



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家精品课程配套教材



结构化学 (第四版)

厦门大学化学系物构组 编

林梦海 吕鑫 谢兆雄 等 执笔



科学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家精品课程配套教材

结构化学

(第四版)

厦门大学化学系物构组 编
林梦海 吕 鑫 谢兆雄等 执笔

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、2004 年国家精品课程配套教材。

本书以卢嘉锡先生于 20 世纪 50 年代为厦门大学开设的“物质结构”内容为蓝本,汇集了几代人的教学经验,既保留了经典的结构化学内容,又注重吸收最新的科研成果,主要包括量子力学基础、原子结构、分子对称性与点群、双原子分子、多原子分子结构、晶体学基础、金属和合金结构、离子化合物等内容。本书的特点是突出重点,基础概念阐述清楚;围绕难点,联系化学现象或化学概念,做到深入浅出。此外,本书还配有习题及部分习题参考答案,便于学生学习。

本书可作为高等学校化学、应用化学、材料化学、药物化学等专业本科生的教材,也可供相关专业的教师及科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构化学/厦门大学化学系物构组编. —4 版. —北京:科学出版社,2019. 11
普通高等教育“十一五”国家级规划教材 国家精品课程配套教材
ISBN 978-7-03-063214-2

I. ①结… II. ①厦… III. ①结构化学—高等学校—教材 IV. ①O641

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 249222 号

责任编辑:丁 里 / 责任校对:何艳萍
责任印制:师艳茹 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市密东印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 6 月第 二 版 印张:19 1/2 插页:2

2014 年 6 月第 三 版 字数:493 000

2019 年 11 月第 四 版 2019 年 11 月第十六次印刷

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



第四版前言

《结构化学》自 2004 年出版后,已进行两次修订。厦门大学结构化学教学课程组因不断补充新鲜血液而日益壮大,目前课程组人员已多达八人。已退休的老教师们仍极为关心该课程教学内容的与时俱进和教材修订,今年年初林梦海教授提议课程组对教材进行再一次修订。

课程组在今年三月和四月先后组织了两次讨论会,确定了修订原则、任务分工及进度安排;六月初又专门开会进行了一次进度交流;七月上旬完成了修订内容的统稿后,提交给出版社审核。

本次修订包括剔除部分过时冗长内容、将容易产生歧义的文字定义及符号进一步统一和规范化等。具体的分工为:苏培峰负责第 1 章,吴安安负责第 2 章,曹泽星负责第 3 章,陈振华负责第 4 章,吕鑫负责第 5、6 章,蒋亚琪和谢兆雄负责第 7~9 章。本次再版工作还得到了谭凯、王斌举和杨晔等多位老师的大力支持以及科学出版社丁里编辑的帮助,在此一并表示感谢!

读者可登录厦门大学“结构化学”课程主页(网址 <http://ctc.xmu.edu.cn/jiegou/wlkch/Contents/contents.htm>),参与并学习国家精品课程“结构化学”。

《结构化学》编写组

2019 年 9 月于厦门



第三版前言

根据科学出版社的建议,承蒙广大读者的厚爱,《结构化学》教材编写组筹备该书第三版的编写。编写组由林梦海、谢兆雄、曹泽星、吕鑫、王泉明教授和蒋亚琪、苏培峰、吴安安、谭凯等副教授组成,并邀请以前任教的胡盛志资深教授加盟,组成了老、中、青三代学者参加,学科涵盖结构化学、量子化学、计算化学、合成化学等多领域的团队。

编写组于2013年秋进行了第一次教材研讨会,对21世纪“结构化学”课程的发展与需求、第二版教材存在的问题与改进的方向等进行了深入、广泛的研讨,最后确定了第三版编写具体分工:吕鑫、吴安安负责第1、2章,曹泽星、谭凯负责第3、4章,林梦海、苏培峰负责第5、6章,谢兆雄负责第7章,王泉明、蒋亚琪负责第8、9章。

