮就是“光”，有人说光就是太阳，也有人说光就是希望，是在无尽黑暗中等待、摸索、前行，但依然坚持的信心……关于“激光”，似乎很悬很难，人们回答的时候往往先张大嘴巴，然后感慨一句“高科技啊”，或者眼前浮现出《变形金刚》、《007》、《星球大战》那些大片里的激光枪、激光炮……

1.1 什么是光？

什么是光？就先从《圣经》故事开始吧。

上帝用七天创造了天地万物，第一天便创造了光。第一天，上帝说：“要有光！”便有了光；上帝将光与暗分开，称光为昼，称暗为夜，于是有了早晨和晚上。第二天，上帝创造了空气；第三天，上帝将水和旱地分开，称旱地为大陆，称众水聚积之处为海洋，上帝又吩咐，地上要长出青草和各种各样的开花结籽的蔬菜及结果子的树，果子都包着核；第四天，上帝创造了太阳和月亮，太阳管理白天，月亮管理夜晚，又创造了无数星星，嵌列在暗蓝色天幕之上；第五天，上帝创造出鱼和各种水中的生物，又创造出飞鸟，并赐福给一切，让它们繁衍生息；第六天，上帝创造出了牲畜、野兽和昆虫，让万物并作，有声有息，最后上帝照着自己的形象创造了人，来管理万物；第七天，天地万物都造齐了，上帝完成创世之功，歇工休养。

在中国的传说中，在天地还没有开辟以前，宇宙就像是一个鸡蛋一样，混沌一团，盘古在其中一直酣睡了 18000 年后醒来，凭借自己的神力撑破大鸡蛋，于是有了天地，有了光。杜甫的诗：“造化钟神秀，阴阳割分晓”，宇宙万物就是这样开辟鸿蒙，创造出来的。如果人类没有进化出眼睛来接受可见光（一定的频段），那么并不存在所谓的光明和黑暗。光—电磁波在宇宙中穿梭多少亿年，宇宙还是那么黑暗，因为没有人类的眼睛来感受光明。

正因为有了光，才有了地球生命像现在这样的演进方向。缘起性空，光是世间万物诞生的缘起。光是地球生命的来源之一。光是一种自然现象，人类是通过眼睛接受物体发射、反射或散射的光，才能够看到世界上色彩斑斓的景象，光是人类认识外部世界的依据，我们从外部世界接收到的总信息中，至少 90% 以上是通过眼睛获得的。

早在 17 世纪，荷兰大科学家惠更斯（Christiaan Huygens，1629—1695）创立了光的波动说，他认为光必然是一种振动，在弹性介质中以波的形式向周围传播。

牛顿（Isaac Newton，1643—1727）比惠更斯小一轮，1704 年，牛顿说：“光是一种细微的大小不同的而又迅速运动的粒子”，是按照惯性定律沿直线飞行的粒子流。牛顿是粒子说的领军人物，光的粒子说可以很好地解释光沿直线传播以及光的反射现象。

光学两大理论——波动说和粒子说。微粒说认为光是按照惯性定律沿直线飞行的粒子流，很容易解释光沿直线传播，以及光的反射及偏振现象。但在解释一束光在两种介质分界面处会发生反射和折射，以及几束光相遇后，会彼此毫无妨碍地继续向前传播等现象时，遇到了很大的困难。由于牛顿在学术界的声望，微粒说统治了 100 多年，波动说发展很缓慢。

托马斯·杨（T. Young，1773—1829）的双缝干涉实验和菲涅尔（A. J. Fresnel，1788—1827）的衍射实验解释了光的干涉和衍射现象，更好地解释了光的波动理论，使光的波动说在比较坚实的基础上确立起来。杨氏双缝干涉实验（见图 1-1）是指，从小孔中

射出的光穿过两道狭缝投到屏幕上，就会形成一系列明、暗交替的条纹。菲涅尔衍射实验中，光离开直线路径绕到障碍物阴影里去的现象叫光的衍射。

1818 年，巴黎科学院举行了一次解释衍射的有奖竞赛，泊松 (Simeon-Denis Poisson, 1781—1840) 当时 37 岁，是这次竞赛的评委，也是光的微粒说的忠实拥护者，希望鼓励大家用微粒理论解释衍射现象。当时菲涅尔只有 30 岁，他用子波叠加原理解释了光的衍射现象。泊松仔细阅读了菲涅尔的论文，运用菲涅尔的方程推导圆盘衍射，得到了一个令他惊讶的结论，在圆盘后方一定距离的屏幕上，圆盘影子的中心将出现亮斑，泊松认为这是不可能想象的荒谬结论。后来，实验非常完美地证实了菲涅尔的理论，圆盘影子中心果然出现了亮斑。最后，菲涅尔当之无愧地获得了这一届科学奖，人们也戏剧性的将这个亮斑称为“泊松亮斑” (见图 1-2)。



