

# 光场中的原子分子 及激光技术

Atoms and Molecules in  
Optical Field and Laser Technology

〔美〕汪正民(Zheng-Min Wang) 著



科学出版社

## 内 容 简 介

本书系统论述了原子多光子电离的相关理论基础和研究方法,详细讨论了用光电子成像装置测量光电子角分布来研究原子光电离的特征,重点讲述了如何在实验上获得电子云影像并由此确定原子光离化参数以及研究奇偶宇称跃迁过程的量子干涉。本书还以相当的篇幅介绍了原子激光光谱和分子红外多光子离解研究的某些专题,详细讨论了无多普勒展宽高分辨激光光谱学的基本原理与研究方法。光学与激光技术方面的内容包括激光测距、风洞流场全息干涉测量以及法布里-珀罗干涉仪(标准具)在光波长与光谱线宽测量、激光纵模选择等方面的原理及应用。最后一章介绍在光学层析成像领域的最新研究成果,并详细阐述了基于激光二维扫描系统和 CCD 照相机的非接触光学层析成像实验装置及其在光学漫射层析成像和光学荧光层析成像中的应用。

本书读者范围包括从事原子分子物理、激光光学、光物理、光化学和光学层析成像研究的广大科技工作者,以及相关专业的大学教师、研究生与大学生。

### 图书在版编目(CIP)数据

光场中的原子分子及激光技术=Atoms and Molecules in Optical Field and Laser Technology/(美)汪正民著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033890-7

I. ①光… II. ①汪… III. ①光电子技术-研究 ②激光技术-研究  
IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 051869 号

责任编辑: 刘凤娟 / 责任校对: 张凤琴  
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计

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>

陈海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 4 月第一次印刷 印张: 21 3/4 插页: 2

字数: 421 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 序

## Preface

原子和分子结构及其动力学特性的研究是物理学最基础的一项研究工作。真正完全了解原子分子的结构和物理性质,需要知道和了解包括精细结构的能谱的全谱。实现全谱研究的最重要的方法是激光和原子分子系统的相互作用。具体从实验上研究,又包括时间分辨光电离光谱研究和偏振相关光谱的研究。而这些研究是极富挑战性的。理论研究已经表明,若同时决定多个物理学参数,就必须借助于由 Seaton 和 Jungen 等建立和发展起来的多通道量子亏损理论 (MQDT)。Tsubouchi 和 Suzuki 提出发展联合多个波长的光电离测量技术,并提出了时间分辨光电子成像的设想。然而,更深入的理论研究需要实验工作的支持。汪正民与埃里奥特 (D.S.Elliott) 用椭圆偏振光与原子相互作用第一次完整地确定了原子光离化参数的理论和实验方法。他们还用独特的方法通过量子干涉得到了电子云的图像,由此可以测量原子不同宇称跃迁的光电离参数。实验上清楚地显示了由量子干涉决定的角分布 (AD),这是实验上获得物质波干涉的一个典型事例。这是一个标志,因为在以前发展的各种测量技术都不能在一次实验中得到原子光电离过程的全部特征。他们的实验极大地支持了理论研究的发展,被称为是“very elegant experiment”。汪正民进一步发展这一研究成果,从相位测量发展到利用光场相位操控原子波函数。

我在 2001 年冬中国科学院的《科学新闻》上见到了汪正民博士取得的这项研究成果的报道,在他的《光场中的原子分子及激光技术》一书出版之际,我很乐意为之作序。

创新的实验工作是很不容易的。正是由于汪正民博士对理论的深刻理解、擅于创新思维和实验技术,才能以这样出色的量子干涉测量技术对这一领域的发展做出贡献。

这是一本系统研究激光与原子相互作用、原子多光子电离研究的专著。就是说,包括了支持作者创新实验研究的相关理论基础、基本概念、传统的实验方法,然后重点讨论了不同偏振态激光作用下铷原子多光子电离特征。作者开创性地用椭圆偏振光完整地确定原子光离化参数的理论与方法,我愿意引用这一领域的同行对这项成果的评价来介绍他们的工作。例如,“汪 (正民) 和埃里奥特用非常精巧的实验完成了椭圆偏振光双光子离化测量”,“发展了一个完整确定原子参数,颇为有趣有前途的新方法”,“提出了研究原子多光子离化细节的新途径”等。