以后编写组又召开了两次研讨会,确定了第三版的修改框架,并对修改内容集体审阅:原5.2节“价电子对互斥理论”,该内容已下放到中学,故删去这节,增补一节“常见分子化学键”,由林梦海撰写。5.3节关于“共轭效应”与“芳香性”增加内容,由这方面专家吕鑫撰写。原6.7节“氢键”根据学科发展进行补充,并邀请熟悉超分子的专家王泉明撰写了6.8节“超分子化学”。在胡盛志指导下,谢兆雄根据晶体概念的发展,对第7章内容进行反复修改与补充。熟悉金属理论的谭凯改写了8.1节“金属键理论”。8.4节“合金的结构”,根据集体意见增补了大量素材。根据诺贝尔奖宣传提纲,对原8.5节“准晶”进行修改,并调整到7.6节。9.4节和9.5节,根据集体意见,林梦海增补了许多素材。在9.6节“功能材料晶体”后面增添了9.7节“有机晶体”。蒋亚琪绘制了大量精美的晶体结构图,谭凯绘制了许多分子结构图。编写组请吴安安、苏培峰分别撰写了“生物分子晶体”、“密度泛函理论”等内容。谢兆雄还修订了附录7的内容。

本书源于卢嘉锡教授开创、厦门大学物构组六十多年的传承,编写组兢兢业业、不敢大意;本书与课程组设立的“结构化学”国家精品课程网站实现了与全国读者的互动联系,使编写组深受鼓舞与鞭策。我们只有用持续的努力,才能回报前辈的期待与读者的厚爱。

《结构化学》编写组

2014年4月于厦门



第二版前言

《结构化学》自 2004 年出版后,得到众多读者厚爱,连续印刷 4 次,第二版被教育部定为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

这次修订再版,对第 1、2、4、6 章进行了修改、补充,第 7 章重新撰写,第 8 章也有部分内容重新编写。全书习题根据本校教学实践,并参考国内外相关教材,进行了大量筛选,重新编写。书后附录 7 和附录 8 也重新编写。

本次再版工作得到课程主讲教师谢兆雄、徐昕、曹泽星、蒋亚琪等老师的大力支持,提出了许多宝贵意见。谢兆雄老师编写了第 7 章和附录 7,林梦海老师编写了其余部分。校对工作得到蒋亚琪、谭凯老师大力支持,出版过程中丁里编辑等付出了辛勤劳动,在此一并表示感谢。

由于时间仓促,而且一些习题初次使用,定有不妥之处,恳请同行、读者指正。

林梦海 谢兆雄

2008 年 5 月于厦门大学



第一版前言

结构化学(原称“物质结构”)是卢嘉锡先生于 20 世纪 50 年代从国外归来后,为厦门大学化学系开设的一门基础课。他精心组织教材,撰写教案,并建立模型实验室,使学生受益匪浅。以后,张乾二教授接班讲授“物质结构”。60 年代,他们编写讲义并在厦门大学开办“物质结构”研讨班,为全国培养了一批结构化学人才。60~90 年代,林连堂、胡盛志、施彼得、周牧易、王银桂等教授先后讲授“结构化学”,不断丰富与完善教学内容。近年,中青年教师执教,又增添了一些新的科研成果。本书是根据厦门大学半个世纪的教学积累,并吸收兄弟院校优秀教材的精华编写而成的。

结构化学是一门在原子、分子水平上讨论物质微观结构的课程。它以量子化学为基础,结合无机化学、有机化学的实验事实,讨论原子、分子的化学键理论。主要内容包括四大部分:量子力学基础、原子结构、分子结构(双原子、多原子分子)、晶体结构(金属、离子晶体)。通过学习使学生了解:“化学键决定结构,结构决定性质”,从而在高层次上解释各种化学现象。

