

光电子学

理论与实践

〔美〕 A.查佩尔 著

秦曾志 等译

国防工业出版社

73.77
393
1

光 电 子 学

理 论 与 实 践

〔美〕 A. 查佩尔 编
秦 曾 志 等译



国防工业出版社

8610458

内 容 简 介

光电子学是一门关于光波段电磁辐射的产生、利用、计量及其转变成电信号的重要学科。本书系统地论述了光电子学的基础知识。内容分三部分：第一部分介绍了光电子学的基础理论，包括光辐射物理、辐射定律、光辐射与物质的相互作用及光度学、辐射度学等；第二部分介绍了光电器件如光电二极管、光电晶体管、发光二极管、光电耦合器等的工作原理与应用；第三部分结合具体电路，讲述了光电器件参数的选择及电路的设计方法。

本书的特点是理论密切联系实际。可供从事光电技术、电子技术的科技人员及大专院校有关专业的师生阅读参考。

1030/34 of

Optoelectronics Theory and Practice

Alan Chappell

MCGRAW-HILL 1978

光 电 子 学

理 论 与 实 践

【美】A. 查佩尔 编

秦曾志 等译

责任编辑 耿新暖

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张19¹/₄ 439千字

1986年2月第一版 1986年2月第一次印刷 印数：0,001—2,460册

统一书号：15034·2918 定价：3.95元

译 者 序

本书系美国得克萨斯仪器公司编辑出版的电子学丛书 (Texas Instruments Electronics Series) 之一, 是目前光电子学方面理论与实践相结合的一部重要著作。该书原文是得克萨斯仪器公司德国分公司的 V. 哈特莱等人编写的。后由得克萨斯仪器公司的 A. 查佩尔用英文改编。我们是根据 1978 年英文版译出的。本书的特点是在理论上和实践上介绍了各种光电器件, 并提供了组成光电电子线路和使用光电器件所必需的理论知识。

全书分为三部分: 第一部分为原理部分, 阐述了光电子学的基本原理, 光度单位和辐射单位, 黑体和朗伯辐射体, 辐射、发光和光发射现象; 第二部分是技术部分, 着重介绍光电器件的基本性能和工作原理、计算及应用; 第三部分是线路部分, 给出了实验室中和实践中经过考验的各种光电电子线路。

书内介绍的光电器件的应用范围包括: 电力工程、数据处理、机械控制、热能工程、汽车工业、空间系统、录音录象、摄影技术、医疗卫生、远距离通信、环境保护、家用电器等。

本书对于我国从事光电技术方面的广大人员有一定的参考价值, 可供光电工程师、技术人员和大专院校有关专业的师生阅读。

参加全书翻译的有秦曾志、梁国忠、刘俊杰、刘芳元、刘子恒、张子荐、张彤、张舒仁、周兴涛九同志, 最后全书译稿由秦曾志、梁国忠审校。由于我们的水平有限, 文中错误和不妥之处在所难免, 敬请读者批评指正。

长春光学精密机械研究所的陈楚康同志曾审阅了本译稿, 河南建筑材料工业学校史永基同志曾将部分译稿供我们参考, 在此一并表示感谢。

一九八二年十二月

编 者 的 话

近年来由于电子学的发展, 产生了越来越多的各种不同用途的电路器件。特别是利用材料的电子结构与辐射的相互作用的所谓光电子器件, 得到了广泛的应用。这主要是由于改善了半导体的制造工艺过程而引起的, 从而使得光电器件经济地用于各种不同用途。

本书的目的是在理论上和实践上介绍这些光电器件。本书主要是为需要获得使用这些器件的能力与基础知识的工程师、技术人员和学生而写的。鉴于这个愿望, 本书特别注意提供充分的指示和建议, 并为使用者提供对光电电路改进和应用的必要的理论知识。

