

# LED 结构原理 与应用技术

李春茂 编著



# LED 结构原理与应用技术

李春茂 编著



机械工业出版社

本书结合国内外 LED 技术的发展和应用情况,以 LED 的封装技术和驱动技术为核心,全面系统地阐述了 LED 的最新应用技术。全书内容共分 11 章,分别详细介绍了光与照明、静电危害与防护、LED 的结构和原理、LED 的封装技术、白光 LED 的制作、LED 的技术指标、LED 的驱动技术以及 LED 在各领域的应用等。书中收集整理了 200 多幅典型驱动电路图,便于技术人员在实际工程设计中参考,读者可根据实际需要在此基础上进行改进,设计出符合要求的驱动电路。本书题材新颖、内容翔实、深入浅出、通俗易懂,具有实际参考价值。

本书适合从事 LED 产品开发、设计和应用等相关工程技术人员参考,也可供高等院校相关专业师生作为教学参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

LED 结构原理与应用技术/李春茂编著. —北京:机械工业出版社, 2010.6

ISBN 978-7-111-30812-6

I. ①L… II. ①李… III. ①发光二极管 IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 097440 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:刘星宁 责任编辑:刘星宁 责任校对:樊钟英

封面设计:赵颖喆 责任印制:李妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 19.25 印张 · 371 千字

0001 - 3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-30812-6

定价: 47.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 是一种能够将电能转化为可见光的固态半导体器件, 它可以直接把电能转化为光能。LED 的内在特征决定了它是传统光源最理想的替代者, 它具有如下特点: 体积小、重量轻、耗电量低 (一般 LED 的工作电压是 2 ~ 3.6V, 工作电流是 0.02 ~ 0.03A, 消耗的电能不超过 0.1W)、使用寿命长 (在恰当的电流和电压下, 其使用寿命可达  $(6 \sim 10) \times 10^4$ h, 比传统光源寿命长 10 倍以上)、高亮度、低热量、环保 (由无毒材料制作, 不像荧光灯含汞会造成污染, 光谱中没有紫外线和红外线, 既没有热量, 也没有辐射, 眩光小, 废弃物可回收, 冷光源, 可以安全触摸, 属于典型的绿色照明光源)、坚固耐用 (被环氧树脂完全封装, 比灯泡和荧光灯管坚固)、高效节能 (恒流驱动, 超低功耗, 单粒功耗为 0.03 ~ 0.06W, 电光功率转换接近 100%, 相同照明效果比传统光源节能 80% 以上)、多变幻 (LED 光源可利用红、绿、蓝三基色原理, 在计算机技术控制下使三种颜色具有 256 级灰度并任意混合, 即可产生  $256 \times 256 \times 256 = 16777216$  种颜色, 形成不同光色的组合变化, 实现丰富多彩的动态变化效果及形成各种图像)、高新尖 (与传统光源单调的发光效果相比, LED 光源是低压微电子产品, 融合了计算机技术、网络通信技术、图像处理技术、嵌入式控制技术等, 所以亦是数字信息化产品, 是半导体光电器件“高新尖”技术, 具有在线编程、无限升级、灵活多变的特点) 等。

近年来, 伴随科学技术 (特别是电子信息科学技术) 以及城镇建设的快速发展, 人们从高效、节能、环保的需要考虑, 对先进光源的需求与日俱增, LED 的研发和生产成为当今世界竞相发展的阳光产业, 它越来越显示出巨大的发展潜力。由于 LED 具有上述优点, 它不仅可用于大型广告显示屏、交通信号指示灯、背光源、城市夜景照明、舞台艺术照明、汽车照明配置等领域, 而且正在向工业生产照明和日常生活照明迅速发展, 正在引领照明领域的第三次革命浪潮。我们完全有理由相信, 在未来 3 ~ 5 年内, LED 将基本取代现有的可见光照明设备。

本书基于国内外 LED 技术的发展和研究现状, 以 LED 的封装技术和驱动技术为核心, 全面系统地阐述了 LED 的基本原理及其典型应用技术。全书内容共分 11 章, 分别详细介绍了光与照明、静电危害与防护、LED 的结构和原理、LED 的封装技术、白光 LED 的制作、LED 的技术指标、LED 的驱动技术以及 LED 在各领域的应用等。其中, 第 1、2 章由王小璠执笔, 第 3 ~ 10 章由李春茂执笔, 第 11 章由欧帮上、林振、周大瑞、王鹏共同执笔。书中收集整理了 200

