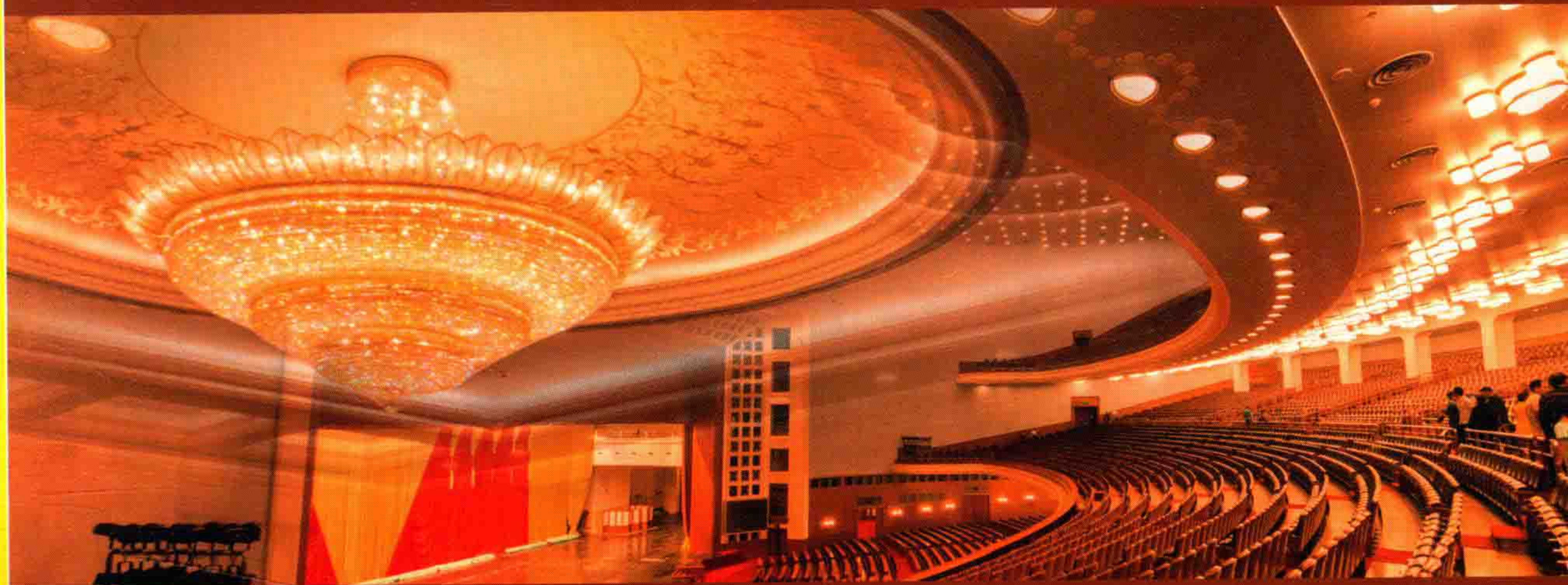


电子工程技术丛书

半导体照明技术 (第二版)

● 方志烈 编著



 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子技术丛书

半导体照明技术(第二版)

方志烈 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书在介绍半导体照明器件——发光二极管的材料、机理及其制造技术的同时，详细讲解了器件的光电参数测试方法，器件的可靠性分析、驱动和控制方法，以及各种半导体照明的应用技术。本书内容系统、全面，通过理论联系实际，重点突出了“半导体照明”主题，反映了国内外最新的应用技术。

本书可供半导体照明方面的科研人员和工程技术人员参考，也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

半导体照明技术/方志烈编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2018. 5

(电子工程技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 121 - 34036 - 9

I. ①半… II. ①方… III. ①半导体发光灯 - 照明技术 IV. ①TM923. 34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 069710 号

责任编辑: 刘海艳

印 刷: 三河市君旺印务有限公司

装 订: 三河市君旺印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787 × 1092 印张: 24. 75 字数: 634 千字

版 次: 2009 年 5 月第 1 版

2018 年 5 月第 2 版

印 次: 2018 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 2000 册 定价: 79. 00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: lhy@phei.com.cn。

序

半导体照明是指用全固态发光器件(发光二极管,即LED,是由半导体材料制成的光电器件,可将电能转换为光能)作为光源的照明,具有高效、节能、环保、寿命长、易维护等显著特点,是近年来全球最具发展前景的高新技术领域之一,是人类照明史上继白炽灯、荧光灯之后的又一场照明光源的革命。半导体照明有着巨大的市场与技术创新空间,对提升传统照明工业、带动相关产业发展、扩大就业、培育新的经济增长点意义重大。