编 者

目 录

绪言	1
----------	---

第一章 光辐射物理学

§ 1.1 光辐射和光	3
1.1.1 基本定义	3
1.1.2 辐射的量子性质	3
1.1.3 波粒二重性	4
1.1.4 波长和传播速度	4
§ 1.2 辐射和发光现象	5
1.2.1 原子和能带模型	5
1.2.2 发光、荧光、磷光	7
1.2.3 半导体的发光现象, 注入发光	8
§ 1.3 光电效应	12
1.3.1 外光电效应	12
1.3.2 内光电效应	13
1.3.3 结光电效应	14

第二章 辐射物理学和光学的计算原理

§ 2.1 辐射通量与光通量, 辐射能与光能	16
§ 2.2 与辐射源有关的单位	17
2.2.1 辐射出射度与光出射度	17
2.2.2 辐射强度与光强度	18
2.2.3 辐射亮度与光亮度	19
2.2.4 光亮度单位	20
2.2.5 辐射效率与光效率	21
§ 2.3 与接收器有关的单位	22
2.3.1 辐照度与光照度	22
2.3.2 辐照量与曝光量	23
2.3.3 辐照度或光照度与反射辐射亮度或反射光亮度之间的关系	24
2.3.4 光谱辐射分布单位	24

第三章 辐射定律

§ 3.1 立体角	27
§ 3.2 朗伯辐射体	28
3.2.1 光度学的基本定律	28
3.2.2 朗伯余弦定律	29
§ 3.3 小表面辐射体和小表面接收器的辐射计算	30
3.3.1 平方反比定律	31

第四章 黑体辐射定律

§ 4.1 黑体与非黑体	32
4.1.1 黑体	32
4.1.2 非黑体	33
§ 4.2 辐射定律	33
4.2.1 普朗克辐射定律	33
4.2.2 斯忒藩-波尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律	34
4.2.3 维恩 (Wien) 位移定律	35
4.2.4 发射率	37
4.2.5 基尔霍夫定律	38
4.2.6 辐射等温线	38
4.2.7 辐射衰减定律	38

第五章 辐射的一般计算和光度计算

§ 5.1 作为光接收器的人眼	43
§ 5.2 光学灵敏度	43
§ 5.3 辐射的光度计量	45
5.3.1 换算系数 C 和 C' 的确定	46
5.3.2 光度辐射当量	48
5.3.3 人眼明视觉灵敏度的光度辐射当量	50
§ 5.4 不同辐射的光度辐射当量 K 的计算	51
5.4.1 在坎德拉定义所规定的温度下, 普朗克辐射体的光度辐射当量的计算	51
5.4.2 标准光源 A 的光度辐射当量 K 的计算	52
5.4.3 发光二极管 (L. E. D. S) 发光辐射的光度辐射当量的计算	53
§ 5.5 辐射度单位与光度单位的换算	56
5.5.1 普朗克辐射体的辐射度单位对光度单位的换算	56
5.5.2 发光二极管发光辐射的辐射度单位对光度单位的换算	57
§ 5.6 光化值	59
5.6.1 光电探测器和人眼对辐射光谱的光化值	59
5.6.2 人眼作为光电探测器时普朗克辐射和发光辐射的光化值	62

第六章 光辐射与物质之间的相互作用

§ 6.1 吸收率、透射率与反射率	64
§ 6.2 光谱透射率 $\tau(\lambda)$ 与光谱吸收率 $\alpha(\lambda)$	64
§ 6.3 散射	65
§ 6.4 辐射的反射	65
6.4.1 光谱反射率 $\rho(\lambda)$	66
§ 6.5 吸收、衰减和散射的基本定律	67
§ 6.6 吸收光谱和透射光谱	69
§ 6.7 折射	73