多幅典型驱动电路图，以方便读者在实际设计中参考。读者可根据实际需要在此基础上进行改进，设计出符合要求的驱动电路。本书题材新颖、内容翔实、深入浅出、通俗易懂，具有实际参考价值，适合从事 LED 产品开发、设计和应用等相关工程技术人员参考，也可供高等院校相关专业师生作为教学参考书。

在本书的编写过程中，得到了海内外同行和专业技术人员特别是机械工业出版社的大力支持，在文字整理和绘图过程中，李蓉、周丹、欧帮上、邱亚君、林振、王康、陈康才、黎敏等给予积极配合，同时参考了国内外大量参考文献，在此对支持本书出版的人们和参考文献作者表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 光的物理本质及其描述</b> .....	1
1.1 光的经典本质 .....	1
1.1.1 电磁波的传播速度和折射率 .....	1
1.1.2 发光强度 .....	1
1.2 光的量子本质 .....	2
1.2.1 光电效应 .....	3
1.2.2 爱因斯坦的光子假设及其光电方程 .....	4
1.2.3 对光电效应的量子解释 .....	4
1.2.4 原子发光的机理 .....	5
1.3 单色平面波和球面波 .....	7
1.4 单色波的干涉和波的相干性 .....	9
1.4.1 干涉现象是波动的特性 .....	9
1.4.2 波的相干性 .....	10
1.5 光的衍射和傅里叶光学 .....	11
1.5.1 光的衍射 .....	11
1.5.2 傅里叶光学 .....	12
1.6 光波在介质界面上的反射和折射 .....	14
1.6.1 反射定律和折射定律 .....	14
1.6.2 反射和全反射 .....	16
1.7 光的吸收和散射 .....	17
1.7.1 光的吸收 .....	17
1.7.2 光的散射 .....	19
1.8 <sup>*</sup> 辐射度量学和光度学 .....	20
1.8.1 辐射度量 .....	21
1.8.2 光度量 .....	23
1.9 光调制器 .....	24
<b>第 2 章 静电危害及其防护</b> .....	26
2.1 静电起电 .....	26
2.1.1 金属之间的接触起电 .....	26
2.1.2 金属与绝缘材料之间的接触起电 .....	27
2.1.3 绝缘材料之间的接触起电 .....	27
2.2 静电的消散 .....	27

2.2.1	物体对静电的泄漏性能 .....	28
2.2.2	介质内部电荷的衰减规律 .....	29
2.2.3	绝缘导体上电荷的消散 .....	30
2.3	静电放电及其危害 .....	31
2.3.1	静电对 LED 的损伤 .....	31
2.3.2	静电放电的危害类型 .....	32
2.4	电子工业中的静电问题 .....	33
2.4.1	电子元器件静电损伤的失效类型 .....	34
2.4.2	静电危害造成的损失 .....	34
2.4.3	电子产品静电危害的特点 .....	35
2.5	LED 的静电防护 .....	35
<b>第 3 章 半导体二极管与 LED .....</b>		<b>38</b>
3.1	半导体 .....	38
3.1.1	半导体概述 .....	38
3.1.2	本征半导体 .....	39
3.1.3	杂质半导体 .....	39
3.1.4	PN 结及其特点 .....	40
3.2	半导体二极管及其应用 .....	41
3.2.1	半导体二极管 .....	41
3.2.2	光敏二极管 .....	42
3.2.3	半导体二极管的应用 .....	42
3.2.4	LED .....	43
3.3	LED 的基本结构 .....	43
3.4	LED 的发光原理 .....	44
3.5	LED 的光学特点 .....	46
3.5.1	LED 发光的颜色 .....	46
3.5.2	LED 的优点 .....	46
3.5.3	LED 在制作和使用中存在的问题 .....	47
3.6	高亮度 LED 芯片的产量 .....	48
3.7	两类高亮度 LED 的增长率 .....	49
3.8	LED 芯片的制作及分类 .....	50
3.8.1	LED 芯片的制作 .....	50
3.8.2	LED 的分类 .....	58
3.9	LED 的技术现状及发展趋势 .....	59
<b>第 4 章 LED 的封装技术 .....</b>		<b>62</b>
4.1	LED 封装概述 .....	62
4.1.1	LED 封装的特殊性 .....	63
4.1.2	LED 的封装材料 .....	64