本书在编写过程中不仅注意描述的科学严密性,还注意内容的时代性。在分子结构中加入了 Hückel 图形理论、团簇纳米结构。固态结构主要介绍晶体结构,也适当介绍了准晶、非晶结构特点,还增加一些功能材料的结构介绍。本书中某些内容如“群的表示理论”、“配位场强场弱场方案”等,可能超过教学大纲要求,可作为学生加深原理解、拓宽知识面的选学内容。

本书教材部分除 7.4 节、7.5 节为谢兆雄编写外,其余均由林梦海执笔编写,习题部分由林银钟编写。全书由张乾二先生审定。编写过程中文字输入得到王艺平、夏飞、李春森、林玉春等研究生的帮助,图片绘制得到洪家岁、王嫔、曹志霖、柯宏伟等研究生大力支持,谢兆雄、徐昕、蒋亚琪、宋凌春、谭凯等老师认真进行校对工作。多媒体光盘由陈明旦、林银钟老师率王艺平、林玉春、张健、黄仲彪、李春森、蔡巍、洪家岁、林红、魏赞斌等同志制作。编写过程中还得到科学出版社王志欣、刘俊来、吴伶俐同志的大力支持,在此一并表示感谢。

由于执笔者水平有限,且时间仓促,定有不少失误,恳请同行批评指正。

林梦海 林银钟
2004 年 1 月于厦门



目 录

第四版前言

第三版前言

第二版前言

第一版前言

第 1 章 量子力学基础	1
1.1 量子力学的诞生	1
1.1.1 19 世纪末的物理学	1
1.1.2 三个重要实验	1
1.1.3 德布罗意物质波	4
1.1.4 测不准原理	5
1.2 量子力学的基本假设	6
1.2.1 假设 I——状态波函数和概率	6
1.2.2 假设 II——力学量与线性自共轭算符	8
1.2.3 假设 III——Schrödinger 方程	9
1.2.4 假设 IV——态叠加原理	10
1.2.5 假设 V——Pauli 不相容原理	11
1.3 量子力学的简单应用	11
1.3.1 一维势箱中的自由粒子	11
1.3.2 三维势箱中的自由粒子	13
1.3.3 应用	14
1.4 量子力学的一些基本概念	16
1.4.1 全同粒子	16
1.4.2 表象	16
1.4.3 隧道效应	17
习题 1	18
参考文献	20
第 2 章 原子结构	21
2.1 类氢离子的 Schrödinger 方程	21
2.1.1 引言	21
2.1.2 变数分离	22
2.1.3 解 Φ 方程	23
2.1.4 Θ 方程的解	23
2.1.5 R 方程的解	24
2.2 类氢离子波函数及轨道能级	25

2.2.1	量子数的物理意义	25
2.2.2	主量子数 n 与能级	26
2.2.3	径向分布函数	27
2.2.4	角度分布函数	30
2.3	多电子原子的结构	33
2.3.1	核外电子排布与电子组态	33
2.3.2	中心力场近似和自洽场方法	34
2.3.3	电离能与电子亲和能	35
2.3.4	电负性	39
2.4	原子光谱项	40
2.4.1	定义	40
2.4.2	原子光谱项的推导	41
2.4.3	组态的能级分裂	43
2.4.4	基态光谱项	44
	习题 2	45
	参考文献	47
第 3 章	分子对称性与点群	48
3.1	对称元素与点群	48
3.1.1	对称性、对称操作与对称元素	48
3.1.2	旋转轴与转动	49
3.1.3	对称面与反映	50
3.1.4	对称中心与反演	51
3.1.5	映转轴与旋转反映	51
3.1.6	对称点群	52
3.2	分子对称点群	54
3.2.1	对称点群分类	54
3.2.2	C_n 群	54
3.2.3	C_{nv} 群	55
3.2.4	C_{nh} 群	55
3.2.5	D_n 群	56
3.2.6	D_{nh} 群	57
3.2.7	D_{nd} 群	59
3.2.8	S_n 群	60
3.2.9	高阶群	61
3.2.10	分子点群的判别	65
3.3	群的表示理论	66
3.3.1	可约表示与不可约表示	66
3.3.2	特征标表	67
3.3.3	应用	68
3.4	分子对称性与旋光性和偶极矩	70