该书不但系统、精炼,还包括有趣的实验细节和技巧。例如,如何利用光的偏

振态操控原子波函数, 如何用光电子成像装置获得不同花样的电子云图像等. 该书适合大学生、研究生和研究人员以及关心这一领域研究工作的人员阅读, 因此是大专院校、研究机构、图书馆和科技情报研究工作有益科学技术类藏书.

刘欣豪

中国科学院院士

美国光学学会院士

2010 年 11 月 10 日

# 前 言

## Foreword

随着原子分子物理学研究的深入,通过激光多光子电离过程研究激发态的结构和特征已成为人们进一步认识原子和分子的一个有力的研究手段.本书就是以这方面的内容为主线,结合作者多年来在原子分子光物理和激光技术应用领域所做的研究工作扩充延伸而写成的.

全书共分成六章.第1、2章介绍原子多光子电离与离化参数的确定,详细讲述了光电子角分布的有关理论与实验,包括任意偏振态激光双光子电离的光电子角分布理论,用一种独特的光电子成像装置收集光离化过程中向全空间发射的光电子,并通过所记录的电子云影像获得原子参数,以及在双色激光场中铷原子两个电离通道间的量子干涉与奇偶宇称波函数相位差的确定.这两章内容不仅对专业人员开展相关的研究课题有着重要参考意义,而且可以帮助刚踏入物理学研究大门的青年科学工作者、研究生和大学生更深入地理解量子物理中某些基本概念.在仔细阅读完这些章节并理解了书中展示的由不同偏振态激光激发而产生的各种电子云影像形成过程之后,相信读者犹如被带进了微观世界并看到了量子力学所描绘的原子体系的美妙画面,就会自然地理解了波函数、电子云、物质波干涉这些基本而又十分重要的物理概念的真正含义.从这个角度来说,本书又是一本很好的量子物理教学参考书.

在光与原子分子相互作用领域,本书还包括了利用原子高分辨激光光谱研究高熔点稀土金属的超精细结构及监测气相金属等方面内容,详细阐述了无多普勒展宽高分辨激光光谱学的基本原理与研究方法,还以相当的篇幅讨论了分子红外多光子离解过程中的非线性离解特性、振动能量转移、激发态自由基的形成以及激光分离同位素等专题.关于这些内容的基本论述、实验方法和研究结果在第3、4两章予以介绍.

第5章介绍脉冲激光测距及激光全息术在风洞流场全息干涉计量等两个应用方面的专题.同时还详细讨论了在光学与激光技术中有着广泛应用的法布里-珀罗干涉仪(标准具)的基本工作原理及其在光波长与光谱线宽测量、激光纵模选择等方面的应用.所涉及的某些内容和概念可作为一般光学专著或光学教科书中关于法布里-珀罗干涉仪有关内容的补充.本章最后还以相当的篇幅讨论了应用于连续激光器主动锁模的拉曼-奈斯驻波声光调制器的最佳使用条件、匹配网络优化设计及等效阻抗等问题.因其性能好坏将直接影响到超短光脉冲的输出参数.需要指出

的是, 虽然所讨论的问题是针对于氩离子激光器锁模实验用调制器的, 但所讨论的内容与实验方法具有普遍意义.