4.1.3	LED 的封装结构类型 .....	65
4.1.4	LED 封装的作用 .....	66
4.2	LED 的封装工艺流程 .....	66
4.2.1	LED 的封装任务 .....	66
4.2.2	LED 的封装形式 .....	66
4.2.3	LED 的封装工艺流程 .....	67
4.3	引脚式封装技术 .....	69
4.3.1	多色点光源的封装结构 .....	70
4.3.2	LED 显示器的封装结构 .....	70
4.3.3	引脚式封装的工艺流程及选用设备 .....	71
4.3.4	管理机制和生产环境 .....	72
4.3.5	一次光学设计 .....	73
4.4	平面发光器件的封装技术 .....	75
4.4.1	数码管制作 .....	76
4.4.2	常见的数码管 .....	77
4.4.3	单色和双色点阵 .....	77
4.5	SMD 封装技术 .....	78
4.5.1	SMD 封装概述 .....	78
4.5.2	SMD 封装工艺 .....	79
4.5.3	SMD 表面黏着 LED 的生产流程 .....	79
4.5.4	测试 LED 与选择 PCB .....	80
4.6	食人鱼封装技术 .....	81
4.6.1	食人鱼的封装工艺 .....	81
4.6.2	食人鱼 LED 的应用 .....	82
4.7	大功率 LED 封装技术 .....	82
4.7.1	大功率 LED 的光学特征 .....	82
4.7.2	大功率 LED 芯片的制造技术 .....	83
4.7.3	大功率 LED 及其封装结构 .....	84
4.7.4	大功率 LED 封装的关键技术 .....	86
4.7.5	固态照明对大功率 LED 封装的要求 .....	87
4.7.6	大功率 LED 的应用 .....	88
4.7.7	功率型 LED 封装技术的现状 .....	89
4.7.8	功率型 LED 封装技术面临的挑战 .....	91
4.8	LED 封装技术的发展趋势 .....	92
<b>第 5 章</b>	<b>白光 LED 的制作 .....</b>	<b>94</b>
5.1	LED 的发展历史 .....	94
5.1.1	单色光 LED 的发展 .....	94
5.1.2	白光 LED 的发展 .....	95



5.2 白光 LED 的制作 .....	96
5.2.1 蓝光 LED + 不同色光荧光粉 .....	97
5.2.2 紫外光或紫光 LED + RGB 荧光粉 .....	97
5.2.3 利用三基色原理将 RGB 三种超高亮度 LED 混合生成白光 .....	98
5.3 白光 LED 的可靠性及其寿命 .....	99
5.3.1 寿命试验条件的确定 .....	100
5.3.2 试验过程与注意事项 .....	100
5.3.3 寿命试验台的设计 .....	102
5.4 荧光粉 .....	103
5.4.1 荧光粉概述 .....	103
5.4.2 采用荧光粉制作 LED 的优点 .....	103
<b>第 6 章 LED 的技术指标及测量</b> .....	<b>105</b>
6.1 LED 的极限参数 .....	105
6.2 LED 的电学指标 .....	106
6.2.1 常用电学参数 .....	106
6.2.2 电学特性 .....	107
6.3 LED 的光学指标 .....	109
6.3.1 常用光学参数 .....	109
6.3.2 光学特性 .....	110
6.4 LED 的热学指标 .....	115
6.4.1 电-光转换效率 .....	115
6.4.2 不同过程的能量损失 .....	117
<b>第 7 章 LED 的驱动技术</b> .....	<b>119</b>
7.1 LED 驱动器的要求 .....	119
7.2 常用的 LED 电源驱动方案 .....	120
7.2.1 LED 电源驱动器的分类 .....	120
7.2.2 LED 供电的特殊性 .....	121
7.3 LED 恒压驱动技术和恒流驱动技术 .....	121
7.3.1 LED 的恒流源驱动 .....	122
7.3.2 LED 的恒压源驱动 .....	122
7.3.3 LED 驱动电路的选择 .....	123
7.4 LED 驱动电路的结构 .....	124
7.4.1 直流驱动电路 .....	124
7.4.2 集成驱动电路 .....	124
7.4.3 交流驱动电路 .....	125
7.4.4 脉冲驱动电路 .....	125
7.5 白光 LED 驱动电路的分类 .....	126
7.5.1 白光 LED 的恒流驱动技术 .....	126