图 1-1 杨氏双缝干涉实验

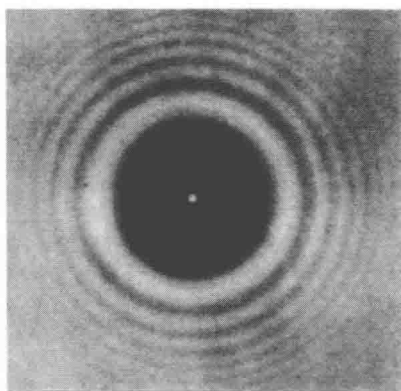


图 1-2 泊松亮斑

1865 年，麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879) 建立了著名电磁场理论，预言了电磁波的存在，并指出光也是电磁波，电磁波的速度与光速相同。1887 年，赫兹 (H. R. Hertz 1857—1894) 用实验探测到了波长较长的无线电波，证实了麦克斯韦理论的正确性。此时，光的本质使电磁波获得普遍公认，光的波动理论居于绝对的统治地位。

1900年，普朗克（M. E. Planck, 1858—1947）用量子假设解释了黑体辐射实验，提出了量子假说。1905年，爱因斯坦（A. Einstein, 1879—1955）用光量子理论成功地解释了光电效应。1913年，波尔（N. H. D. Bohr, 1885—1962）用光量子理论解释了氢原子光谱。

至此，关于光的本性的问题有了科学的答案——“波粒二象性”。

光的量子理论反映了光的间断性，不能解释光的波动现象，反过来，光的波动说也不能解释光的量子性，它们都存在合理性。光的微粒说和波动说两大理论长期激烈的竞争，有效地推动了科学的发展，最终导致了一种新的思想和成果的出现——波粒二象性。

光就其本质而言，是一种电磁波，也是一种电磁辐射。所有电磁波的运动都可以用波长、频率和波速来描述。电磁波场中每点的物理状态随时间做周期性变化，而在每一瞬时波长中各点物理状态的空间分布呈现出一定的周期性，伴随着电磁波运动，有能量的传输。图 1-3 为电磁波的波长和振幅。

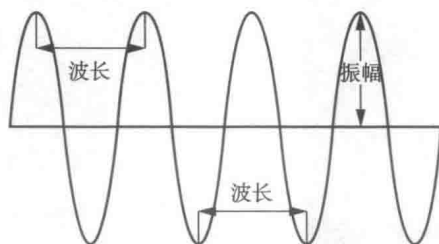


图 1-3 电磁波的波长和振幅

电磁波又称为电磁辐射，是有相同振荡且相互垂直的电场与磁场在空间以波的形式移动，其传播方向垂直于电场与磁场构成的平面，有效传递能量和动量。电磁波可以按照频率和波长分类，从低频到高频，包括无线电波、微波、红外光、可见光、紫外线、X射线和 γ 射线等。电磁辐射强度随频率的减小而急剧下降，波长为几公里（ 10^5m ）的低频电磁波强度很弱；实际应用中的无线电波，波长约几千米；按照波长可以分为中波、短波、微波，中波、短波适

用于无线电广播和通信，微波用于电视、雷达等；激光的波段在 $180\text{nm} \sim 1\text{mm}$ ，可见光范围在 $400\text{nm} \sim 760\text{nm}$ 。长波长称为红外线，红外线的热效应特别显著；短波长称为紫外线，紫外线有显著的光化学效应和荧光效应。

图 1-4 所示为光的波长范围，从波长最短的宇宙射线到长波无线电波，都可以称之为“光”。

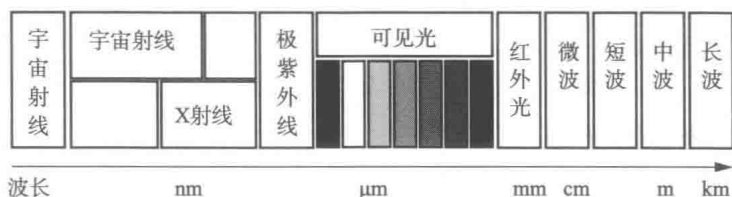


图 1-4 光的波长范围

在光广阔的波长范围中， $400\text{nm} \sim 760\text{nm}$ 的电磁波能够被人类的眼睛所感知，称为可见光。不同波长的光，能引起不同的颜色感觉，颜色由波长决定。图 1-5 为可见光波谱。