第七章 辐射源

§ 7.1 自然辐射源	77
7.1.1 太阳	77

7.1.2	月球	78
7.1.3	云彩	78
§ 7.2	人工温度辐射体	78
7.2.1	明火	78
7.2.2	白炽灯	79
§ 7.3	发光辐射体	80
7.3.1	热气体	80
7.3.2	气体放电	80
7.3.3	放电灯	82
7.3.4	放电管	82
7.3.5	氙灯	83
7.3.6	金属蒸汽灯	83
§ 7.4	混合光灯	84
§ 7.5	摄影用闪光放电灯	84
§ 7.6	发光二极管	85
7.6.1	掺硅 GaAs 二极管	85
7.6.2	GaP 二极管	86
7.6.3	掺铟 GaAs 二极管和 GaAsP 二极管	87
7.6.4	量子产额的考虑	87

第八章 光电探测器

§ 8.1	外光电效应的光电探测器	89
§ 8.2	内光电效应的光电探测器	89
8.2.1	光电导体即光敏电阻	89
§ 8.3	结型光电探测器	90

第九章 红外探测器和结型光电探测器的参数

§ 9.1	结型光电探测器的量子产额 Q	91
9.1.1	雪崩光电二极管的量子产额和光电流放大倍数	92
§ 9.2	结型光电探测器的光谱灵敏度	94
9.2.1	肖特基势垒 PIN 光电二极管	96
9.2.2	平面扩散硅光电二极管	96
9.2.3	用 CDI 法生产的光电二极管	97
9.2.4	温度对光电二极管光谱灵敏度的影响	98
9.2.5	光谱灵敏度漂移的可能性	98
§ 9.3	单色辐射源辐射的非放大结型光电探测器计量	99
§ 9.4	彩色辐射(混合辐射)的非放大结型光电探测器计量	100
§ 9.5	辐射的放大结型光电探测器计量	102
§ 9.6	结型光电探测器的面积相关灵敏度	106
§ 9.7	结型硅光电二极管对 CaAs 二极管红外发光辐射的光化值	107
§ 9.8	结型光电探测器的暗电流	112
9.8.1	雪崩光电二极管的暗电流	113
§ 9.9	红外探测器的灵敏度值	114

第十章 发射器和接收器的通用参数

§ 10.1	光电器件辐射特性和接收特性的评价	119
--------	------------------	-----

§ 10.2	光电器件的光学偏差	124
10.2.1	晶片对中心、透镜质量、透镜到晶片的距离、环氧树脂的折射率、 封帽的形状及管壳的影响	125
10.2.2	壳内反射和晶片几何形状的影响	126
10.2.3	偏差等级	128
§ 10.3	微型光电组合器件的耦合特性、传输比和反差电流比	130
10.3.1	耦合特性和传输比	130
10.3.2	反差比	135
§ 10.4	半功率点和半值点	137
§ 10.5	动态数据	139
§ 10.6	半导体光电器件的可靠性	144

第十一章 发光二极管的参数

§ 11.1	量子效率	153
§ 11.2	热计算	158
11.2.1	基本原理	158
11.2.2	发光二极管热阻 $R_{T\theta}$ 的测定	159
11.2.3	塑料封装发光二极管的功耗计算	160
11.2.4	具有大散热片的金属管壳发光二极管功耗的计算	161
11.2.5	无散热片的金属管壳发光二极管功耗的计算	161
11.2.6	有散热片的金属管壳发光二极管功耗的计算	162
11.2.7	最大容许正向电流 $I_{F\max}$ 的计算	162
§ 11.3	辐射功率	164
§ 11.4	辐射效率 η_e	167
§ 11.5	光谱辐射效率	167
§ 11.6	电气参数	169
§ 11.7	脉冲工作	171

第十二章 辐射测量

§ 12.1	一般考虑	172
§ 12.2	标准光 A 的色温测量	172
§ 12.3	用热光电探测器测量辐射功率	174
§ 12.4	用热电堆测量标准光 A 的辐射功率	175
§ 12.5	用硅光电探测器测量标准光 A 辐射的辐照度	176
§ 12.6	用硅光电探测器测量发光二极管的辐射	177
12.6.1	一般的测量问题	177
12.6.2	用单色仪测量相对光谱灵敏度	179
12.6.3	用硅光电探测器测量发光二极管辐射的辐照度	180
§ 12.7	发光二极管总辐射功率的测量	181