3.4.1 分子旋光性	70
3.4.2 分子偶极矩	71
习题 3	74
参考文献	76
第 4 章 双原子分子	77
4.1 化学键理论简介	77
4.1.1 原子间相互作用力	77
4.1.2 化学键理论	77
4.1.3 结构与性质的关系	78
4.2 H_2^+ 的 Schrödinger 方程	79
4.2.1 原子单位	79
4.2.2 Born- Oppenheimer 近似	79
4.3 H_2^+ 的精确解法	80
4.3.1 椭球坐标与变数分离	80
4.3.2 H_2^+ 的精确解的对称性	81
4.3.3 态的分类	82
4.4 H_2^+ 的近似解法	82
4.4.1 变分法简介	82
4.4.2 变分法解 H_2^+	83
4.4.3 积分意义	85
4.4.4 成键原理	86
4.5 分子轨道理论和双原子分子结构	87
4.5.1 分子轨道理论	87
4.5.2 双原子分子轨道的特点	87
4.5.3 同核双原子分子	89
4.5.4 异核双原子分子	91
4.6 价键理论和 H_2 分子结构	93
4.6.1 价键理论	93
4.6.2 H_2 的价键处理	94
习题 4	96
参考文献	98
第 5 章 多原子分子结构(一)	99
5.1 杂化轨道理论	99
5.1.1 杂化轨道波函数	99
5.1.2 杂化轨道的方向	100
5.1.3 应用	101
5.2 常见分子化学键	103
5.2.1 二元氢化物	103
5.2.2 各种氧化物	104
5.2.3 卤化物	105

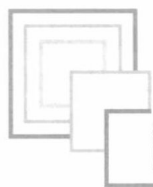
5.2.4 稀有气体化合物	105
5.3 离域化学键	106
5.3.1 一般 π 键	106
5.3.2 离域 π 键	107
5.3.3 共轭效应	108
5.3.4 芳香性	109
5.4 HMO 方法	110
5.4.1 HMO 方法简介	110
5.4.2 丁二烯的 HMO 处理	111
5.4.3 电荷集居与分子图	112
5.4.4 环烯烃体系	113
5.5 分子轨道先定系数法	114
5.5.1 介绍	114
5.5.2 偶数碳链分子	117
5.5.3 奇数碳链分子	118
5.5.4 共轭环链之一	118
5.5.5 共轭环链之二	120
5.5.6 复杂共轭体系	121
5.6 共价键能与半径	122
5.6.1 共价键键能	122
5.6.2 键长和共价半径	123
5.6.3 范德华半径	124
5.7 前线轨道理论和轨道对称守恒原理	126
5.7.1 前线轨道理论	126
5.7.2 分子轨道对称守恒原理	127
习题 5	130
参考文献	132
第 6 章 多原子分子结构(二)	133
6.1 缺电子多中心键	133
6.1.1 硼烷的结构	133
6.1.2 Lipscomb 的拓扑结构	134
6.1.3 封闭硼笼 $B_nH_n^{2-}$ 与 Wade 规则	135
6.1.4 其他缺电子多中心键	136
6.2 配合物的化学键	137
6.2.1 简介	137
6.2.2 σ 键配合物的结构	139
6.2.3 金属羰基配合物($\sigma\pi$ 配键)	140
6.2.4 烯烃配位化合物	140
6.3 配位场理论	142
6.3.1 中心离子电子组态的谱项	142