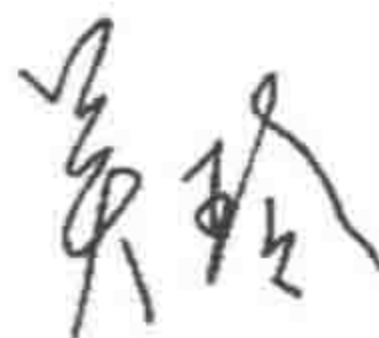
自2003年6月启动国家半导体照明工程以来,以节能、环保,实现绿色照明,促进传统照明产业升级,培育有国际竞争力的半导体照明新兴产业为目标,以“政府引导、企业主体、市场化运作”为原则,经过几年努力,已经形成了从上游材料、芯片到中、下游封装、应用的比较完整的研发与产业体系。2008年,我国半导体照明产业产值已达700亿元,芯片国产化率接近50%,企业总数突破3000家。我国已成为LED全彩屏、太阳能LED灯、景观照明等应用产品世界最大的生产和出口国,以及国际重要的LED器件封装基地。我国半导体照明产业进入了自主创新、实现跨越式发展的重大历史机遇期,正迎来蓬勃发展的春天。预计2010年,产业规模将达1000亿元。

本书作者从事发光二极管科研和教学工作近40年,曾于1992年编著出版《半导体发光材料和器件》一书,以信息显示为主要内容。近20年的发展,LED发光效率提高了100倍,特别是蓝光和白光LED的发展,使之成为照明领域的新秀。半导体照明科研和产业的发展迫切需要一本半导体照明技术方面的专著。本书从半导体发光器件和照明两个角度,在介绍半导体照明器件——发光二极管的材料、机理及其制造技术的同时,详细阐述了器件的光电参数测试方法、器件的可靠性分析、驱动和控制方法,以及各种半导体照明的应用技术。

本书内容系统、全面,理论联系实际,重点突出了“半导体照明”主题,反映了国内外最新的技术进展。书中有些内容也反映了作者及其同事们在这一领域的科研成果。

我们希望本书对半导体照明的研发和应用感兴趣的相关人员有所帮助。本书可供高等学校相关专业的教师和学生阅读,也可供从事半导体照明研究和制造的科研人员和生产技术人员参考。

国家半导体照明工程研发及产业联盟秘书长



北京新材料科技促进中心主任

2009年5月4日

二版前言

2014年10月7日,诺贝尔物理学奖揭晓,赤崎勇、天野浩、中村修二因发明“高亮度蓝色发光二极管”而荣获瑞典皇家科学院授予的2014年度诺贝尔物理学奖。颁奖词称:蓝光LED的出现使得我们可以用全新的方式创造白光。随着LED灯的诞生,我们有了更加持久、更加高效的新技术来取代古老的光源。白炽灯照亮20世纪,而LED灯将照亮21世纪。此次获奖是对半导体照明产业巨大价值予以的最大肯定,也是对我国半导体照明产业界的充分肯定和莫大鼓舞。

我国自2003年6月启动国家半导体照明工程以来,在薄弱的基础上,努力拼搏,团结奋进,建成了从上游材料、芯片到中、下游封装应用,以及制造设备、测试仪器完整的产业链。2017年,半导体照明总产值达6538亿元,与通用照明启动的半导体照明元年——2010年产值的1200亿元相比增长了5.4倍。通用照明已占应用市场的47.9%,成为应用市场的第一驱动力。已有四五家企业超过50亿元营收规模,向100亿元进军。全年LED照明产品产量达106亿只,同比增长34%。国内市场渗透率达65%。LED已成为主流光源。全年节电1983亿千瓦时,减少碳排放1.78亿吨。全年出口达129亿美元,国际市场上80%以上的产品产自中国。产业拥有MOCVD设备超过1700台,占国际拥有量首位,而且国内已有多家企业批量生产MOCVD设备,并投入使用。全套芯片、器件、灯具的自动化生产设备已能批量生产。我们已经成为半导体照明大国,并且正在做强,照明强国雏形已现。我们已从早春二月,创造出阳春三月,正在创造LED照明的四月艳阳天,从胜利走向辉煌,实现半导体照明的中国梦!

《半导体照明技术》自2009年出版以来共印一万多册,深得读者之厚爱。更值得欣慰的是,书中所述各种技术已基本实现,仅有全LED白光和光子晶体这两项技术尚待最后突破。

2009年以来半导体照明产业的蓬勃发展,不仅充实和丰富了原书提出的技术内容,还出现了许多如芯片级封装(CSP)、智能灯具、COB组件、Micro-LED等新技术和新产品,显色指数、中间视觉、色容差等研究成果也开始付诸应用,大量的LED照明灯具开始进入千家万户,而科研和产业的发展还有更大的空间,预计到2020年左右,总产值将达万亿元。电子工业出版社副总编辑赵丽松建议,对原版修改和增补,以新的面貌再版,使之更能反映当前该领域的科技进步和最新科技成果,展示半导体照明研发和产业的发展方向。