第十三章 光电耦合器

§ 13.1	直接耦合器	183
§ 13.2	反射式光电耦合器	184
§ 13.3	用非平稳源发射的光电耦合器	185
§ 13.4	耦合器简例	185

§ 13.5	带透镜的光电耦合器	187
§ 13.6	用非调制光的光电耦合器	191
§ 13.7	用调制光的光电耦合器	192

第十四章 直流发光二极管的工作原理

§ 14.1	用串联电阻工作	194
§ 14.2	用恒流源工作	194
§ 14.3	用逻辑电路驱动	197

第十五章 光电探测器电路

§ 15.1	工作原理	200
§ 15.2	双极结型光电探测器的探测电路	200
15.2.1	用光电晶体管直接控制继电器	201
15.2.2	光电达林顿电路	201
15.2.3	用光电晶体管控制半导体闸流管和两端双向可控元件	202
15.2.4	用光电晶体管、光电二极管和光电电池驱动晶体管放大器和运算放大器	204
15.2.5	用光电晶体管控制多谐振荡器	207
§ 15.3	用三极光电晶体管的探测器电路	209
15.3.1	三极光电晶体管的工作模式	209
15.3.2	用三极光电晶体管驱动放大器	212
15.3.3	光电触发器和光电多谐振荡器电路	213
§ 15.4	用白炽灯和双极光电晶体管的简单耦合器	216
§ 15.5	用光电晶体管的逻辑电路	218
§ 15.6	驱动 TTL 集成电路的光电探测器电路	219

第十六章 发光二极管调制发射器

§ 16.1	最简单的发光二极管调制电路	222
§ 16.2	带有发光二极管的正弦波调制发射器	223
16.2.1	有偏置电压源的调制过程	223
16.2.2	有恒流源的调制过程	227
§ 16.3	带有发光二极管的脉冲调制脉冲发射器	228

第十七章 受调辐射的光电探测器电路

§ 17.1	光电晶体管电路	232
§ 17.2	用 TL81 作为光电二极管和作为光电电池的电路	232

第十八章 硅光电晶体管光电流灵敏度的实用测量

§ 18.1	测试设备的原理电路	238
§ 18.2	测量光电晶体管相对灵敏度用测试装备	239

第十九章 电子闪光装置中用硅光电晶体管的光测量

§ 19.1	电子闪光器的原理	240
§ 19.2	曝光控制方式	241

§ 19.3	闪光装置电路	242
§ 19.4	自动闪光曝光控制用的硅光电晶体管	242

第二十章 发光二极管电路

§ 20.1	简单指示器	244
§ 20.2	二极管测试器	245
§ 20.3	逻辑电路测试器	245
§ 20.4	极性和电压测试器	246
§ 20.5	大型七段显示器件	247
§ 20.6	数字量的模拟显示	247
§ 20.7	用 LED 显示的模拟测量装置	250

第二十一章 数字和字母显示器件

§ 21.1	七段显示器件	252
§ 21.2	显示器件的多路运行	254
§ 21.3	用集成逻辑电路的数字显示器件	256
§ 21.4	单片显示器件	259
§ 21.5	5 × 7 点阵显示器件	262

第二十二章 方向相关光电器件

§ 22.1	工作原理	265
§ 22.2	方向相关计数器	266
§ 22.3	方向相关光电耦合器	266
§ 22.4	数字旋钮	267

第二十三章 光电测距机

§ 23.1	相位测量的测量原理	269
§ 23.2	测距机的实用电路	271

第二十四章 用光电耦合器传输数据

§ 24.1	对传输线的干扰	275
§ 24.2	光电耦合器的结构和特性	275
24.2.1	电流转移系数	275
24.2.2	机械结构	276
24.2.3	动态特性	276
§ 24.3	简单传输线	277
§ 24.4	光电耦合器开关性能的改进	278
§ 24.5	光电二极管工作模式的光电耦合器	280
§ 24.6	光电耦合器的双向工作	281
§ 24.7	光电耦合器的共模抑制	281