6.3.2	原子轨道在不同环境中的能级分裂	143
6.3.3	弱场方案	145
6.3.4	强场方案	145
6.4	过渡金属原子簇化合物	147
6.4.1	簇合物中 M-M 间多重键	147
6.4.2	金属簇合物的几何构型与电子计数法	148
6.5	原子团簇	150
6.5.1	富勒烯碳笼	150
6.5.2	碳纳米管	152
6.6	次级键	153
6.6.1	非金属原子间次级键	154
6.6.2	非金属-金属原子间次级键	154
6.6.3	金属原子间次级键	155
6.7	氢键	156
6.7.1	氢键产生的条件和影响	156
6.7.2	水的氢键	158
6.7.3	几种重要化合物的氢键	160
6.8	超分子化学	162
6.8.1	分子化学与超分子化学	162
6.8.2	经典的超分子主体	162
6.8.3	分子识别与超分子自组装	164
6.8.4	晶体工程	166
	习题 6	166
	参考文献	168
第 7 章	晶体学基础	169
7.1	晶体结构的周期性和点阵	169
7.1.1	晶体及其性质	169
7.1.2	周期性与点阵结构	170
7.1.3	晶胞	173
7.1.4	实际晶体	173
7.2	晶系、Bravais 格子与晶面	174
7.2.1	七个晶系	174
7.2.2	14 种空间点阵形式	175
7.2.3	晶面与米勒指数	177
7.3	晶体的对称性	179
7.3.1	晶体结构的对称元素和对称操作	179
7.3.2	晶体的宏观对称性——晶体学点群	182
7.3.3	晶体的微观对称性——空间群	183
7.4	晶体的 X 射线衍射	185
7.4.1	引言	185

7.4.2	X射线的产生与散射	186
7.4.3	衍射方向	187
7.4.4	倒易点阵与反射球	189
7.4.5	衍射强度	190
7.4.6	系统消光	191
7.4.7	X射线相干散射理论简介	192
7.5	X射线衍射的应用	194
7.5.1	单晶衍射法	194
7.5.2	多晶衍射法	195
7.5.3	应用	196
7.6	准晶	200
7.6.1	准晶的发现	200
7.6.2	平面镶嵌与黄金分割	200
7.6.3	二十面体密堆	201
7.6.4	晶体的新定义	202
7.6.5	准晶种类	202
	习题 7	204
	参考文献	207
第 8 章	金属和合金结构	209
8.1	金属键理论	209
8.1.1	自由电子模型	209
8.1.2	能带理论	210
8.2	等径球密堆积	211
8.2.1	三种密堆积	211
8.2.2	密堆与空隙	213
8.3	金属单质结构	215
8.3.1	单质结构	215
8.3.2	金属原子半径	216
8.4	合金的结构	217
8.4.1	金属固溶体	218
8.4.2	金属化合物	219
8.4.3	金属间隙化合物	222
8.5	非晶态合金	224
8.5.1	简介	224
8.5.2	非晶态合金的结构特征	225
8.5.3	非晶态合金的制备与分类	226
8.5.4	性能与应用	227
	习题 8	228
	参考文献	231

第 9 章 离子化合物	232
9.1 晶格能	232
9.1.1 晶格能的静电模型	232
9.1.2 晶格能的热力学模型	233
9.2 几种典型的二元离子晶体结构	234
9.2.1 NaCl 型	234
9.2.2 CsCl 型	235
9.2.3 ZnS 型	235
9.2.4 CaF_2 型	236
9.2.5 TiO_2 型	236
9.3 离子半径	237
9.3.1 引言	237
9.3.2 离子半径与周期表	238
9.3.3 离子堆积规则	240
9.4 离子极化	241
9.4.1 离子极化的概念	241
9.4.2 离子极化对结构的影响	241
9.5 多元离子化合物	244
9.5.1 主要多元离子化合物	245
9.5.2 Pauling 规则	248
9.5.3 硅酸盐的结构	249
9.6 功能材料晶体	251
9.6.1 高温超导晶体	251
9.6.2 非线性光学晶体	253
9.6.3 磁性材料	254
9.6.4 功能转化材料	256
9.7 有机晶体	257
9.7.1 一般有机晶体	257
9.7.2 含氢键的晶体	259
9.7.3 嵌入式晶体	259
9.7.4 聚合物(高分子)晶体	260
9.7.5 生物分子晶体	260
9.8 液晶	262
9.8.1 简介	262
9.8.2 热致液晶	262
9.8.3 溶致液晶	263
9.8.4 液晶的应用	264
习题 9	265
参考文献	269