本书可供半导体照明领域的科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

我对电子工业出版社的建议和鼎力支持深表感谢!限于时间仓促,书中不当和欠缺之处在所难免,请读者批评指正。

复旦大学 方志烈
2018年3月于上海

目 录

第1章 光 视觉 颜色	1
1.1 光	1
1.1.1 光的本质	1
1.1.2 光的产生和传播	3
1.1.3 人眼的光谱灵敏度	6
1.1.4 光度学及其测量	8
1.2 视觉	13
1.2.1 作为光学系统的人眼	13
1.2.2 视觉的特征与功能	15
1.3 颜色	19
1.3.1 颜色的性质	19
1.3.2 国际照明委员会色度学系统	20
1.3.3 色度学及其测量	24
第2章 光源	31
2.1 自然光源	31
2.1.1 太阳	31
2.1.2 月亮和行星	32
2.2 人工光源	32
2.2.1 人工光源的发明与发展	32
2.2.2 白炽灯	33
2.2.3 卤钨灯	34
2.2.4 荧光灯	35
2.2.5 低压钠灯	36
2.2.6 高压放电灯	37
2.2.7 无电极放电灯	38
2.2.8 发光二极管	39
2.2.9 照明的经济核算	40
第3章 半导体发光材料晶体导论	42
3.1 晶体结构	42
3.1.1 空间点阵	42
3.1.2 晶面与晶向	43
3.1.3 闪锌矿结构、金刚石结构和纤锌矿结构	44
3.1.4 缺陷及其对发光的影响	46

3.2	能带结构	49
3.3	半导体晶体材料的电学性质	54
3.3.1	费米能级和载流子	54
3.3.2	载流子的漂移和迁移率	55
3.3.3	电阻率和载流子浓度	56
3.3.4	寿命	56
3.4	半导体发光材料的条件	57
3.4.1	带隙宽度合适	57
3.4.2	可获得电导率高的 p 型和 n 型晶体	57
3.4.3	可获得完整性好的优质晶体	57
3.4.4	发光复合概率大	57
第 4 章	半导体的激发与发光	59
4.1	pn 结及其特性	59
4.1.1	理想的 pn 结	59
4.1.2	实际的 pn 结	66
4.2	注入载流子的复合	68
4.2.1	复合的种类	68
4.2.2	辐射型复合	68
4.2.3	非辐射型复合	71
4.3	辐射与非辐射复合之间的竞争	72
4.4	异质结构和量子阱	72
4.4.1	异质结构	72
4.4.2	量子阱	73
第 5 章	半导体发光材料体系	77
5.1	砷化镓	78
5.2	磷化镓	79
5.3	磷砷化镓	80
5.3.1	$\text{GaAs}_{0.60}\text{P}_{0.40}/\text{GaAs}$	81
5.3.2	晶体中的杂质和缺陷对发光效率的影响	82
5.4	镓铝砷	82
5.5	铝镓铟磷	83
5.6	铟镓氮	84
第 6 章	半导体照明光源的发展和特征参量	87
6.1	发光二极管的发展	88
6.2	发光二极管材料生长方法	90
6.3	高亮度发光二极管芯片结构	91
6.3.1	单量子阱(SQW)结构	91
6.3.2	多量子阱(MQW)结构	92
6.3.3	分布布拉格反射(DBR)结构	92

6.3.4	透明衬底技术(Transparent Substrate, TS)	92
6.3.5	镜面衬底(Mirror Substrate, MS)	92
6.3.6	透明胶质黏结型	92
6.3.7	表面纹理结构	92
6.4	照明用 LED 的特征参数和要求	93
6.4.1	光通量	93
6.4.2	发光效率	94
6.4.3	显色指数	94
6.4.4	色温	95
6.4.5	寿命	95
6.4.6	稳定性	96
6.4.7	热阻	96
6.4.8	抗静电性能	96
第 7 章	磷砷化镓、磷化镓、镓铝砷材料生长	97
7.1	磷砷化镓氢化物气相外延生长(HVPE)	97
7.2	氢化物外延体系的热力学分析	99
7.3	液相外延原理	102
7.4	磷化镓的液相外延	106
7.4.1	磷化镓绿色发光材料外延生长	106
7.4.2	磷化镓红色发光材料外延生长	107
7.5	镓铝砷的液相外延	108
第 8 章	铝镓铟磷发光二极管	111
8.1	AlGaInP 金属有机物化学气相沉积通论	111
8.1.1	源材料	111
8.1.2	生长条件	113
8.1.3	器件生长	116
8.2	外延材料的规模生产问题	119
8.2.1	反应器问题:输送和排空处理	119
8.2.2	均匀性的重要性	119
8.2.3	源的质量问题	120
8.2.4	颜色控制问题	120
8.2.5	生产损耗问题	121
8.3	电流扩展	121
8.3.1	欧姆接触的改进	122
8.3.2	p 型衬底上生长	122
8.3.3	电流扩展窗层	122
8.3.4	氧化铟锡(ITO)	123
8.4	电流阻挡结构	123
8.5	光的取出	124