7.5.2	白光 LED 的恒压驱动技术 .....	130
7.5.3	太阳能 LED 照明系统 .....	131
7.6	LED 故障防护 .....	133
7.6.1	LED 过热保护技术 .....	134
7.6.2	LED 的散热设计 .....	134
7.6.3	散热设计对 LED 寿命的影响 .....	135
7.6.4	LED 散热性的提高 .....	135
7.7	LED 的光学设计 .....	140
7.7.1	LED 的一次光学设计 .....	140
7.7.2	LED 的二次光学设计 .....	142
7.7.3	LED 系统的光学设计 .....	144
7.8	LED 的 ESD 防护 .....	144
7.8.1	ESD 概述 .....	145
7.8.2	ESD 产生源 .....	145
7.8.3	ESD 对 LED 的危害 .....	146
7.8.4	ESD 防护 .....	146
7.9	LED 的合理选择 .....	147
<b>第 8 章</b>	<b>LED 在照明中的应用 .....</b>	<b>149</b>
8.1	LED 照明应用概述 .....	149
8.1.1	半导体照明现状 .....	150
8.1.2	全球 LED 市场规模 .....	151
8.2	LED 用于城市路灯照明 .....	153
8.2.1	普通道路照明灯具的现状和缺陷 .....	154
8.2.2	采用 LED 光源道路灯具的配光情况 .....	155
8.2.3	照明用 LED 的特点 .....	155
8.3	LED 用于隧道照明 .....	155
8.3.1	光学部分 .....	156
8.3.2	电气部分 .....	157
8.4	LED 用于高速公路照明 .....	159
8.5	LED 用于汽车照明 .....	160
8.5.1	车用 LED 的特点 .....	161
8.5.2	车用 LED 的供电电源 .....	161
8.5.3	车用 LED 实例 .....	161
8.6	LED 用于家庭照明 .....	162
8.6.1	室内 LED 照明控制技术 .....	162
8.6.2	LED 用于照明领域的效率分析 .....	163
8.6.3	LED 用于照明领域的优势 .....	165
8.6.4	使用 LED 的投资收益对比 .....	165

8.6.5 室内照明利用系数法计算平均光亮度 .....	166
8.7 LED用于特种照明 .....	167
8.8 LED用于城市景观照明 .....	168
<b>第9章 LED在电子装置中的应用 .....</b>	<b>172</b>
9.1 LED显示屏 .....	172
9.1.1 LED显示屏的发展阶段 .....	172
9.1.2 我国LED显示屏的发展现状 .....	173
9.1.3 LED显示屏的发展趋势 .....	175
9.1.4 LED显示屏的一般分类方法 .....	176
9.1.5 几种常见的LED显示屏 .....	177
9.1.6 LED显示屏的主要指标 .....	178
9.1.7 LED显示屏的选用 .....	178
9.2 LED交通信号灯 .....	180
9.2.1 LED交通信号灯的应用及前景 .....	180
9.2.2 LED交通信号灯的器件设计 .....	181
9.2.3 LED交通信号灯的技术标准 .....	182
9.2.4 LED用作铁路信号灯 .....	182
9.3 LED用作背光源 .....	183
9.3.1 背光源概述 .....	183
9.3.2 背光源的技术指标 .....	183
9.3.3 LED背光源常见问题的处理 .....	184
9.3.4 LED背光源将慢慢拓展至不同液晶领域 .....	184
9.3.5 LED背光源的未来发展方向 .....	186
9.4 LED用于城市亮化工程和夜景工程 .....	187
9.4.1 城市亮化工程和夜景工程的关键问题 .....	187
9.4.2 城市亮化工程和夜景工程中的各种照明 .....	187
9.5 LED用于玩具领域 .....	188
9.6 LED用于仪器仪表 .....	188
<b>第10章 LED在光纤通信中的应用 .....</b>	<b>190</b>
10.1 光纤通信概述 .....	190
10.1.1 光纤通信的概念 .....	190
10.1.2 光纤通信的优点 .....	191
10.2 光纤通信系统的基本单元 .....	193
10.2.1 光发射机 .....	193
10.2.2 光纤 .....	196
10.2.3 光接收机 .....	198
10.2.4 光放大器 .....	199
10.3 光纤通信的基本问题 .....	200