第二十五章 摄影放大机的曝光开关

§ 25.1	硅光电二极管曝光开关的结构原理	283
--------	-----------------------	-----

§ 25.2 定时系统	284
§ 25.3 曝光开关的实用电路	285

第二十六章 光电耦合器作为模拟信号开关

§ 26.1 半导体开关与电位隔离	286
§ 26.2 作为光电耦合器开关的光电晶体管	286
26.2.1 稳态特性	286
26.2.2 动态特性	287
§ 26.3 光电耦合器在数字电压表中的应用	288
26.3.1 测量应用的方法	289
26.3.2 数字电压表的实用电路	291
§ 26.4 用斩波器的直流电压变换器	292
§ 26.5 线路测试器	293
26.5.1 测试原理	293
26.5.2 线路测试器的实用线路	294

绪 言

现在,“光电子学”这一术语的含义包括在光学波长范围内电磁辐射的产生、利用和测定以及把电磁辐射转换成电信号。必需具备两个基本部分:作为发射器的辐射源和作为接收器的光电变换器。能发生辐射、或者对紫外、红外和可见波段的辐射敏感的器件,定义为“光电器件”。如今把光电子学归入远距离通信的辅助领域,而它的起源可以追溯到上个世纪。1873年施密斯(Smith)发现硒受到照射时,其电导率发生变化。1887年赫兹(Hertz)发现了后来以他的名字命名的赫兹效应。由于这个效应,在紫外辐射下,火花间隙在较低的电压下会产生火花放电。1888年霍尔维茨(Hallwachs)发现了以他的名字命名的霍尔维茨效应,即带负电的金属板在紫外照射下会失去电荷,而带正电的金属板不会失去电荷。在资料中列举了许多其他的例子。

在本世纪五十年代,随着晶体管的出现,半导体光电子学首先将普通二极管和晶体管平常使用时不希望有的辐射性能用于辐射接收器。经过进一步的研究工作,到了六十年代初期,就制造出了半导体辐射源。

作为世界上最大的半导体制造厂,得克萨斯仪器公司在早期就清楚地认识到光电半导体产品将会得到广泛的应用。得克萨斯仪器公司在光电子器件的研究、发展和制造中进行了开拓性的工作。早在1957年,得克萨斯仪器公司已研制出第一个太阳电池,并且在1959年研制出1N2175硅光电二极管。通过进一步发展,得克萨斯仪器公司还提供了大量的光电器件,大约有125种以上的标准产品。这些产品考虑到了使用者最广泛的种种需要。

迄今为止,光电器件在许多工业部门和日常生活的各个领域内都得到了应用,例如:电力工程、数据处理、机器控制、热能工程、汽车工业、空间系统、录音、视频录象、摄影、日用电子学、医学、远距离通信、环境保护、家用电器等。

应用的领域可以分为六类:

1. 测量、监视、计算、控制和测试给定的光源;
2. 具有非调制光辐射的光电器件;
3. 具有调制光辐射的光电器件;
4. 字母数字显示用光电器件;
5. 图象记录或传输用光电器件;
6. 图象再现用光电器件。

在第一类中,辐射源限于其谱线辐射分布主要在可见光波范围内的自然界存在的光源。例如,这样的光源包括太阳光、人造光或明火等。光电器件的应用范围包括:光度学中的照度计,照相用曝光表,照明开关,闪光时间控制器和闪光快门装置,环境保护用的尘埃密度计,运输用的云雾密度计和停车场灯光开关,热能工程用的火焰监视器和燃烧监视装置,卫生设备监视器,监视路灯和商店橱窗照明的微明开关,电视接收机相对于环境照明的亮度调节,照明亮度调节器,检查和控制设备,测量长度、位置、角度用的机械工具的控制,控制电机用的转数计和把辐射能和光能转换成电能的转换器。