最后一章向读者介绍非接触光学层析成像 (OT). 光学层析成像是继 X 射线层析成像 (CT) 和核磁共振成像 (MRI) 之后又一重要的医学诊断方法. 目前仍然处于研究发展阶段. 漫射光学层析成像传统的实验方法是采用与仿体 (模拟组织体) 相接触的多条光纤来传输和接收光波信号. 本书介绍一种基于激光二维扫描系统和 CCD 照相机的非接触光学层析成像装置, 详细讲述了该系统的结构设计、工作原理、性能测试, 以及在光学漫射层析成像和光学荧光层析成像中的应用. 至于图像重建的数学方法则不属于本书讨论的范围, 读者可参阅所列有关文献.

鉴于本书所涉及的内容较为广泛, 为了帮助读者便于阅读和理解所论述的各个专题并获得系统的知识, 某些章节还增加了学科发展的历史背景或必要的基础预备知识, 并使用了较多的插图来说明物理概念. 全书不少章节对实验细节和技巧也作了详细描述. 附录中几个表达式的推导和补充说明有助于读者理解相应章节的有关内容并具有独立的参考价值. 当然, 作为涉及几个不同内容的单独一本书, 由于篇幅限制, 不可能对每一个专题都作详尽阐述. 有些论题只给出了研究方法和结果. 在阅读这些内容时, 感兴趣的读者可以以此为起点进一步深入学习并扩展自己的视野.

本书某些章节, 如第 1、2、6 章是基于发表在 *Physical Review Letters* (《物理评论快报》) 和 *Optics Letters* (《光学快报》) 等重要英文学术刊物上的论文为基础, 扩展延伸写出的. 由于作者所有材料、文章、手稿、实验记录等都是英文, 所以这些章节依然保持英文文体. 各章开头增加了中文和英文提要以便国内和国际读者快速了解全章的内容.

全书包含了作者多年来在这些领域的研究成果. 需要在此说明的是, 其中大多数研究课题是由多人共同完成的. 这些成果的获得归功于所有共同参与研究的同事密切而卓有成效的合作, 其中特别要提出的几位是 (按照时间先后): 杨立书、岳古明、Martin C. Edelson、Robert J. Lipert、Daniel S. Elliott、John C. Schotland 和 George Y. Panasyuk 等.

刘颂豪院士对本书的出版给予了很大的鼓励与支持, 作者在此表示衷心的感谢.

汪正民

于美国费城 宾夕法尼亚大学

2011 年 5 月

# 目 录

## Contents

### 序

### Preface

### 前言

### Introduction

## 第 1 章 原子多光子电离

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Multiphoton Ionization of Atoms .....                                                         | 1  |
| 1.1 引言                                                                                        |    |
| Introduction .....                                                                            | 2  |
| 1.2 原子多光子电离与光电子角分布                                                                            |    |
| Multiphoton ionization of atoms and photoelectron angular<br>distributions .....              | 3  |
| 1.2.1 历史回顾                                                                                    |    |
| Historical overview .....                                                                     | 4  |
| 1.2.2 多光子电离的基本概念                                                                              |    |
| Basic concept of multiphoton ionization of atoms .....                                        | 6  |
| 1.2.3 铷原子的光电离通道                                                                               |    |
| Ionization channels of rubidium .....                                                         | 8  |
| 1.2.4 线偏振光双光子电离与光电子角分布的传统测量                                                                   |    |
| Two-photon ionization by linearly-polarized light and traditional<br>measurement of PAD ..... | 10 |
| 1.2.5 原子参数对光电子角分布的影响                                                                          |    |
| The influence of the atomic parameters on the angular distributions ..                        | 17 |
| 1.2.6 任意偏振光双光子电离光电子角分布理论                                                                      |    |
| Theory of PAD in two-photon ionization with arbitrarily-polarized<br>light .....              | 20 |
| 1.3 光电子成像实验                                                                                   |    |
| Photoelectron imaging experiments .....                                                       | 27 |
| 1.3.1 光学系统                                                                                    |    |
| Optical system .....                                                                          | 28 |