8.5.1	上窗设计	124
8.5.2	衬底吸收	126
8.5.3	分布布拉格反射 LED	127
8.5.4	GaP 晶片黏结透明衬底 LED	128
8.5.5	胶质黏着(蓝宝石晶片黏结)	129
8.5.6	纹理表面结构	129
8.6	芯片制造技术	131
8.7	器件特性	131
第9章	铟镓氮发光二极管	133
9.1	GaN 生长	133
9.1.1	未掺杂 GaN	134
9.1.2	n 型 GaN	135
9.1.3	p 型 GaN	136
9.1.4	GaN pn 结 LED	136
9.2	InGaN 生长	136
9.2.1	未掺 InGaN	136
9.2.2	掺杂 InGaN	137
9.3	InGaN LED	138
9.3.1	InGaN/GaN 双异质结 LED	138
9.3.2	InGaN/AlGaN 双异质结 LED	139
9.3.3	InGaN 单量子阱(SQW)结构 LED	139
9.3.4	高亮度绿色和蓝色 LED	141
9.3.5	InGaN 多量子阱(MQW)结构 LED	142
9.3.6	紫外 LED	142
9.3.7	AlGaN 深紫外 LED	143
9.3.8	硅衬底 GaN 蓝光 LED	143
9.4	提高质量和降低成本的几个重要技术问题	144
9.4.1	衬底	144
9.4.2	缓冲层	146
9.4.3	激光剥离(LLO)	147
9.4.4	氧化铟锡(ITO)	147
9.4.5	表面纹理结构	148
9.4.6	图形衬底技术(PSS)	148
9.4.7	微矩阵发光二极管(MALED)	149
9.4.8	光子晶体(Photonic Crystal, PC) LED	150
9.4.9	金属垂直光子 LED(MVP LED)	151
第10章	LED 芯片制造技术	152
10.1	光刻技术	152
10.2	氮化硅生长	153

10.3	扩散	154
10.4	欧姆接触电极	156
10.5	ITO 透明电极	158
10.6	表面粗化	160
10.7	光子晶体	160
10.8	激光剥离(Laser Lift-off, LLO)	161
10.9	倒装芯片技术	162
10.10	垂直结构芯片技术	163
10.11	芯片的切割	163
10.12	LED 芯片结构的发展	164
第 11 章 白光发光二极管		167
11.1	新世纪光源的研制目标	167
11.2	人造白光的最佳化	167
11.2.1	发光效率和显色性的折中	167
11.2.2	二基色体系	169
11.2.3	多基色体系	170
11.3	荧光粉转换白光 LED	171
11.3.1	二基色荧光粉转换白光 LED	171
11.3.2	多基色荧光粉转换白光 LED	173
11.3.3	紫外 LED 激发多基色荧光粉	173
11.4	多芯片白光 LED	174
11.4.1	二基色多芯片白光 LED	174
11.4.2	多基色多芯片白光 LED	176
第 12 章 LED 封装技术		178
12.1	LED 器件的设计	178
12.1.1	设计原则	178
12.1.2	电学设计	178
12.1.3	热学设计	179
12.1.4	光学设计	180
12.1.5	视觉因素	182
12.2	LED 封装技术	184
12.2.1	小功率 LED 封装	184
12.2.2	SMD LED 的封装	187
12.2.3	芯片级封装(CSP)	188
12.2.4	大电流 LED 的封装	189
12.2.5	功率 LED 的封装	189
12.2.6	功率 LED 组件	195
12.2.7	铟镓氮类 LED 的防静电措施	196

第 13 章 发光二极管的测试	199
13.1 发光器件的效率	199
13.1.1 发光效率	199
13.1.2 功率效率	199
13.1.3 量子效率	199
13.2 电学参数	200
13.2.1 伏安特性	200
13.2.2 总电容	201
13.3 光电特性参数——光电响应特性	202
13.4 光度学参数	202
13.4.1 法向光强 I_0 的测定	202
13.4.2 发光强度角分布(半强度角和偏差角)	203
13.4.3 总光通量的测量	204
13.4.4 量值传递	206
13.5 色度学参数	207
13.5.1 光谱分布曲线	207
13.5.2 光电积分法测量色度坐标	208
13.6 热学参数(结温、热阻)	208
13.7 静电耐受性	210
第 14 章 发光二极管的可靠性	211
14.1 LED 可靠性概念	211
14.1.1 可靠性的含义	211
14.1.2 可靠度的定义	212
14.1.3 LED 可靠性的相关概念	212
14.2 LED 的失效分析	215
14.2.1 芯片的退化	217
14.2.2 环氧系塑料的寿命分析	220
14.2.3 管芯的寿命分析	222
14.2.4 荧光粉的退化	223
14.3 可靠性试验	224
14.3.1 小功率 LED 环境试验	225
14.3.2 功率 LED 环境试验	226
14.4 寿命试验	226
14.4.1 磷化镓发光器件的寿命试验	226
14.4.2 功率 LED(白光)长期工作寿命试验	227
14.4.3 加速寿命试验	227
14.5 可靠性筛选	230
14.5.1 功率老化	230
14.5.2 高温老化	230

