



TEACHING MATERIALS  
FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

# 物理实验教程

——近代物理实验

PHYSICS EXPERIMENT COURSE  
——EXPERIMENTS IN MODERN PHYSICS

王殿生 周丽霞 刘超卓 亓鹏 编著

 中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



TEACHING MATERIALS  
FOR COLLEGE STUDENTS  
高等学校教材

# 物理实验教程

——近代物理实验

王殿生 周丽霞 刘超卓 亓鹏 编著



中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

物理实验教程.近代物理实验/王殿生等编著.—  
东营:中国石油大学出版社,2016.2  
ISBN 978-7-5636-5185-6

I. ①物… II. ①王… III. ①物理学—实验—高等学  
校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 037289 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 物理实验教程——近代物理实验  
作 者: 王殿生 周丽霞 刘超卓 亓 鹏

---

责任编辑: 高 颖 岳为超(电话 0532—86981532)

封面设计: 赵志勇

---

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

印 刷 者: 沂南县汶凤印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531,86983437)

开 本: 185 mm×260 mm 印张:16 字数:375 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 32.00 元

# 前 言

近代物理实验是物理类专业本科生的核心专业基础课程,也是其他理工科专业学生的选修课程,更是一门充满探索 and 创新的实践课程。课程内容涉及在近代物理学发展中起突破性作用的著名实验和在当前科学研究中发挥重要作用的典型实验方法与实验技术,具有多种理论、多种技术、多种学科交叉的特点。近代物理实验所涉及的实验知识的综合性、实验技术的复杂性以及实验过程的研究性决定了该课程对提升学生综合素质和培养学生创新能力具有重要的作用。

通过近代物理实验课程的学习,学生可以亲自实践研究物理现象与规律,领会著名物理学家的物理思想和实验设计思想,培养创新意识和创新思维;掌握近代物理学的基本实验理论、实验方法和实验技术,进一步提高发现问题、提出问题、分析问题和解决问题的能力,培养实践能力和创新能力;掌握近代物理学的基本研究方法,学习科学实验的基本设计方法、科学仪器的使用以及现代测量技术,培养独立开展科学研究的基本能力;了解近代物理实验方法和技术在科学研究与工程实践中的广泛应用,激发自主探索与研究的兴趣,培养理论联系实际的科学作风。

中国石油大学(华东)于1980年开始独立开设近代物理实验课程,在课程建设和教学方面积累了宝贵经验。近年来,依托应用物理学国家高等学校特色专业、山东省物理实验教学示范中心和近代物理实验山东省精品课程建设,近代物理实验课程以“促进学生自主式研究性学习、培养学生实践创新能力”为指导思想,建立了符合多元化人才培养的层次化、模块化、系列化、特色化的实验教学体系。整个实验教学内容分成基础性实验、综合性实验、设计性实验和研究性实验四个层次,包括光学测量技术实验、微波测量技术实验、磁共振技术实验、材料制备与检测技术实验、原子物理与核物理实验和计算机模拟实验六大模块,每个模块又由一系列实验项目组成,基本涵盖了近代物理学的主要实验技术领域,并且注重现代物理实验技术与石油工程应用相结合的特色实验内容。

本教材是在总结我校多年近代物理实验课程教学改革成果的基础上,根据高等学校物理类专业本科指导性专业规范的要求、普通高等学校近代物理实验课程教学大纲的指导思想和原则,借鉴国内外著名院校的先进实验教学理念编写而成的。本教材在编写中主要突出以下特点:

(1) 整体优化设计教材内容,注重经典与现代结合、理论与技术结合、知识与能力结

合、实践与创新结合;教材内容的组织编写体现层次化、模块化、系列化、特色化,以满足多元化和个性化的人才培养,循序渐进地培养学生的实践创新能力。

(2)精选了大量获诺贝尔物理学奖的实验项目,并重点介绍一系列相关获奖内容和背景知识。这些实验的设计思想新颖独特,求异思维特征鲜明。通过这些实验可使学生体验和感悟物理学家的物理思想和探索过程,从中受到创新思维启迪。

(3)教材中各实验项目都包括基础性实验内容和设计性实验内容两个部分,以适应各层次的教学需求。设计性实验内容是基于该项目的现有实验条件编写的,并且在参考文献中增加了直接相关的期刊论文,其中一些是由我校本科学生发表的。这样,一方面使学生有设计实验的基础、条件和信心,另一方面给学生提供一定的设计、探索、研究空间,有利于激发学生探索研究的欲望,从而进一步培养学生自主实践与创新的能力。

(4)为了激发学生的学习兴趣,促进学生自主式研究性学习,每个实验项目中都介绍了实验背景、相关应用及发展前沿,编写了“预习要求”以及“思考与讨论”,并且在各实验内容的编写上只给出所做的内容和要求,让学生在掌握实验原理和方法、了解实验器材的基础上根据实验要求自行设计实验步骤。