具有非调制光辐射的光电器件归为第二类。在这些器件中，通常把来自辐射光源的无定向发射光转换成平行光束，并引向光敏接收器。接收器把入射辐射能转换成直流信号，并在直流放大器中进一步处理和测试。这就是定向光束耦合器或光电耦合器的原理。如果接收器是通过镜子或反射器来接收发射的辐射，那么就成了反射耦合器。这一类光电器件包括产品控制用耦合器，产品计数器，机械中的安全装置，穿孔卡片和纸带读出器，编码器和电报原文读出器，控制装置中的距离和角度探测器，测量仪表中的指针位置探测器。

第三类光电器件与发射端受到调制的辐射有关。接收器把这种已调制的辐射转换成交流信号。另一方面，又保留了第二类器件的工作原理。接收器设计成交流放大器，因此它比直流放大器更加灵敏，并有更大的温度稳定性。

这一类器件的应用，除包括第二类光电器件的用途外，还有一些新领域，例如：光声记录和还原、光电话、遥控、库房门的开关器、测距机、报警系统、具有电气隔离的信号传输和交流电报。

发出可见光的光电指示器件、指示单元和显示器归入第四类光电器件。最简单的形式是用于工作指示和报警指示的白炽灯、放电灯或发光二极管。一般地说，显示器是表示数字和字母数字信号的装置。其中包括：机械指示装置，冷阴极指示管，七段或十四段指示单元，图象管上的投影显示和字母数字显示。段显示器利用不同的光源，例如磷化镓（GaAsP）二极管、白炽灯、放电灯、交流照明灯等，也可以是依靠加速电子的荧光显示器和透明的或反射式液晶显示单元。

第五类属于录像用光电器件。借助于透镜系统，把一个图象投影到光电阴极上或投影到靶上。图象转换器借助于电子束把光电阴极上出现的图象转换为阳极上的可见荧光图象，或用摄像管对投影到靶上的图象进行扫描。在靶的负载电阻上，图象每一点都转换成与其亮度相对应的电信号。

第六类包括图象再现用的光电器件。这是指荧光屏上图象的电子再现。它包括普通的电视显象管、雷达管、示波管和更为时新的平面图象显示器。

在光学方面，光电子学涉及几何光学、生理光学、物理光学、量子光学、应用光学以及将来可能出现的集成光学领域。几何光学讨论光线按照几何定律的传播、折射和反射，生理光学讨论眼睛对光的视觉和评定过程，而物理光学或波动光学则讨论光的波动传播（衍射、干涉、极化、色散）。量子光学讨论温度辐射定律、原子模型、激励条件、发光及发射现象、X射线以及辐射与物质之间的相互作用等。应用光学讨论光学仪器，例如放大机、显微镜等。在某种意义上，集成光学讨论的光路形式上类似于集成的电子线路。

在电子学方面，光电子学涉及到电操纵的辐射源的调制和控制，录像管和成象管的驱动和偏转电路，以及对光电转换器产生的电信号进一步处理和评价。

如上所述，光电子学的领域及其应用是极其广泛和多方面的，因此本书有如下的安排：

第一部分讨论光电子学的基本原理，光度学和辐射单位，黑体和朗伯辐射体，辐射定律，辐射发光和光发射现象。第二部分为技术部分，重点在于对光电子半导体器件的讲述、计算和应用。最后，第三部分讨论在实验室和实践中经过考验的电路。

V. 哈特莱

第一章 光辐射物理学

§ 1.1 光辐射和光

1.1.1 基本定义

光辐射可以认为是 $10\text{nm}\sim 1\text{mm}$ 波长范围内的电磁辐射。这个波长范围是整个电磁辐射波谱的一部分，如图 1.1 所示。光辐射带是由紫外区、可见光区和红外区组成的。各个波段之间的过渡是不固定的。根据 DIN5031[●] 的规定第七部分，即紫外区从 100nm 开始。紫外区和红外区分为 A, B, C 三个子区；可见光区分成相应的颜色，如表 1.1 所示。“可见光”只是指能被人眼觉察和识别到的光辐射。