|       |                                                                                    |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.3.2 | 光电子成像系统                                                                            |    |
|       | Photoelectron imaging system .....                                                 | 30 |
| 1.3.3 | 真空系统与原子束的产生                                                                        |    |
|       | The vacuum system and generation of atomic beam .....                              | 34 |
| 1.3.4 | 地球磁场的影响及消除                                                                         |    |
|       | The influence of the earth's magnetic field and its cancellation .....             | 37 |
| 1.4   | 铷原子双光子电离的完全测量                                                                      |    |
|       | Complete measurements of two-photon ionization in atomic rubidium ..               | 39 |
| 1.4.1 | 历史背景                                                                               |    |
|       | Historical background .....                                                        | 39 |
| 1.4.2 | 数据采集及光电子角分布 (电子云) 影像的形成                                                            |    |
|       | Data acquisition and the formation of PAD images .....                             | 41 |
| 1.4.3 | 原子光电离参数的确定                                                                         |    |
|       | Determination of atomic parameters .....                                           | 54 |
| 1.5   | 本章小结                                                                               |    |
|       | Conclusions .....                                                                  | 73 |
|       | 参考文献                                                                               |    |
|       | References .....                                                                   | 74 |
| 第 2 章 | 双通道光电离及量子干涉测量                                                                      |    |
|       | Quantum Interference Measurements between Two Photo-<br>ionization Processes ..... | 77 |
| 2.1   | 量子干涉的基本概念及历史回顾                                                                     |    |
|       | Basic concept of quantum interference and historical overview .....                | 78 |
| 2.2   | 光电子角分布的相位控制                                                                        |    |
|       | Phase control over the angular distribution of photoelectrons .....                | 82 |
| 2.3   | 实验方法                                                                               |    |
|       | Experiment .....                                                                   | 86 |
| 2.3.1 | 双色激光场实验装置及调整                                                                       |    |
|       | Experimental set-up and adjustment of two color laser field .....                  | 87 |
| 2.3.2 | 相位延迟盒                                                                              |    |
|       | The phase delay cell .....                                                         | 88 |
| 2.3.3 | 紫外与可见光相位差的测量                                                                       |    |
|       | Measurement of the phase difference between the UV and visible<br>fields .....     | 89 |
| 2.3.4 | 实验条件与实验程序                                                                          |    |



|                                                                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Conditions and procedure of experiments .....                                                                                       | 94         |
| 2.3.5 紫外与可见光束相干匹配条件                                                                                                                 |            |
| The interference matching conditions of UV and visible beams .....                                                                  | 95         |
| 2.4 量子干涉测量与奇偶宇称连续波相位差的测定                                                                                                            |            |
| Determination of the phase difference between even and odd continuum wave functions through quantum interference measurements ..... | 99         |
| 2.4.1 铷原子在相互垂直偏振的双色激光场光电离过程中光电子角分布                                                                                                  |            |
| PAD by ionizing the rubidium atoms with perpendicularly-polarized two-color laser field .....                                       | 99         |
| 2.4.2 单光子跃迁矩之比 $R_{1/2}/R_{3/2}$ 的测定                                                                                                |            |
| Determination of the ratio of one-photon transition moments $R_{1/2}/R_{3/2}$ .....                                                 | 103        |
| 2.4.3 p 波和 d 波相位差的测定                                                                                                                |            |
| Determination of phase difference between p- and d-continuum waves .....                                                            | 103        |
| 2.4.4 铷原子在相互平行偏振的双色激光场光电离过程中光电子角分布                                                                                                  |            |
| PAD by ionizing the rubidium atoms with parallel-polarized two-color laser field .....                                              | 105        |
| 2.5 本章小结                                                                                                                            |            |
| Conclusions .....                                                                                                                   | 110        |
| 参考文献                                                                                                                                |            |
| References .....                                                                                                                    | 111        |
| <b>第 3 章 激光光谱学的几个专题</b>                                                                                                             |            |
| <b>Selected Topics on Laser Spectroscopy .....</b>                                                                                  | <b>112</b> |
| 3.1 用于激光光谱研究的一种高温炉                                                                                                                  |            |
| A high temperature oven for laser spectroscopy .....                                                                                | 112        |
| 3.1.1 引言                                                                                                                            |            |
| Introduction .....                                                                                                                  | 113        |
| 3.1.2 实验方法                                                                                                                          |            |
| Experiment .....                                                                                                                    | 113        |
| 3.1.3 铥的超精细分裂研究                                                                                                                     |            |
| Study of hyperfine splitting of Tm .....                                                                                            | 118        |
| 3.2 高分辨激光光谱在监测汽相金属中的应用                                                                                                              |            |
| Application of high-resolution laser spectroscopy to the monitoring of vapor-phase metals .....                                     | 122        |