(5)考虑到科学计算已经成为与理论分析和科学实验并列的三大研究方法之一,并在物理学中已经发展为一门新兴的边缘学科——计算物理学,故本教材编写了“计算机模拟实验”这一章,力图使学生受到理论思维、实验技能和科学计算三大现代科学素质的全面训练,从而为学生从事科学研究和工程应用奠定坚实的基础。

(6)为了适应国际化人才培养的需要,以便于学生查阅相关的外文文献,本教材中重要的名词术语都给出了相应的英文表述,并编写了“中英文对照的常用物理量与单位”“中英文对照的基本物理常数”和“中英文对照的名词术语”3个附录。

(7)在近代物理实验研究中发展起来的现代物理测量技术,如光学技术、微波技术、磁共振技术等,已经广泛应用于各个学科的科学研究和许多领域的工程实践。为了突出应用性,本教材以现代物理测量技术为主线来编写,目的是让学生在重点学习用现代实验方法和技术观察物理现象、研究物理规律的同时,系统地掌握一些常用的现代物理测量技术,以培养学生的实际应用技能。考虑到微波技术无论是在一些科学研究还是在工程应用中都已成为一种强有力的技术手段,本教材将“微波测量技术实验”作为独立的一章来编写,以便学生较全面地学习微波测量的基本方法和技术。

参与本教材编写的人员为王殿生、周丽霞、刘超卓和亓鹏,具体分工为:王殿生和周丽霞共同编写第1章,王殿生编写第2章和附录,周丽霞编写第3章,亓鹏编写第4章和第6章,刘超卓编写第5章。全书由王殿生教授和周丽霞副教授统稿和审校。

实验教学是一项集体事业,从实验教学内容的不断改进和完善、实验室建设到教材编写都凝集了中国石油大学(华东)近代物理实验室广大教师和实验技术人员长期辛勤工作的成果,因此本教材是集体智慧和劳动的结晶。借此教材出版之际,编者向他们表示衷心的感谢!本教材的出版还得到了中国石油大学(华东)规划教材、近代物理实验山东省精品课程、应用物理学国家高等学校特色专业等建设项目的大力支持和资助。在本教材编写过程中曾参阅了许多相关文献资料和兄弟院校的教材,因篇幅所限只列出了一些主要的参考资料,在此我们一并表示诚挚的谢意!

本教材共包括6章30个实验,内容涉及近代物理学中的著名实验、现代物理实验技

术的典型实验和现代科学计算的模拟实验,有助于培养学生从事科学研究和实际应用工作所需的综合素质,可作为高等院校物理类本科专业的近代物理实验教学用书,也可供相关专业的研究生、教师及科研人员参考使用。

由于编者水平所限,教材中难免存在一些不足之处甚至错误,恳请使用本教材的各位读者批评指正并提出宝贵的意见和建议,我们一定会不断努力完善和提高,使本教材建设得更好。

编 者

2015年10月于青岛

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 光学测量技术实验</b> .....  | 1   |
| 实验 1-1 氢原子光谱与里德伯常数的测定 .....  | 2   |
| 实验 1-2 介质的吸收光谱分析 .....       | 7   |
| 实验 1-3 超声光栅测量液体中的声速 .....    | 11  |
| 实验 1-4 脉冲固体激光器基本特性参数测量 ..... | 18  |
| 实验 1-5 He-Ne 激光的模谱分析 .....   | 27  |
| 实验 1-6 激光法测量光速 .....         | 35  |
| 实验 1-6-1 激光光拍频法测量光速 .....    | 36  |
| 实验 1-6-2 激光相位差法测量光速 .....    | 40  |
| <b>第 2 章 微波测量技术实验</b> .....  | 44  |
| 实验 2-1 微波测量系统调试与频率测量 .....   | 44  |
| 实验 2-2 微波晶体检波律测定与驻波比测量 ..... | 56  |
| 实验 2-3 二端口微波网络散射参量测量 .....   | 63  |
| 实验 2-4 微波天线方向图与极化特性测量 .....  | 69  |
| 实验 2-5 复介电常数的微波测量 .....      | 80  |
| <b>第 3 章 磁共振技术实验</b> .....   | 88  |
| 实验 3-1 塞曼效应 .....            | 89  |
| 实验 3-2 核磁共振 .....            | 96  |
| 实验 3-2-1 连续波核磁共振 .....       | 96  |
| 实验 3-2-2 脉冲波核磁共振 .....       | 104 |
| 实验 3-3 电子自旋共振 .....          | 114 |
| 实验 3-3-1 射频电子自旋共振 .....      | 117 |
| 实验 3-3-2 微波电子自旋共振 .....      | 120 |
| 实验 3-4 铁磁共振 .....            | 125 |