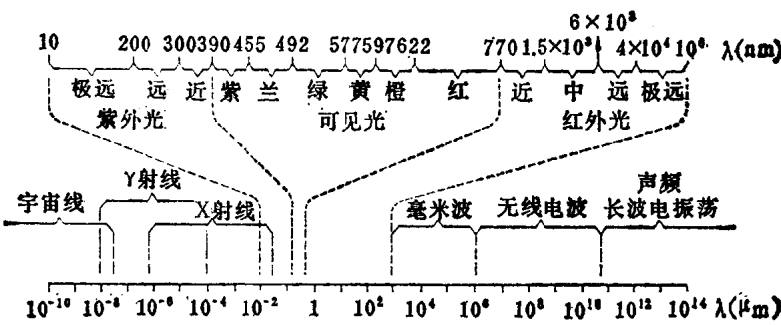


图1.1 电磁辐射波谱

表1.1 根据DIN5031划分的辐射波谱

波 段	辐 射 名 称
100~280 nm	紫外线—C
280~315 nm	紫外线—B
315~380 nm	紫外线—A
380~440 nm	可见光—紫色
440~495 nm	可见光—蓝色
495~558 nm	可见光—绿色
580~640 nm	可见光—黄色
640~750 nm	可见光—红色
750~1400 nm	红外线—A
1.4~3 μm	红外线—B
3~1000 μm	红外线—C

1.1.2 辐射的量子性质

直到本世纪初，电磁辐射，包括光辐射在内，还被认为是连续的波列。

● DIN为Deutsche Industri e Normen (德国工业标准) 的缩写。——译者

然而, 对于外光电效应各种现象的物理研究和探讨, 使大家认识到辐射不是连续的, 而是不能再进一步细分的、称为量子的一些微小部分。这种辐射量子也叫光子, 它具有一定的取决于辐射频率的能量, 对于任何给定的频率, 光子具有最小的能量值。辐射量子的能量与频率之间的关系, 可用下式表示:

$$W_{ph} = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

式中, $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{W} \cdot \text{s}^2 (\text{瓦} \cdot \text{秒}^2)$, 称为普朗克常数, 而 ν 为辐射频率, 单位为赫兹 (Hz)。

在光学范围内, 单个量子的能量是如此之小, 以致于这种辐射的量子结构越出了最常用的测量方法和观察方法的极限范围。

所有的量子都是由原子和分子中的能量变化引起的。对光电子学说来十分重要的是起源于原子的外层电子轨道的辐射现象。在正常状态下, 每个电子实际上处于可能的最低能级。在这个能级, 电子具有一定的位能和动能。在激励过程中, 例如, 由于电能、热能或辐射能的引入, 电子可以暂时离开它们的基态, 而处于具有相应的较高能量的能级。这种状态是不稳定的; 所以在一个很短的时间之后, 受激电子就回到基态, 同时发射出一个辐射量子。如式 (1.1) 所示, 它的频率相当于两个能级之间的能量差。

1.1.3 波粒二重性

如果研究一下电磁辐射的本质, 那么, 根据实验条件的不同, 有时候它表现出像波那样的性能; 但有时候又表现出像粒子流那样的性能 (微粒性)。因此, 当描述辐射的时候, 这两个方面的性质都要考虑。

可以证明, 电磁辐射具有诸如干涉、折射和偏振现象等典型的波动特性, 这显然可以用波列的周期性来解释。在理论物理学中, 电磁辐射的传播是借助于麦克斯韦方程从波动过程推导出来的。

从微粒观点出发, 辐射表现出粒子流的特性。于是每一个光子可看成是具有静止质量为零、以光速运动的基本粒子。与波动特性相比较, 辐射的波长越短, 粒子的性质就越突出。所以, 在 γ 射线波段, 它们的粒子性质就表现得特别显著了。