|       |                                                                              |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.1 | 引言                                                                           |     |
|       | Introduction                                                                 | 122 |
| 3.2.2 | 原子束装置                                                                        |     |
|       | Atomic beam apparatus                                                        | 123 |
| 3.2.3 | 原子的荧光激发谱                                                                     |     |
|       | Fluorescence excitation spectra of atoms                                     | 126 |
| 3.2.4 | 激光原子吸收光谱                                                                     |     |
|       | Laser atomic absorption spectroscopy                                         | 128 |
| 3.2.5 | 钐、钕、铥、钇的饱和吸收光谱                                                               |     |
|       | Saturation spectroscopy of Sm, Tm, Gd and Y                                  | 132 |
| 3.3   | 分子的红外多光子光热吸收测量                                                               |     |
|       | The optothermal measurement of infrared multiphoton absorption of molecules  | 141 |
| 3.3.1 | 实验方法                                                                         |     |
|       | Experiment                                                                   | 142 |
| 3.3.2 | $\text{CF}_3\text{CDCF}_2$ 分子多光子吸收峰的分裂与红移                                    |     |
|       | Splitting and red shift of absorption spectrum of $\text{CF}_3\text{CDCF}_2$ | 144 |
| 3.4   | 紫外共振拉曼光谱                                                                     |     |
|       | Ultraviolet resonance Raman spectroscopy                                     | 146 |
| 3.4.1 | 基本概念及历史背景                                                                    |     |
|       | Basic concept and historical background                                      | 146 |
| 3.4.2 | 在 217~400nm 区间连续可调紫外共振拉曼光谱仪                                                  |     |
|       | A tunable UV resonance Raman spectrometer for 217~400nm spectral region      | 147 |
| 3.4.3 | 几种溶液的共振拉曼谱                                                                   |     |
|       | Raman spectra of different type of solutions                                 | 151 |
| 3.5   | 无多普勒展宽高分辨激光光谱                                                                |     |
|       | Doppler-free high resolution laser spectroscopy                              | 152 |
| 3.5.1 | 光谱线的自然宽度                                                                     |     |
|       | Natural linewidth of spectral lines                                          | 153 |
| 3.5.2 | 光谱线的多普勒展宽                                                                    |     |
|       | Doppler broadening of spectral lines                                         | 154 |
| 3.5.3 | 饱和吸收光谱                                                                       |     |
|       | Saturation spectroscopy                                                      | 161 |
| 3.5.4 | 偏振光谱                                                                         |     |