附录	270
附录 1 实习	270
附录 2 单位、物理常数和换算因子	273
附录 3 32 个晶体学点群极射赤道平面投影图	276
附录 4 原子轨道能级/ R (实验测定)	278
附录 5 点群特征标表	279
附录 6 晶体的 230 个空间群的记号	288
附录 7 国际晶体结构数据库概况	290
附录 8 部分习题参考答案	292



第 1 章 量子力学基础

结构化学的理论基础是量子力学。量子力学是研究微观粒子(如电子、原子和分子等)运动规律的学科。量子力学的建立经历了由经典物理学到旧量子论,再由旧量子论到量子力学两个历史发展阶段。量子力学是现代物理学的基础理论之一,在化学中有广泛的应用。

1.1 量子力学的诞生

1.1.1 19 世纪末的物理学

经典物理学发展到 19 世纪末,已形成一个相当完善的体系。在经典力学方面有 Newton(牛顿)三大定律,热力学方面有 Gibbs(吉布斯)理论,电磁学方面有 Maxwell(麦克斯韦)方程统一解释电、磁、光等现象,而统计方面有 Boltzmann(玻尔兹曼)的统计力学。当时物理学家很自豪地说,物理学的问题基本解决了,一般的物理现象都可以从以上某一学说获得解释。但有几个物理实验还没找到解释的途径,而恰恰是这几个实验为我们打开了一扇通向微观世界的大门。

1.1.2 三个重要实验

1. 黑体辐射

绝对黑体,或简称黑体,是热辐射线吸收能力最强的一种理想化物体,能够在任何温度下将辐射到它表面上的任何波长的能量全部吸收。实际物体没有绝对黑体,但在理论研究中可设计各种黑体。例如,一个器壁上开小孔的由不透明材料制成的空心容器。通过小孔进去的光线碰到内表面时部分吸收,部分漫反射,反射光线再次被部分吸收和部分漫反射……只有很小部分入射光有机会再从小孔中出来,如图 1-1 所示。

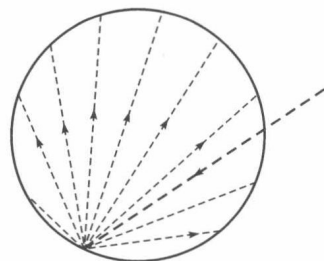


图 1-1 黑体辐射示意图

19 世纪末,人们已对黑体辐射实验进行了仔细测量,发现辐射强度对腔壁温度 T 的依赖关系,各种温度在不同波长处有一极大值 λ_{\max} (图 1-2)。根据 Wien(维恩)定律 $\lambda_{\max} T = C_0$,辐射强度与腔壁形状和材料无关。但还需要找出用波长与温度来表达能量的表达式。