10.3.1	衰减	200
10.3.2	色散	202
10.3.3	非线性效应	204
10.4	光纤通信系统的主要性能指标	205
10.4.1	比特率和带宽	205
10.4.2	传输距离	206
10.4.3	通信容量	206
10.5	光纤的结构和分类	206
10.6	光纤的导光原理及特性	208
10.7	单模光纤的偏振和双折射	210
10.8	多模光纤技术	211
10.8.1	多模光纤的衰减	211
10.8.2	多模光纤的色散	211
10.8.3	多模光纤的带宽	212
10.9	光纤连接耦合技术	212
10.9.1	光纤的连接方法	212
10.9.2	光纤连接器	213
10.9.3	耦合器	214
10.10	光纤的光波调制技术	215
10.11	LED 的调制特性和技术参数	215
10.12	LED 和光纤的耦合	216
<b>第 11 章</b>	<b>LED 驱动电路</b>	<b>218</b>
11.1	非隔离功率变换电路	218
11.1.1	串联型变换电路	218
11.1.2	并联型变换电路	219
11.1.3	极性反转型变换电路	219
11.1.4	简单阻容降压 LED 驱动电路举例	219
11.2	隔离功率变换电路	221
11.2.1	单端正激式变换电路	222
11.2.2	单端反激式变换电路	224
11.2.3	推挽(变压器中心抽头)式变换电路	225
11.2.4	全桥式变换电路	226
11.2.5	半桥式变换电路	227
11.3	功率变换电路的选择	227
11.4	LED 驱动电路的结构	229
11.5	低压高效 LED 驱动电路	231
11.5.1	低压高效 LED 驱动概述	231
11.5.2	输出恒流源精度要求	232

11.5.3	低压LED驱动方法	232
11.6	LED恒压驱动电路	235
11.6.1	工频变压器线性稳压源	236
11.6.2	高频变压器开关稳压源	237
11.7	LED恒流驱动电路	238
11.8	大调光比例的LED驱动电路	239
11.8.1	LED调光范围	239
11.8.2	PWM调光方案	241
11.8.3	TRIAC调光器的工作原理	244
11.9	高亮度LED的高效电流驱动电路	246
11.10	白光LED升压恒流驱动电路	250
11.11	白光LED超低工作电压驱动电路	251
11.11.1	ULD的设计背景	251
11.11.2	ULD设计的必要性及基本电性能要求	252
11.11.3	ULD电性能设计的特殊要求	254
11.11.4	实际的电池应用特性实例	255
11.12	LED过温度保护电路	258
11.12.1	LED过温度保护电路概述	259
11.12.2	LED过温度保护电路的设计流程	259
11.13	1000W LED可调输出电压驱动电路	262
11.14	高亮度LED驱动电路	266
11.14.1	降压型驱动电路	266
11.14.2	升压型驱动电路	269
11.15	非隔离大功率LED恒流驱动电路	270
11.15.1	LinkSwitch-TN的结构及其特点	270
11.15.2	基于LinkSwitch-TN转换器IC的恒流LED驱动器	272
11.16	LED灯串驱动电路	275
11.17	单级高功率因数LED驱动电路	276
11.17.1	单级PFC变换器基本电路拓扑	276
11.17.2	基于Flyboost模块的单级PFC AC-DC变换器	278
11.17.3	基于iw2202的数字单级PFC电路	279
11.18	各种LED恒流电路及其精度的比较	280
11.19	新型LED高压驱动电路	286
11.20	可变电流LED驱动电路	289
	参考文献	293

# 第1章

# 光的物理本质及其描述

## 1.1 光的经典本质

19世纪70年代，麦克斯韦发展了电磁理论，从而导致电磁波的发现。电磁波在不同介质的分界面上发生反射和折射现象，在传播中出现干涉、衍射和偏振现象。而根据当时已有的知识，光波也具有相似的干涉、衍射和偏振等现象。那它们之间有什么联系呢？

按照麦克斯韦理论，电磁波在真空中的传播速度  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ ， $c$  只和真空介电常数  $\epsilon_0$  和真空磁导率  $\mu_0$  有关，是一个普适量。在实验误差范围以内，这个常量  $c$  与已测得的光速相等。于是麦克斯韦得出这样的结论：光是某一波段的电磁波， $c$  就是光在真空中的传播速度。

因此，从本质上讲，光是电磁波，它以波的形式传播。按照这种理论，光的传播就是电磁波的传播。

### 1.1.1 电磁波的传播速度和折射率

在介质中电磁波的速度  $v$  为真空中的  $1/\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$  倍，即