|              |                          |            |
|--------------|--------------------------|------------|
| 实验 3-5       | 光泵磁共振 .....              | 131        |
| <b>第 4 章</b> | <b>材料制备与检测技术实验</b> ..... | <b>141</b> |
| 实验 4-1       | 真空镀膜与电子衍射实验 .....        | 141        |
| 实验 4-2       | 磁性材料的磁电阻特性测量 .....       | 151        |
| 实验 4-3       | 压电陶瓷的压电常数测量 .....        | 161        |
| 实验 4-4       | 超导材料的基本特性测量 .....        | 166        |
| <b>第 5 章</b> | <b>原子物理与核物理实验</b> .....  | <b>171</b> |
| 实验 5-1       | 黑体辐射实验 .....             | 171        |
| 实验 5-2       | 弗兰克-赫兹实验 .....           | 176        |
| 实验 5-3       | 冉绍尔-汤森效应实验 .....         | 182        |
| 实验 5-4       | 等离子体特性研究 .....           | 189        |
| 实验 5-5       | $\gamma$ 能谱测量 .....      | 197        |
| 实验 5-6       | 康普顿散射实验 .....            | 204        |
| 实验 5-7       | 动能与动量的相对论关系测量 .....      | 209        |
| <b>第 6 章</b> | <b>计算机模拟实验</b> .....     | <b>215</b> |
| 实验 6-1       | 甲烷分子振动光谱的 CPMD 模拟 .....  | 216        |
| 实验 6-2       | 电子双缝衍射的蒙特卡罗模拟 .....      | 220        |
| 实验 6-3       | 二维流体流动的格子玻耳兹曼模拟 .....    | 226        |
| <b>附 录</b>   | .....                    | <b>232</b> |
| 附录 1         | 中英文对照的常用物理量与单位 .....     | 232        |
| 附录 2         | 中英文对照的基本物理常数 .....       | 235        |
| 附录 3         | 中英文对照的名词术语 .....         | 237        |



# 第 1 章 光学测量技术实验

光学是一门历史悠久的古老科学,历史上对光的本性的相关现象做了大量的研究。光在传播过程中表现出来的干涉、衍射、偏振以及光与物质的相互作用等反映了光的波动性,光与物质交换能量的过程中表现出来的种种现象如黑体辐射、光电效应、拉曼散射、康普顿散射等反映了光的粒子性。人们发现了声光效应、磁光效应、电光效应、旋光效应等各种现象并且制造了各种实用的光学仪器;发明了各种干涉装置和衍射装置,如迈克尔逊干涉仪、法布里-珀罗干涉仪、光栅等用来进行光谱分析。自从 20 世纪 60 年代激光出现,光学学科进入现代光学阶段。现代光学以量子光学、激光理论与技术、非线性光学以及现代光学信息处理技术与光电子技术为标志,与信息科学技术、生命科学技术、纳米技术紧密相关,各种新的光学测量技术不断涌现。

在自然界中,发光物体发出的光都是含有多种波长的复色光。利用光学测量技术把这些复色光分解为单色光,并把这些单色光按照波长规律排列起来成为光谱,这种获得和分析光谱的实验方法称为光谱技术。研究原子、分子结构的常用方法就是研究由这些原子、分子构成的光源的光谱,或者让光通过某种物质检测各种出射光携带的原子、分子结构信息。光谱学最先起源于伟大的科学家牛顿(Sir I. Newton)于 1666 年研究的玻璃三棱镜对太阳光的色散。到 19 世纪初,德国物理学家夫琅禾费(J. V. Fraunhofer)发明了光栅,为光谱的精确测量建立了基础,他设计制造了分光镜,发现了太阳光谱中的吸收暗线,人们根据这些暗线先后确认在太阳大气中存在着钠、铁、镁、铜、锌、钡、镍等元素。1859 年德国化学家本生(R. W. Bunsen)和物理学家基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)合作改进了分光系统,并制成世界上第一台有完备结构的光栅,虽然结构简单,但已具有较高的分辨率和集光力,可观察火焰之类弱光谱光源,由此开辟出“光谱化学分析”这一新学科领域。从 19 世纪中叶起,氢原子光谱的观测和分析成为光谱分析的重要研究内容。1885 年巴耳末(J. J. Balmer)找到一个经验公式来说明已知的氢原子可见光范围内的光谱线,这个经验公式为玻尔(N. H. D. Bohr)提出原子能级模型和光的发射吸收理论提供了实验基础。此后,原子光谱的规律陆续被总结出来,在解释原子光谱规律的过程中于 20 世纪初建立了量子力学。在对碱金属原子光谱的研究过程中,发现了电子的自旋和自旋磁矩。

自 1960 年世界上第一台红宝石激光器问世以来,作为一种新型的光源,激光具有突出的方向性、单色性、相干性以及高亮度等特点。人们依据丰富的光谱资料,在短短的 10 年之间实现了上万种波长的激光输出,使光谱分析的极限探测灵敏度、光谱分辨率、时间分辨率、空间分辨率提高了几个数量级。激光光谱学差不多在 20 年的时间内使传统光谱学从深度和广度方面都得到了彻底改观,并且使光谱技术从仅对原子、分子进行结构研究