1900 年 12 月 14 日,Planck(普朗克)在德国物理学会的一次会议上提出了黑体辐射定律的推导。在推导辐射强度作为波长和温度函数的理论表达式时,普朗克做了一个特别基本的假定,从而背离了经典物理学。这个假定的精髓可以说明如下:一个自然频率为 ν 的振子只能取得或释放成包的能量,每包的大小为 $E = h\nu$,这里的 h 是一个自然界的新的基本常数。根据这一假定,Planck 推导出一个表达式:

$$\frac{\lambda_{\max}}{c} k T = \frac{C_0}{c} k = 0.2014 h \quad (1-1)$$

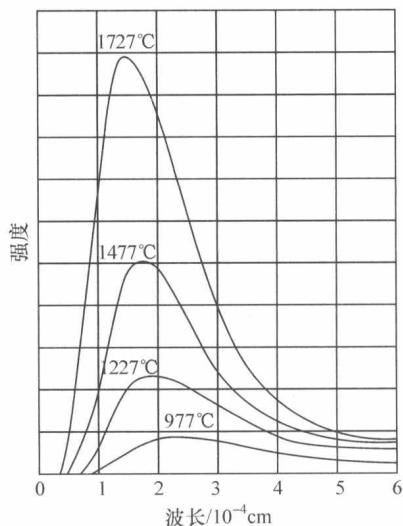


图 1-2 辐射强度对温度的依赖

Planck 本人在接受这个背离经典物理学的假定时是非常勉强的。在他做出伟大的发现之后，还一直试图在经典力学基础上解释黑体辐射现象。关于这些无效的努力，他后来说他并不认为它们是无用劳动，由于反复失败，他才最后相信：不可能在经典物理学内求得说明。

Planck 辐射定律完整的形式表达如下：

$$E(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (1-2)$$

式中： $E(\lambda, T)$ 为黑体腔内在温度 T 和波长 λ 处单位波长间隔中的辐射能强度； k 为 Boltzmann 常量； c 为光速； h 为一个新的自然常量，等于 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，后人称之为 Planck 常量。因此，黑体辐射的能量是不连续的，只能为 $h\nu$ 的整数倍。Planck 能量量子化假设标志着量子理论的诞生。

2. 光电效应

物理学家进行的光电实验装置如图 1-3 所示。

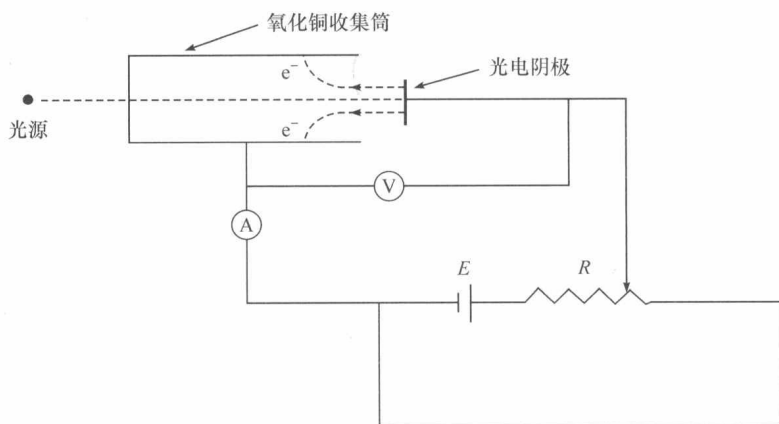


图 1-3 光电效应示意图

光照射在金属表面，某些时候有电子从表面逸出。令人惊奇的是：逸出电子的动能与光的强度无关，但却以非常简单的方式依赖于频率。增大光的强度，只增加了单位时间内发射的电子数，但不会增加电子的能量。经典力学对此难以解释。1905 年，Einstein(爱因斯坦)提出，如果光的行为是一束粒子流，每个光子具有能量 $h\nu$ (ν 为频率)，则以上结果可以解释。他预计从金属表面逸出的电子动能可用式(1-3)计算：

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W \quad (1-3)$$

式中： W 是一个电子逸出表面所需最低能量(也称功函数)。这种解释被实验所证实。

众所周知，早在 17 世纪对光的本性有 Newton 的微粒说与 Huygens(惠更斯)的波动说。由于光的衍射与干涉现象，波动说一度占上风。Einstein 又提出光子说，即光是波粒二象性的，圆满地解释了光电效应。光子学说的内容如下：