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \quad (1-1)$$

式中， $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数； $\mu_r$  为相对磁导率。

另外，光在透明介质里的传播速度  $v$  小于真空中的速度  $c$ 。 $c$  与  $v$  的比值是该透明介质的折射率，即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-2)$$

既然光是电磁波，将式 (1-1) 和式 (1-2) 相比较可得

$$n = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (1-3)$$

这个公式把光学和电磁学这两个不同领域中的物理量联系起来。在光频段有  $\mu_r = 1$ ，因此  $n \approx \sqrt{\epsilon_r}$ 。

### 1.1.2 发光强度

电磁波的电场强度  $E$ 、磁场强度  $H$  都和传播方向垂直。因此，电磁波是横

波。由维纳实验的理论分析可以证明，对人的眼睛或感光仪器起作用的是电场强度  $E$ ，所以我们所说的光波中的振动矢量通常指的是电场强度  $E$ 。

在电磁波中能被人眼所感受的光的波长在  $390 \sim 760\text{nm}$  的狭窄范围以内，对应的频率范围是  $7.5 \times 10^{14} \sim 4.1 \times 10^{14}\text{Hz}$ 。这个波段内的电磁波叫做可见光。在可见光的范围内，不同的频率引起不同的颜色感觉。大致说来，各单色光的频率或真空中的波长和颜色的对应关系如表 1-1 所示。

表 1-1 各单色光的频率、波长和颜色的对应关系

颜色	中心频率/Hz	中心波长/nm	波长范围/nm
红	$4.5 \times 10^{14}$	660	760 ~ 622
橙	$4.9 \times 10^{14}$	610	622 ~ 597
黄	$5.3 \times 10^{14}$	570	597 ~ 577
绿	$5.5 \times 10^{14}$	550	577 ~ 492
青	$6.5 \times 10^{14}$	460	492 ~ 450
蓝	$6.8 \times 10^{14}$	440	450 ~ 435
紫	$7.3 \times 10^{14}$	410	435 ~ 390

波动的传播总是伴随着能量的传递，这个过程一般用平均能流密度来描述。人眼的视网膜或物理仪器（光电管、感光板等）所感受或检测到的光的强弱都是由能流密度的大小来决定的。所谓能流密度，是指在单位时间内通过与波的传播方向垂直的单位面积的能量或表示为单位面积的功率。任何波动所传递的平均能流密度与振幅的二次方成正比。对于电磁波，平均能流密度正比于电场强度振幅  $A$  的二次方。所以，发光强度或光照度（即平均能流密度）为

$$\bar{I} \propto A^2$$

在波动光学中，主要是讨论光波所到之处的相对光照度。因而通常只需计算光波在各处振幅的二次方值，而不需要计算各处光照度的绝对值。在波动光学的术语中，常把振幅的二次方所表征的光照度称为发光强度，即

$$\bar{I} = A^2 \quad (1-4)$$

式中， $\bar{I}$  应理解为相对发光强度，其值与所处介质的折射率有关。

## 1.2 光的量子本质

在普朗克提出了能量子概念以后，许多物理学家都想从经典物理学中求得解释，但始终无法成功。为了尽量缩小与经典物理学之间的差距，普朗克把能量子的概念局限于振子辐射能量的过程，而认为辐射场本身仍然是连续的电磁波。直到 1905 年爱因斯坦在光电效应的研究中，才突破了普朗克的认识，看到了电磁

波能量普遍都以量子的形式存在。从光和微观粒子相互作用的角度来看，各种频率的电磁波都是能量为  $h\nu$  的光粒子（称为光子）体系。这就是说，光不仅有波的性质，而且有粒子的性质。

### 1.2.1 光电效应

在 1886~1887 年，赫兹在证实电磁波的存在和光的麦克斯韦电磁理论的实验过程中注意到：当两个电极之一受到紫外光照射时，两电极之间容易发生放电现象。然而，当时赫兹对这个现象并没有继续研究下去。直到发现电子后，人们才知道这是由于紫外光的照射使大量电子从金属表面逸出的缘故。这种电子在光的作用下从金属表面发射出来的现象称为光电效应，逸出来的电子称为光电子。

研究光电效应的实验装置如图 1-1 所示。光电管阴极 K 和阳极 A 被封闭在真空管内，在两极之间加一可变电压，用来加速或阻挡释放出来的电子。光通过石英小窗照到阴极 K 上，在光的作用下，电子从阴极 K 逸出，并受到电场加速而形成电流。这种电流称为光电流。实验结果发现，光和光电流之间有一定的依存关系。