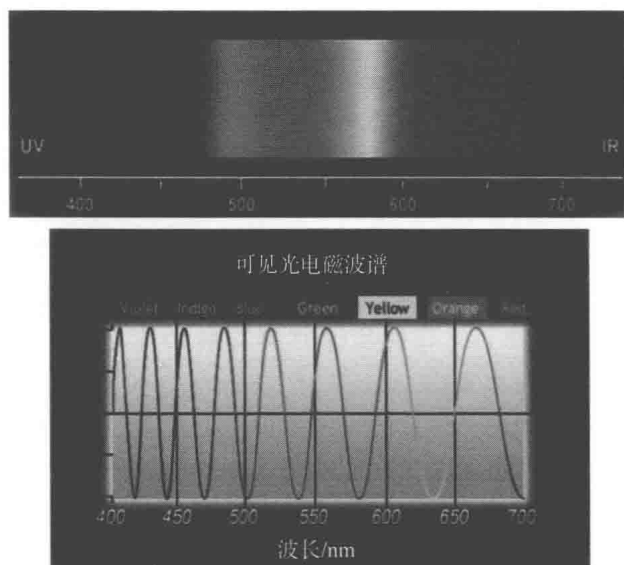


图 1-5 可见光波谱

与可见光衔接的短波一侧是紫外光，长波一侧是红外光。紫外光在电磁波谱中范围波长为 $100\text{nm}\sim 400\text{nm}$ ，进一步被划分为近紫外（UVA）、远紫外线（UVB）和超短紫外线（UVC），波长范围分别为 $400\text{nm}\sim 315\text{nm}$ 、 $315\text{nm}\sim 280\text{nm}$ 、 $280\text{nm}\sim 100\text{nm}$ 。红外线的波长范围在 $760\text{nm}\sim 1\text{mm}$ 之间。所有温度高于绝对零度的物体，都可以产生红外线。波长小于 1000nm 的称为近红外，波长大于 10^4nm 的称为远红外，两者之间是中红外。太阳的热量主要通过红外线传到地球。

1.2 光源和光谱

任何发光的物体，都可以称为光源。自然界中物体的温度只要高于绝对零度，就会向外辐射能量，释放出电磁波，根据物体温度不同，所释放的电磁波包括可见光和红外线、紫外线等不可见光。这种辐射与温度有关，在一定温度下处于热平衡状态下物体的辐射，称为热辐射，太阳、白炽灯光的散发属于热辐射。

除热辐射外，还有诸多非热辐射发光，包括：①电致发光，放电管内工作气体靠电场激励受激发光，如日光灯、水银灯、霓虹灯；②荧光，指工作物质在 X 射线、紫外光、可见光或电子束的照射或轰击下，吸收能量受激发出的可见光，如日光灯或霓虹灯管壁上的荧光物质、示波管或显像管中的荧光屏；③化学发光，指由于化学反应而发光的过程，如腐烂物体中的磷在空气中缓慢氧化发出的光；④磷光，指工作物质在 X 射线、紫外光或可见光的照射后，发光现象持续存在，工作物质通常都为磷光性材料，如夜明珠；⑤生物发光，如萤火虫。

单位波长取決的光强按波长的分布称为光谱，不同的光源有不同的光谱。将 dI_λ 代表波长 λ 到 $(\lambda+d\lambda)$ 之间光的强度，式 (1-1) 代表单位波长区间的光强。

$$i(\lambda) = \frac{dI_\lambda}{d\lambda} \quad (1-1)$$

非单色光的 $i(\lambda)$ 按波长的分布称为光谱, $i(\lambda)$ 称为谱密度, 总光强与谱密度的关系见式 (1-2):

$$I = \int_0^{\infty} dI_{\lambda} = \int_0^{\infty} i(\lambda) d\lambda \quad (1-2)$$

普通的光源都不是单色光, 热辐射光源的光强在很大的波长范围内连续分布, 称为连续光谱; 如果光强集中在一些分立的波长值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 附近形成一条条谱线, 这种光谱称为线光谱, 如气体 (或金属蒸汽) 放电发射的光谱。每条谱线只是近似的单色光, 它们的光强分别有一定波长范围 $\Delta\lambda$, $\Delta\lambda$ 称为谱线宽度, $\Delta\lambda$ 越小, 表示光的单色性越好。

1.3 光强和光的亮度

1.3.1 光能

光是以光子为基本粒子组成, 光子是最小能量单元, 光子与其他基本粒子一样, 具有能量、动量和质量等。光能是光子运动对应的能量形式, 也是一种可再生能源。光能的英文表达为 “Luminous energy”, 国际符号是 Q_v , 国际单位为流明·秒 ($\text{lm} \cdot \text{s}$)。

1905 年, 爱因斯坦 (Albert Einstein) 在解释光电效应实验时提出, 光是由最小能量单元 $h\nu$ —光子组成, 一个单光子携带的能量表示为:

$$\varepsilon = h\nu \quad (1-3)$$

式中, ν 是光的频率; h 称为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

光子具有运动质量 m , 并可以表示为:

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \quad (1-4)$$

光子的静止质量为零。

光能最直接的能量转换就是转变为热能。目前, 世界能源消费总量持续增长, 太阳能被认为是未来主要能源。将光能精细聚焦后