1.1.4 波长和传播速度

光在真空中的传播速度, 和在大气中的传播速度相近, 为 $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

对于实际计算, 取整数 $c_0 = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 就足够了。光速 c_0 , 波长 λ 和频率 ν 三个基本量之间的关系由下式给出:

$$c_0 = \lambda \cdot \nu \quad (1.2)$$

把式 (1.1) 和 (1.2) 联立, 若已知光子能量 W_{ph} , 就可以按下式计算光子的波长:

$$\lambda = \frac{c_0 \cdot h}{W_{ph}} \quad (1.3)$$

通常光子能量规定以电子伏 (eV) 为单位。一个电子伏相当于一个电子通过具有 1 伏电位差的电场时受加速所得到的动能。利用下式可把电子伏转换成国际标准单位瓦·秒 (Ws) 或焦耳 (J):

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{W} \cdot \text{s} (\text{瓦} \cdot \text{秒})$$

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J (焦耳)}$$

如果把有关常数的数值和电子伏对瓦·秒的转换系数代入, 那么式 (1.3) 可以简化为数值方程

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \times 6.62 \times 10^{-34}}{W_{ph} \cdot 16 \times 10^{-19}}$$

式中: λ 的单位为微米 (μm);

c_0 的单位为米/秒 (m/s);

W_{ph} 的单位为电子伏 (eV)。

数值方程的结果为

$$\lambda = \frac{1.24}{W_{ph}} \quad (1.4)$$

由这些式子可以看到, 光子的能量越大, 电磁波的波长就越短。

§ 1.2 辐射和发光现象

1.2.1 原子和能带模型

为了对辐射现象和以后要讲的光发射现象作出物理解释, 了解原子和能带模型是必要的。原子模型只是用简单的表示法描述原子的空间结构, 而能带模型可以给出单个原子或若干原子的组合 (如晶格) 中电子能量的排列情况。作为例子, 图 1.2 示出了锗的原子模型。

近代研究表明, 原子是极其复杂的; 但是为了简单起见, 它可以看作是由带正电的原子核和围绕核作轨道运行的带负电的电子组成的。原子核本身是由称为中子的中性粒子和与其结合在一起的带正电的质子组成的。质子数决定该原子属于什么化学元素。在一个电中性的原子中, 电子数和质子数是相等的。电子都位于围绕原子核的特定轨道上, 这些轨道分成所谓的壳层; 在图 1.2 中, 这些壳层用它们的标准符号 K、L、M 和 N 来表示。

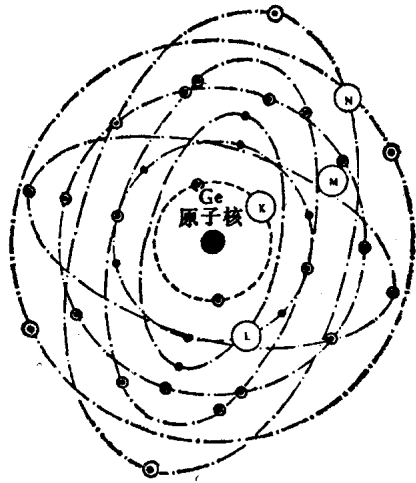


图1.2 锗原子的模型

几乎具有多于 82 个质子的原子核和几个较小的原子核都是不稳定的。通过众所周知的核裂变过程, 它们在不同的时间内自发地发生蜕变。经过这个裂变过程, 原来的元素变成另一种元素。例如, 镭裂变成稳定的元素铅, 伴随着从原子核发出 α 射线, β 射线和短波 γ 射线辐射。这些辐射来源于原子核, 同时在核周围的电子云内发生光辐射的发射和吸收。

电子的能态由四个量子数来描述, 这四个量子数用小写字母命名:

1. n ——主量子数 (与特定的壳层有关);
2. l ——副量子数 (表示电子轨道的形状和所在的支壳层);
3. m ——磁量子数 (轨道角动量矢量的空间位置);