首先在入射光的强度与频率不变的情况下， $I-U$  的实验曲线如图 1-2 所示。曲线表明，当加速电压  $U$  增加到一定值时，光电流达到饱和值  $I_m$ 。这是因为单位时间内从阴极 K 射出的光电子全部到达阳极 A。若单位时间内从阴极 K 上逸出的光电子数目为  $n$ ，则饱和电流  $I_m = ne$ 。式中， $e$  为电子电量， $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。

另一方面，当电压  $U$  减小到零并开始反向时，光电流并没有降为零，这就表明从阴极 K 逸出的光电子具有初动能。所以，尽管有电场阻碍它运动，仍有部分光电子到达阳极 A。但是，当反向电压等于  $-U_g$  时，就能阻止所有的光电子飞向阳极 A，使光电流降为零，这个电压叫做遏制电压，它具有最大初速度的电子也不能到达阳极 A。如果不考虑在测量遏制电压时回路中的接触电势差，那么我们就根据遏制电压  $-U_g$  来确定电子的最大速度  $v_m$  和最大动能，即

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_g \quad (1-5)$$

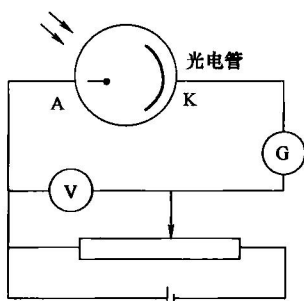


图 1-1 光电效应实验装置

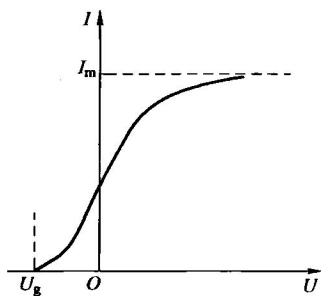


图 1-2  $I-U$  实验曲线



总结所有的实验结果，光电效应的规律可归纳为如下几点：

1) 饱和电流  $I_m$  的大小与入射光的强度成正比，即单位时间内逸出的光电子数目与入射光的强度成正比。

2) 光电子的最大初动能（或遏制电压）与入射光的强度无关，而只与入射光的频率有关，频率越高，光电子的能量就越大。

3) 对于频率低于  $\nu_0$  的入射光，无论光的强度有多大，照射时间有多长，都不能使光电子逸出。

4) 光的照射和光电子的逸出几乎是同时的，在测量的精度范围内（ $< 10^{-9}$  s）观察不出这两者存在滞后现象。

### 1.2.2 爱因斯坦的光子假设及其光电方程

爱因斯坦在光电效应的研究中发现，光在传播过程中具有波动的特性，而在光和物质相互作用的过程中，光能量是集中在一些叫做光量子（或称光子）的粒子上。这就是所谓的光的波粒二象性。从光子的观点来看，产生光电效应的光是光子流，单个光子的能量  $E$  与频率  $\nu$  成正比，即

$$E = h\nu$$

式中， $h$  为普朗克常量。

把光子的概念应用于光电效应时，爱因斯坦还认为一个光子的能量是传递给金属中的单个电子的。电子吸收一个光子后，把能量的一部分用来挣脱金属对它的束缚，余下的一部分就变成电子离开金属表面后的动能，按能量守恒定律应有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W \quad (1-6)$$

式 (1-6) 称为爱因斯坦光电效应方程。其中， $mv^2/2$  为光电子的动能； $W$  为光电子逸出金属表面所需的最小能量，称为逸出功。

### 1.2.3 对光电效应的量子解释

光子理论成功地解释了光电效应的规律。

首先，因为入射光的强度是由单位时间到达金属表面的光子数目决定的，而逸出的光电子（亦即吸收了光子能量的电子）数又与光子数目成正比，这些逸出的光电子全部到达阳极便形成了饱和电流。因此，饱和电流就与逸出的光电子数成正比，也就是与达到金属表面的光子数成正比，即与入射光的强度成正比。

由爱因斯坦光电效应方程  $h\nu = mv^2/2 + W$  可见，对于给定的金属来说（其逸出功  $W$  为常量），光子的频率  $\nu$  越高，光电子的能量  $mv^2/2$  就越大。

如果入射光的频率过低，以致  $h\nu < W$ ，那么电子根本就不可能脱离金属表面。即使入射光很强，也就是这种频率的光子数很多，仍不会产生光电效应。只