的物理和化学领域拓展到了环境、生物、材料、医学等领域。

光学测量技术实验的基本目的为:①学习和掌握光谱测量的基本实验技术以及光谱分析的基本方法;②了解激光器的原理和结构,学习激光输出特性的测量技术和分析方法;③学习用激光进行光谱分析和光速测量的实验方法与技术。

本章共包括6个实验项目,分别为氢原子光谱与里德伯常数的测定、介质的吸收光谱分析、超声光栅测量液体中的声速、脉冲固体激光器基本特性参数测量、He-Ne激光的模谱分析和激光法测量光速。其中激光法测量光速设计成了系列实验项目,分别为激光光拍频法测量光速和激光相位差法测量光速。

## 实验 1-1 氢原子光谱与里德伯常数的测定

光谱线系与原子结构之间存在内在的联系,光谱分析是研究原子结构的重要方法。氢原子结构最为简单,它发出的光谱有明显的规律,很早就被人们所注意。100余年来,人们对氢原子光谱结构的研究,不论是在实验方面还是在理论方面都取得了丰硕成果。1885年瑞士物理学家巴耳末通过总结前人对氢原子光谱的测量结果发现了氢原子光谱的规律,提出了著名的巴耳末公式。氢原子光谱规律的发现为玻尔理论的建立提供了坚实的基础。1913年玻尔通过引入量子化条件,提出了用来解释氢原子光谱的玻尔模型,这是原子物理学上的重大突破。1922年玻尔被授予诺贝尔物理学奖,以表彰他在研究原子结构,特别是研究从原子发出的辐射方面所做的贡献。但玻尔理论并不能解释所观测到的原子光谱的各种特征,而且对于氢原子光谱的进一步解释也遇到了困难,如巴耳末系中最强线为何由两条谱线组成。玻尔理论遇到的困难促进了原子物理学和量子力学的发展。20世纪初建立起来的量子力学圆满地解释了氢原子光谱线的分裂(电子不仅具有轨道角动量,而且具有自旋角动量,二者相互作用的结果使光谱线分裂)以及其他复杂原子光谱。1932年尤里(H. C. Urey)对重氢赖曼线系进行摄谱分析,发现了氢的同位素——氘。通过巴耳末公式求得的里德伯常数是物理学中少数几个精确的常数之一,已成为检验原子理论可靠性的标准和测量其他基本物理常数的依据。因此,氢原子光谱的研究在原子物理学和量子力学发展中起着重要作用。

### 【实验目的】

- (1) 测量可见光区氢原子光谱的波长,分析巴耳末系光谱线的规律性。
- (2) 测定氢原子的里德伯常数,了解近代物理学中的相关物理常数。
- (3) 掌握光栅光谱仪的分光原理和使用方法。
- (4) 学习测量物质发射光谱的实验方法与技术。

### 【预习要求】

- (1) 氢原子有哪五个相互独立的光谱线系?各满足什么规律?哪个线系位于可见

光区?

- (2) 氢原子的巴耳末系谱线有何特点? 如何分开各谱线?
- (3) 如何利用氢原子光谱线计算相应的里德伯常数?
- (4) 光栅分光的原理是什么? 如何测量光栅光谱?

**【实验原理】**

氢原子光谱(hydrogen spectral series)可由氢气放电管发光的光谱中获得,也可由某些星体发光的光谱中获得。人们最早对氢原子光谱的测量是在可见光区,1885年瑞士物理学家巴耳末对已观察到的14条氢原子光谱线进行了研究,发现它们的波长 $\lambda$ 具有一定的规律,并经验性地将可见光区的氢原子光谱线的波长归纳为下列关系:

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (1-1-1)$$

式中, $B = 364.56 \text{ nm}$ 。式(1-1-1)一般称为巴耳末公式(Balmer formula),相应的这些谱线称为巴耳末线系。

为了更清楚地表明谱线的分布规律,1889年瑞典物理学家里德伯(J. R. Rydberg)把式(1-1-1)改写为:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{B} \left( \frac{n^2 - 4}{n^2} \right) = \frac{4}{B} \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (1-1-2)$$

式中, $R_H = 4/B$ 称为里德伯常数(Rydberg constant)。式(1-1-2)一般称为里德伯公式(Rydberg formula)。

在这些从实验得到的经验公式基础上,丹麦物理学家玻尔就原子模型提出两条基本假设:①一个原子系统内当电子在特定轨道上绕核做圆周运动时,不向外辐射能量,这些轨道就是电子保持能量不变的定态轨道;②电子从一个定态轨道跃迁到另一个定态轨道时,会发生电磁辐射,其频率完全由这两个定态轨道间的能量差来决定。根据玻尔的假设并考虑原子核的影响,氢原子的定态轨道能量 $E_n$ 为:

$$E_n = - \frac{2\pi^2 \mu e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^2 n^2}$$

$$\mu = \frac{M_H m}{M_H + m}$$

式中, $\mu$ 为约化质量; $e$ 为电子电荷; $h$ 为普朗克常数; $\epsilon_0$ 为真空介电常数; $m$ 为电子质量; $M_H$ 为氢原子核的质量。