14.5.3	湿度试验	230
14.5.4	高低温循环	230
14.5.5	其他项目的选用	230
14.6	例行试验和鉴定验收试验	231
14.6.1	例行试验	231
14.6.2	鉴定验收试验	231
第15章	有机发光二极管	232
15.1	有机发光二极管材料	232
15.1.1	小分子有机物	232
15.1.2	高分子聚合物	233
15.1.3	镧系金属有机化合物	233
15.2	有机发光二极管的结构和原理	233
15.3	OLED 实现白光的途径	233
15.3.1	波长转换	233
15.3.2	颜色混合	234
15.4	有机发光二极管的驱动	238
15.5	有机发光二极管研发现状	240
第16章	半导体照明驱动和控制	241
16.1	LED 驱动技术	241
16.1.1	LED 的电学性能特点	241
16.1.2	电源驱动方案	241
16.1.3	驱动电路基本方案	242
16.1.4	LED 驱动器的特性	246
16.1.5	LED 与驱动器的匹配	247
16.2	LED 驱动器	250
16.2.1	电容降压式 LED 驱动器	250
16.2.2	电感式 LED 驱动器	251
16.2.3	电荷泵式 LED 驱动器	251
16.2.4	LED 恒流驱动器	253
16.3	LED 集成驱动电路	253
16.3.1	电荷泵驱动 LED 的典型电路	253
16.3.2	开关式 DC/DC 变换器驱动 LED 的典型电路	262
16.3.3	限流开关 TPS2014/TPS2015	269
16.3.4	六路串联白光 LED 驱动电路 MAX8790	271
16.3.5	集成肖特基二极管的恒流白光 LED 驱动器 LT3591	273
16.3.6	低功耗高亮度 LED 驱动器 LM3404	274
16.3.7	具有诊断功能的 16 通道 LED 驱动器 AS1110	276
16.3.8	高压线性恒流 LED 驱动电路	277
16.4	控制技术	278

16.4.1	调光	278
16.4.2	调色	279
16.4.3	调色温	280
16.4.4	智能照明	280
第 17 章 半导体照明应用		281
17.1	半导体照明应用产品开发原则	281
17.1.1	要从 LED 的优点出发开发应用产品	281
17.1.2	应用产品市场启动的判据——照明成本	282
17.1.3	应用产品的技术关键是散热	282
17.1.4	遵循功率由低到高、技术由易到难的原则	283
17.1.5	造型设计要创新	283
17.1.6	照明灯具通则	283
17.2	LED 显示屏	291
17.2.1	总体发展规模	291
17.2.2	产品技术完善	291
17.2.3	新品继续拓展	292
17.3	交通信号灯	292
17.3.1	道路交通信号灯	293
17.3.2	铁路信号灯	295
17.3.3	机场信号灯	298
17.3.4	航标灯	298
17.3.5	路障灯	299
17.3.6	航空障碍灯	299
17.4	景观照明	299
17.4.1	城市景观照明的功能作用	299
17.4.2	光源选择以 LED 为佳	301
17.4.3	LED 景观灯具	302
17.4.4	LED 景观照明典型工程	308
17.4.5	景观照明走向规范化	311
17.5	手机应用	311
17.6	汽车用灯	312
17.7	LCD 显示背光源	313
17.7.1	小尺寸面板背光源的技术和市场状况	314
17.7.2	中小尺寸面板背光源的技术和市场状况	314
17.7.3	中大尺寸面板背光源的技术和市场状况	314
17.7.4	大尺寸面板背光源的技术和市场状况	315
17.8	通用照明	316
17.8.1	便携式照明	316
17.8.2	室内照明	317

17.8.3 室外照明	336
17.9 光源效率和照明系统整体效率	354
第 18 章 半导体照明的光品质	355
18.1 色纯度	355
18.2 显色性	355
18.2.1 显色指数	355
18.2.2 光色质量值系统	356
18.2.3 IES TM30 - 15 光源显色性评价方法	356
18.2.4 环境对 R_a 值的要求	357
18.2.5 不同 LED 白光的显色指数	358
18.3 舒适度	359
18.4 LED 色温	360
18.5 光色均匀度——色容差	360
18.6 智能化 LED 生物节律照明	361
第 19 章 半导体照明技术、市场现状和展望	362
19.1 材料	362
19.1.1 衬底	362
19.1.2 外延	363
19.1.3 芯片技术	364
19.2 制造和测试设备	365
19.3 LED 器件和组件	366
19.4 照明灯具系统	368
19.5 智能控制 LED 照明工程系统	370
19.6 中国半导体照明产业现状	371
19.7 中国半导体照明产业发展趋势	371
19.8 全球半导体照明市场展望	372
19.9 LED 的非视觉应用进展	372
19.9.1 植物生长	373
19.9.2 蓝光高亮度 LED 集鱼灯	373
19.9.3 医疗	373
19.9.4 LED 可见光通信	374
参考文献	375