根据玻尔的假设,光谱线对应于氢原子中的电子从一个能级跃迁到另一个能级释放出的能量。巴耳末线系是氢原子从 $n > 2$ 的状态跃迁到终态为2的状态时发出的光谱线系,根据玻尔氢原子理论公式可推导出巴耳末线系满足的规律为:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 e^4 m}{(4\pi\epsilon_0)^2 c h^3} \left( 1 + \frac{m}{M_H} \right) \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-1-3)$$

式中, $c$ 为光速。

将式(1-1-3)和式(1-1-2)比较,可得里德伯常数为:

$$R_H = \frac{2\pi^2 e^4 m}{(4\pi\epsilon_0)^2 ch^3 \left(1 + \frac{m}{M_H}\right)} \quad (1-1-4)$$

巴耳末开创了探索原子光谱线系规律性的研究,后来人们发现氢原子光谱在红外区和紫外区也有很多条光谱线,构成很有规律的光谱线系。氢原子的各光谱线系分别以发现者的名字来标记,其名称及表示公式分别为:

$$\text{赖曼系(Lyman series)(紫外区)} \quad \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n=2,3,4,\dots \quad (1914 \text{ 年})$$

$$\text{巴耳末系(Balmer series)(可见光区)} \quad \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n=3,4,5,\dots \quad (1885 \text{ 年})$$

$$\text{帕邢系(Paschen series)(近红外区)} \quad \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n=4,5,6,\dots \quad (1908 \text{ 年})$$

$$\text{布喇开系(Brackett series)(红外区)} \quad \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n=5,6,7,\dots \quad (1922 \text{ 年})$$

$$\text{冯德系(Pfund series)(远红外区)} \quad \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n=6,7,8,\dots \quad (1924 \text{ 年})$$

$$\text{汉弗莱斯系(Humphreys series)(远红外区)} \quad \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n=7,8,9,\dots \quad (1953 \text{ 年})$$

综合氢原子光谱谱系的理论公式,可用下面的普遍表达式来表示:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n' < n$$

对原子光谱的进一步研究发现,其他原子的光谱也具有氢原子光谱的这种特点。任意原子 A 的里德伯常数可表示为:

$$R_A = \frac{2\pi^2 e^4 m}{(4\pi\epsilon_0)^2 ch^3 \left(1 + \frac{m}{M_A}\right)} \quad (1-1-5)$$

由式(1-1-5)可知,随着原子核质量  $M_A$  的不同,原子的里德伯常数也不同。当  $M_A \rightarrow \infty$  时,有  $\frac{m}{M_A} = 0$ ,这时里德伯常数为:

$$R_\infty = \frac{2\pi^2 e^4 m}{(4\pi\epsilon_0)^2 ch^3} \quad (1-1-6)$$

由式(1-1-4)、式(1-1-5)、式(1-1-6)可得  $R_\infty$  与任意原子(如氢原子)的里德伯常数有下列关系:

$$R_\infty = R_A \left(1 + \frac{m}{M_A}\right) = R_H \left(1 + \frac{m}{M_H}\right) \quad (1-1-7)$$

里德伯常数的测定可比一般基本物理常数达到更高的精度,因而成为一个测定基本物理常数的依据。目前公认值为:

$$R_H = (10\,967\,758.1 \pm 0.8) \text{ m}^{-1}$$

$$R_\infty = (10\,973\,731.8 \pm 0.8) \text{ m}^{-1}$$

本实验以可见光区的巴耳末系为研究对象,用光栅光谱法测量巴耳末系的谱线,总结巴耳末线系的规律性,通过实验获得里德伯常数并与理论值做比较。

### 【实验器材】

实验器材有氢灯、原子光谱测量仪、计算机等。原子光谱测量仪的基本结构如图1-1-1所示。

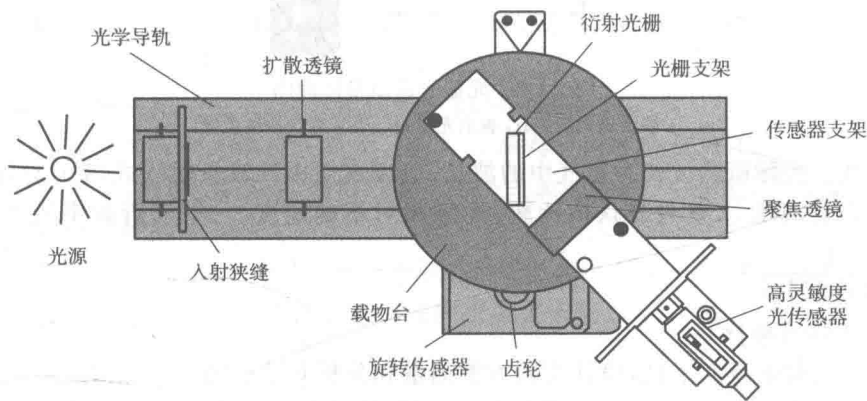


图 1-1-1 原子光谱测量仪

原子光谱测量仪中选用的光栅 (grating, diffraction grating) 为透射式光栅,光栅光谱 (grating spectrum) 测量原理如图 1-1-2 所示。光栅上相邻狭缝的间距  $d$  称为光栅常数 (grating constant)。光栅具有分光性能,其主要原理是光通过光栅发生衍射,沿相同衍射角  $\theta$  出射的光线经过透镜后会聚于屏幕一点发生光的干涉,因而在屏幕上会形成明暗相间的条纹,这就是光栅的衍射光谱 (diffraction spectrum)。产生明条纹的条件为:

$$d \sin \theta = k\lambda \quad (k \text{ 为干涉级数}) \quad (1-1-8)$$

实验中取  $k=1$ ,通过测量  $\theta$  和  $d$  的大小来求出波长  $\lambda$ 。

### 【实验内容】

#### 1. 基础性实验内容

(1) 按照图 1-1-1 安装各实验器材。

(2) 调节狭缝、扩散透镜、聚焦透镜和光栅位置,使中央条纹和第一级条纹清晰地呈现在光传感器前的光屏上,转动光屏上的狭缝正好与中央条纹平行。

(3) 将原子光谱测量仪与计算机相连,利用光谱测量程序测量不同颜色谱线的第一级衍射角  $\theta$ 。利用式(1-1-8)计算得到氢灯不同颜色谱线的波长,作  $\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{n^2}$  曲线,分析所测量的氢原子光谱的规律性。

(4) 多次精确测量其中一条谱线,所得  $\lambda$  值与其相应的  $n$  代入式(1-1-2),求出  $R_H$ ,并与公认值比较,计算相对不确定度。用式(1-1-4)计算  $R_H$ ,并与实验值比较,说明玻尔理

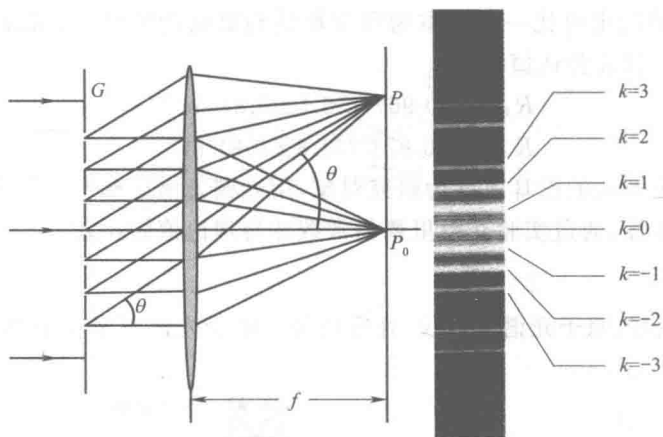


图 1-1-2 光栅光谱测量原理图

( $f$  表示透镜焦距;  $G$  表示光栅;  $P_0$  表示零级条纹位置)

论的正确性。实际所测波长为空气中的波长,应以真空中的波长代入式(1-1-2)计算  $R_H$ 。由式(1-1-7)计算  $R_\infty$ ,并与公认值比较,计算相对不确定度。(空气折射率为 1.000 29,

$$\frac{m}{M_H} = \frac{1}{1\ 836.151\ 5})$$

## 2. 设计性实验内容

基于本实验的现有条件,设计实验方案测量和分析汞原子的发射光谱。

实验要求为:阐述实验基本原理和方法,说明测量系统组成和基本实验步骤,进行实际实验测量,选择合理方法处理实验数据,分析与讨论实验结果。

### 【注意事项】

- (1) 氢灯的工作电压很高(约 4 kV),使用时要注意安全,勿触摸高压部分。
- (2) 调节狭缝时务必要轻轻用力,以免损坏。
- (3) 光栅对环境条件要求较高,应保持室内清洁和较低的湿度。

### 【思考与讨论】

- (1) 试由原子结构说明氢原子的谱线,分析各谱线对应的能级跃迁。
- (2) 画出氢原子巴耳末线系的能级图,并标出前四条谱线对应的能级跃迁和波长。
- (3) 结合巴耳末线系氢原子光谱的实验结果分析测量误差的来源。

### 【参考文献】

- [1] 陈宏芳.原子物理学.北京:科学出版社,2011.
- [2] 王彦吉,宋增福.光谱分析与色谱分析.北京:北京大学出版社,1995.
- [3] 高铁军,孟祥省,王书运.近代物理实验.北京:科学出版社,2009.
- [4] 戴乐山,戴道宣.近代物理实验.北京:高等教育出版社,2006.

## 实验 1-2 介质的吸收光谱分析

根据研究光谱方法的不同,光谱学常分为发射光谱学、吸收光谱学和散射光谱学。不同种类的光谱从不同方面提供了物质的微观结构信息,其中发射光谱(emission spectrum)提供发光物质的微观结构信息,吸收光谱(absorption spectrum)提供吸收物质的微观结构信息,散射光谱(scattered spectrum)则提供光与物质相互作用方面的微观结构信息。本实验研究的是吸收光谱。介质对光的吸收分为选择吸收和一般吸收。一种介质对某些波长的光会产生选择吸收,这些波长的光正好与介质的发射光谱相对应,与介质中原子、分子的能级结构有关;对其他波长范围的入射光则呈现一般吸收,这不但与介质的材料有关,而且与入射光的波长有关。研究介质对光的吸收规律不仅可以获得关于介质的信息,如成分、浓度、厚度等,还可以获得关于光源的信息。一切物质都具有一般吸收和选择吸收两种特性。

本实验通过测量透明介质透射光的光谱,研究介质对光的一般吸收,总结一般吸收满足的规律,分析一般吸收与介质的种类以及厚度的关系等。

### 【实验目的】

- (1) 学习测量介质吸收光谱的实验方法与技术。
- (2) 掌握测量介质一般吸收特性的原理和方法。
- (3) 测量介质的吸收曲线,并分析介质的一般吸收特性。

### 【预习要求】

- (1) 介质吸收满足的规律是什么?
- (2) 如何测量介质的吸收曲线?对光源有何要求?
- (3) 从介质的吸收曲线上能得到介质哪些方面的性质?

### 【实验原理】

当一束光穿过有一定厚度的透明介质平板时,有一部分光被反射,另有一部分光被介质吸收,剩下的光从介质透射出来。如图 1-2-1 所示,

当一束波长为  $\lambda$ 、入射光强为  $I_0$  的单色平行光垂直入射到一块厚度为  $d$  的透明介质平板上时,从入射界面反射的光强为  $I_R$ ,从入射界面向介质透射的光强为  $I_1$ ,在出射界面处的入射光强为  $I_2$ ,从出射界面射出的透射光的光强为  $I_T$ 。依据比尔-朗伯定律(Beer-

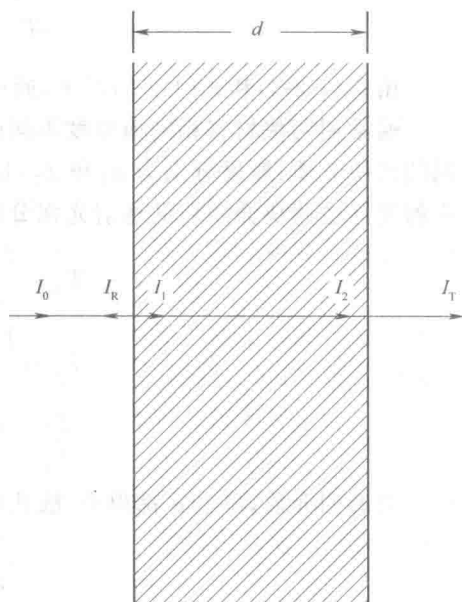


图 1-2-1 光的吸收

Lambert law),  $I_2$  与  $I_1$  的关系为:

$$I_2 = I_1 e^{-\alpha d} \tag{1-2-1}$$

式中,  $\alpha$  称为介质的吸收系数(attenuation coefficient), 它是衡量光被介质吸收程度的物理量。吸收系数不仅与介质的材料有关, 而且与入射光的波长有关。吸收系数  $\alpha$  与波长  $\lambda$  的关系曲线称为吸收曲线。

以上提到的  $I_1, I_2, I_R$  和  $I_T$  是指光在入射界面和出射界面上, 以及在介质中多次反射和透射的总效果。若介质表面的反射系数为  $R$ , 则透过样品的光强为:

$$\begin{aligned} I_T &= I_{T1} + I_{T2} + I_{T3} + I_{T4} + \dots \\ &= I_0(1-R)^2 e^{-\alpha d} + I_0(1-R)^2 R^2 e^{-3\alpha d} + I_0(1-R)^2 R^4 e^{-5\alpha d} + \dots \\ &= \frac{I_0(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}} \end{aligned} \tag{1-2-2}$$

式中,  $I_{T1}, I_{T2}, I_{T3}, \dots$  分别表示从出射界面第一次透射、第二次透射、第三次透射……的光的光强, 故有:

$$\frac{I_T}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}} \tag{1-2-3}$$

介质的光谱透射率(spectral directional transmittance)  $T$  定义为:

$$T = \frac{I_2}{I_1} \tag{1-2-4}$$

根据式(1-2-1), 对于透明介质, 光反射较小, 因而有:

$$T = e^{-\alpha d} = \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{I_T}{I_0} \tag{1-2-5}$$

由式(1-2-3)和式(1-2-5)可见, 通过测量光谱透射率  $T$  就可得到介质的吸收系数  $\alpha$ 。

通常用两块材料相同但厚度不同的介质来测量吸收系数  $\alpha$ 。设有材料相同但厚度不同的两块介质, 厚度分别为  $d_1$  和  $d_2$ , 且  $d_2 > d_1$ , 光谱透射率分别为  $T_1$  和  $T_2$ , 光强为  $I_0$  的入射光通过两块介质后的透射光强分别为  $I_{Td_1}$  和  $I_{Td_2}$ , 则有:

$$T_1 = \frac{I_{Td_1}}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d_1}}{1-R^2 e^{-2\alpha d_1}} \tag{1-2-6}$$

$$T_2 = \frac{I_{Td_2}}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d_2}}{1-R^2 e^{-2\alpha d_2}} \tag{1-2-7}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{e^{-\alpha d_2} (1-R^2 e^{-2\alpha d_1})}{e^{-\alpha d_1} (1-R^2 e^{-2\alpha d_2})} \tag{1-2-8}$$