第 1 章

光 视觉 颜色

1.1 光

1.1.1 光的本质

什么是光？光的本质是什么？这是一个难以用简单语句表述的问题。光的传播、干涉、衍射和偏振现象可以用波动学说来解释。早在 1864 年，麦克斯韦就提出了光是电磁波的理论。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。例如，作为光电管机理的光电效应，当光照射到金属板上时，金属中的电子吸收光的能量而逸出金属板，一个电子从光吸收的能量是一定的，这能量值为 $h\nu$ ，普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J/s}$ ， ν 称为光的振动频率，单位是 Hz。电子从光吸收的能量 $h\nu$ 不是分成许多次，如每次为 $0.1h\nu$ 或 $0.01h\nu$ 吸收的，电子只是每次吸收 $1h\nu$ 的能量。电子吸收的能量大于此值，则逸出金属，小于此值则不逸出。按照通常道理理解，在以极弱的光长时间照射金属时，由于金属板中的电子长时间地一点一点吸收能量，金属板中的电子迟早会逸出金属。然而，事实并非如此，即 $h\nu$ 只和照射光的频率有关，当此频率达到电子能逸出的频率时，不管光如何弱，电子都会逸出。光的强弱与每秒内逸出的电子数有关，而与能否逸出无关。就是说，逸出电子的动能与光的强度无关，而简单地依赖于频率，即随频率线性增加。为了解释这个现象，必须认为光波中的能量，即一份一份的 $h\nu$ 附于一个一个的粒子中，这种粒子就是光子，光线就是流动的光子。这就是光的波粒二重性。

光的波动性，是指光是一种电磁波。电磁波频谱如图 1-1 所示。从中可以看出，可见光只占极小的一部分，和其他电磁波一样，可见光也具有波长、频率、发射、吸收、传播速度等特性。电磁波能量的传播称为辐射，辐射在通过物质时一般不改变频率，速度则随物质而改变。在真空中，光速是一常数 $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，光的速度、频率与波长之间的关系为

$$c = \lambda\nu \quad (1-1)$$

式中， λ 为波长。

电磁波包括电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线、宇宙射线等。通常所谓的光就是指人眼所能感觉到的辐射，称可见光，波长范围为 $380 \sim 780 \text{ nm}$ 。由单一波长组成的光称为单色光。实际上，严格意义上的单色光几乎是不存在的，所有光源所产生的光至少要占据很窄的一段波带。激光可以说是最接近于理想单色光的光源。

到达地球表面的太阳光的波长范围为 $290 \sim 1700 \text{ nm}$ ，比可见光范围宽得多。波长短于 290 nm 的太阳辐射光被大气层中较高部位的臭氧所吸收，而波长大于 1700 nm 的部分则被大