对透明介质,  $R$  和  $\alpha$  都很小, 故式(1-2-8)可近似为:

$$\frac{T_2}{T_1} = e^{-\alpha(d_2-d_1)} \tag{1-2-9}$$

则有:

$$\alpha = \frac{\ln T_1 - \ln T_2}{d_2 - d_1} \tag{1-2-10}$$

本实验利用光栅光谱仪测量不同厚度锗铋玻璃的光谱透射率来获得锗铋玻璃的吸收系数。



### 【实验器材】

实验器材包括 WGD-8A 型组合式光栅光谱仪、汞灯及汞灯电源、溴钨灯及溴钨灯电源、厚度不同的锲钹玻璃片。

本实验所用的 WGD-8A 型组合式光栅光谱仪由光栅单色仪、接收单元、扫描系统、电子放大器、A/D 采集单元、计算机等组成,如图 1-2-2 所示。该设备集光学、精密机械、电子学及计算机技术于一体,可实现对光源的光谱能量分布及介质的光谱透射率的自动测量。

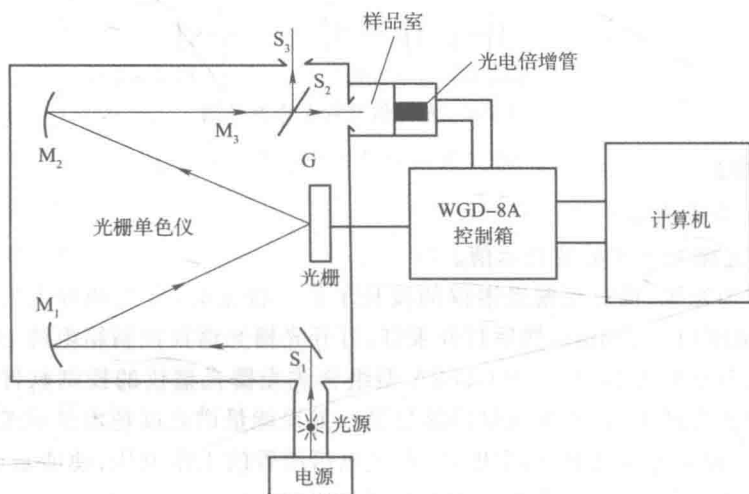


图 1-2-2 WGD-8A 型组合式光栅光谱仪示意图

#### 1. 光栅单色仪

光栅单色仪由三部分组成:入射狭缝  $S_1$ 、平面反射镜和准直球面反射镜  $M_1$  构成入射准直系统,以产生平行光束;反射光栅  $G$  (2 400 条/mm) 构成色散系统,以产生各种波长的单色光;聚焦球面反射镜  $M_2$ 、平面反射镜  $M_3$ 、出射狭缝  $S_2$  及  $S_3$  构成聚光系统,将光栅分出的单色光会聚在出射狭缝  $S_3$  上,或者移开平面反射镜  $M_3$ ,使光束会聚在出射狭缝  $S_2$  上,平面反射镜  $M_3$  的移动由拉杆控制,其安装在出射狭缝  $S_3$  下方。

光栅  $G$  由扫描系统控制的电机带动旋转,从而使不同波长的单色光相继投射到聚焦平面反射镜  $M_2$  及出射狭缝  $S_2$  或  $S_3$  上。出射狭缝  $S_3$  外接 CCD 探测器,出射狭缝  $S_2$  外接光电倍增管,它们获得的光谱信号经控制箱传送给计算机,由计算机处理和显示。

#### 2. 光电倍增管

光电倍增管是一种高灵敏度真空光电器件,可用作弱光探测器,具有把弱光增强的作用,其输出电流  $i$  与入射到光电倍增管上的光强成正比。这样,入射到光栅光谱仪的光强大小就可转换为光电倍增管的光电流大小来测量。

如图 1-2-3 所示,在光电倍增管的真空玻璃泡中,光电阴极  $K$  (接受光子,产生光电子) 和阳极  $A$  之间安装着一系列的倍增极  $D_1, D_2, \dots, D_n$ 。倍增极表面涂有铯酸铯、氧化镁或氧化铍薄膜,当一个光电子打上后,一般会发射出几倍数的光电子,这种效应称为二次发射效应。因此,经过倍增极  $D_1, D_2, \dots, D_n$  后,最终将产生大量的光电子,由阳极收集,形成并输出信号。倍增极一般有 8~13 个,倍增系数可达  $10^8 \sim 10^9$ 。