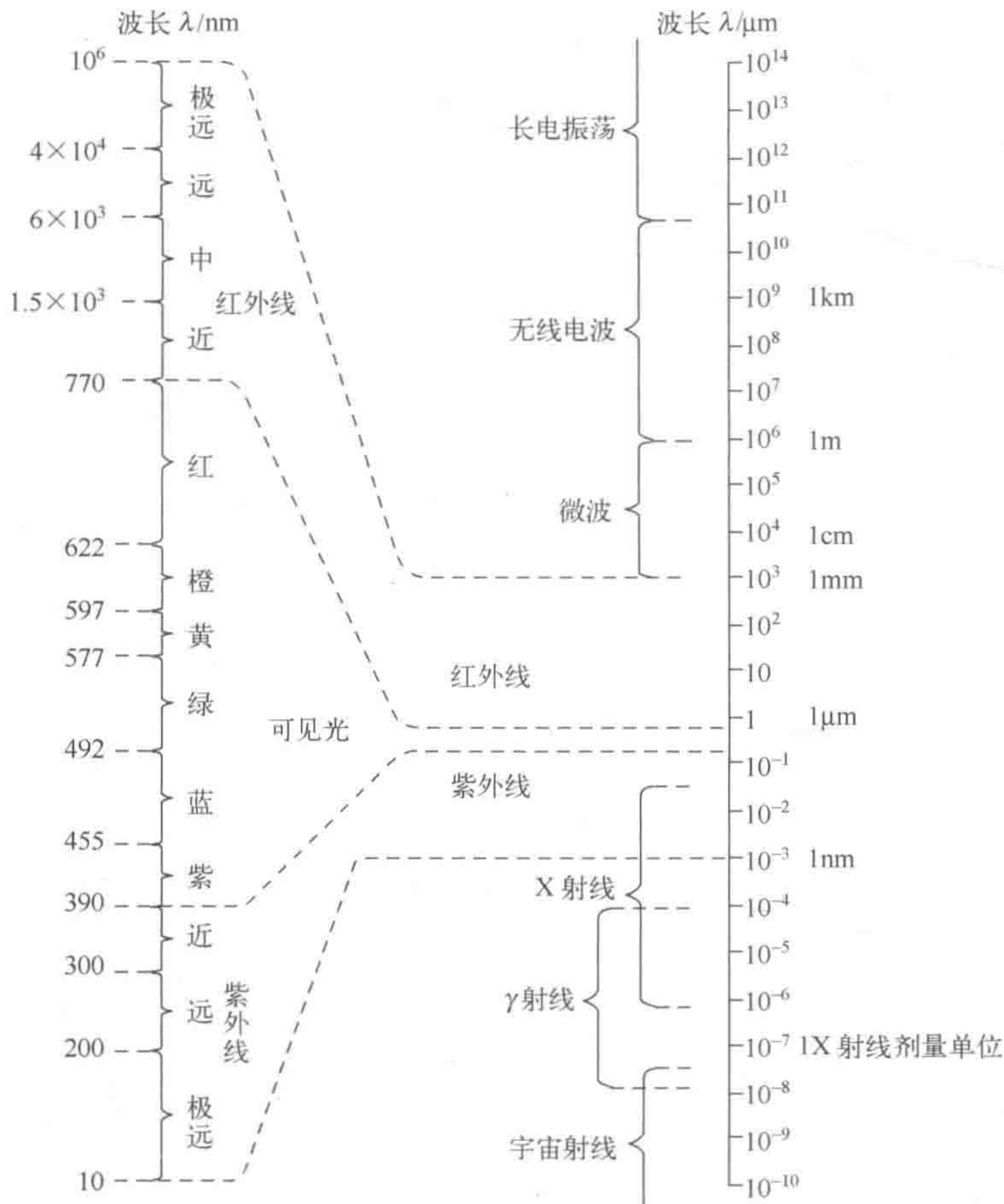


图 1-1 电磁波频谱

气层中较低部位的水气和二氧化碳强烈吸收。波长超出可见光谱的紫色和红色两端的电磁辐射,分别称为紫外辐射和红外辐射。紫外延伸至 1nm,红外延伸到 1mm。虽然人眼不能感觉紫外和红外辐射的存在,但从生理上是能感觉到的,如果辐射强度足够的话,人们会感到皮肤发热,所以所有辐射一旦被吸收都能产生热,并不是像通常所认为的只有红外辐射才伴随有特殊的发热效应。此外,波长小于 320nm 的紫外辐射对生物组织有损害,照射皮肤过久,往往会使皮肤发红和起疱。

光的微粒性就是指光束是微粒流,发光体不断发射出微粒,微粒的运动速度就是光速,这些粒子就是光子。不同波长的光,具有不同的能量,即由不同能量的光子组成。光子具有的能量 E 正比于光的频率:

$$E = h\nu \quad (1-2)$$

光子所具有的能量 $h\nu$ 是频率为 ν 的光所具有的能量最小单位,不能再分割了,故光子又称光量子。在光和其他物质相互作用时,能量的交换是以 $h\nu$ 的形式一份一份地进行的,也就是说,能量是不连续的。

1.1.2 光的产生和传播

1.1.2.1 光的产生

通常,光按两种方式产生,即温度辐射和发光。

温度辐射又称热辐射,就是指物质在高温下辐射出热能。蜡烛、白炽灯的发热就是人所共知的发热现象。在热辐射进程中,发出辐射的物体内部能量并不改变,只依靠加热来维持它的温度,使辐射得以持续地进行下去。低温时辐射红外光,500℃左右即开始辐射暗红色的可见光,温度越高,短波长的辐射便更丰富,1500℃时即发出白炽光,其中相当多的是紫外光。对某一温度下,作为最大温度辐射的物体,称为黑体,这种辐射即是黑体辐射。黑色的物体对光和热有良好的吸收作用,辐射是吸收的逆进程。因此吸收好的黑体其辐射也最大。通常的标准灯便是热辐射光源,这种光源有两个主要参数:一个是描述发光强弱的,称光强;另一个是描述光源的辐射能量随波长变化的光谱分布的,称色温。当某一白炽灯光源的光谱分布和温度为 T 的黑体的辐射的光谱分布相同时, T 即为该光源的色温。黑体辐射的能量分布曲线 $E(\lambda)$ 可由普朗克公式描述为

$$E(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (\text{W/m}^3) \quad (1-3)$$

式中, λ 为波长(m); h 为普朗克常数(J/s); c 为真空中光速(m/s); k 为玻耳兹曼常数(J/K); T 为绝对温度(K)。

当知道光源的色温,即可由式(1-3)求得其光谱分布。不同温度黑体辐射的能量分布如图1-2所示。

发光是发光物体依靠除温度以外的原因产生可见光的现象的总称。发光就是其他任何种类能量变换成光能的过程,通常通过激发过程来完成,所以又称激发发光。由于物质的种类和激发的种类不同,它发出光的波长范围也不同。按激发的方式不同分如下几类。

(1) 生物发光:萤火虫、发光细菌等的生物发光。

(2) 化学发光:由化学反应直接引起的发光,物质的燃烧属于化学反应,由这种反应引起的发光是热辐射。黄磷因氧化而自燃发光就是这种例子。

(3) 光致发光:由光、紫外线、X射线等激发而引起的发光。由汞蒸气产生的紫外线激发荧光粉,能高效率地转变为可见光,这就是已广泛使用的荧光灯。X射线和 γ 射线激发也能产生可见光。

(4) 阴极射线发光:由电子束激发荧光物质发光,其应用例子是电视机的显像管,又称阴极射线管。

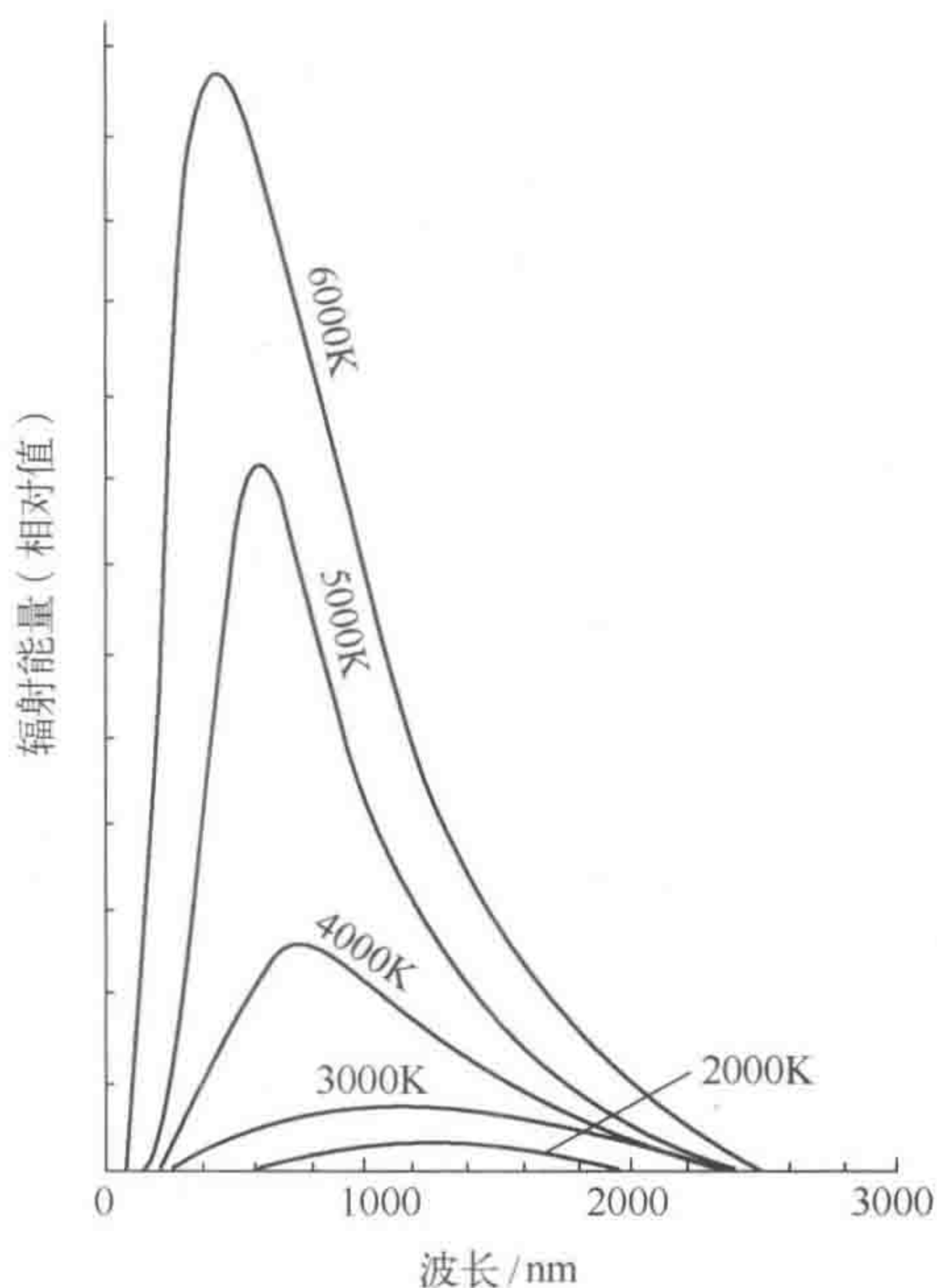


图1-2 不同温度黑体辐射的能量分布