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Polarization spectroscopy .....                                           | 162 |
| 3.5.5 双光子吸收光谱                                                             |     |
| Two-photon absorption spectroscopy .....                                  | 167 |
| 参考文献                                                                      |     |
| References .....                                                          | 171 |
| 第 4 章 分子的红外多光子离解                                                          |     |
| Infrared Multiphoton Dissociation of Molecules .....                      | 174 |
| 4.1 电子激发态 $C_2$ 自由基                                                       |     |
| Electronically excited $C_2$ radicals .....                               | 175 |
| 4.1.1 电子激发态 $C_2$ 自由基的形成                                                  |     |
| Formation of electronically excited $C_2$ radicals .....                  | 175 |
| 4.1.2 $C_2^*d^3\Pi_g$ 态的形成机制                                              |     |
| Mechanism of formation of $C_2^*d^3\Pi_g$ state .....                     | 177 |
| 4.2 多光子离解过程中分子内的 V-V 能量转移                                                 |     |
| V-V energy transfer in multiphoton dissociation process .....             | 179 |
| 4.2.1 氟里昂 113 分子内的 V-V 能量转移                                               |     |
| V-V energy transfer of Freon 113 molecules .....                          | 179 |
| 4.2.2 氟里昂 123 分子内的 V-V 能量转移                                               |     |
| V-V energy transfer of Freon 123 molecules .....                          | 185 |
| 4.3 激光化学合成 $Cl_4$ 晶体                                                      |     |
| Chemical synthesis of crystal grain $Cl_4$ .....                          | 190 |
| 4.4 在强红外激光场中分子的非统计离解行为                                                    |     |
| Nonstatistical dissociation behavior of molecules in intense IR field ... | 192 |
| 4.4.1 实验方法                                                                |     |
| Experiment .....                                                          | 192 |
| 4.4.2 产物的质谱分析                                                             |     |
| Mass spectra of photoproducts .....                                       | 193 |
| 4.5 激光分离 $^{13}C$ 同位素                                                     |     |
| Laser isotope separation of $^{13}C$ .....                                | 194 |
| 4.5.1 实验方法                                                                |     |
| Experiment .....                                                          | 195 |
| 4.5.2 $^{13}C$ 同位素浓缩系数和产率                                                 |     |
| Enrichment factor and yield of $^{13}C$ .....                             | 195 |
| 参考文献                                                                      |     |
| References .....                                                          | 197 |

## 第 5 章 光学与激光技术

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| Optics and Laser Technology .....                         | 199 |
| 5.1 脉冲激光测距仪                                               |     |
| Pulsed laser rangefinder .....                            | 199 |
| 5.1.1 脉冲激光测距原理                                            |     |
| Principle of pulsed laser rangefinder .....               | 200 |
| 5.1.2 激光无标尺地形仪                                            |     |
| Laser rangefinder theodolite .....                        | 202 |
| 5.1.3 光学系统                                                |     |
| Optical system .....                                      | 205 |
| 5.1.4 三光轴调整                                               |     |
| Adjustment of optical axis .....                          | 207 |
| 5.1.5 测距精度分析                                              |     |
| Accuracy analysis of distance measurement .....           | 208 |
| 5.2 脉冲激光全息术                                               |     |
| Pulsed laser holography .....                             | 213 |
| 5.2.1 全息摄影的基本原理                                           |     |
| Basic principle of holography .....                       | 213 |
| 5.2.2 全息干涉计量术                                             |     |
| Holographic interferometry .....                          | 216 |
| 5.2.3 风洞流场全息干涉测量                                          |     |
| Interferometry of flow fields in wind tunnel .....        | 218 |
| 5.2.4 流场的有限条纹与无限条纹干涉图                                     |     |
| Finite and infinite interferogram of the flow field ..... | 223 |
| 5.3 法布里-珀罗干涉仪                                             |     |
| The Fabry-Perot interferometer .....                      | 225 |
| 5.3.1 干涉环的形成与自由光谱区                                        |     |
| Fringes and free spectrum range .....                     | 225 |
| 5.3.2 艾里函数与条纹精细度                                          |     |
| Airy function and finesse .....                           | 227 |
| 5.3.3 干涉仪平板间距的确定                                          |     |
| Determination of plate separation .....                   | 229 |
| 5.3.4 光波长及光谱线宽测量                                          |     |
| Measurements of wavelength and line width .....           | 234 |
| 5.3.5 双标准具选模                                              |     |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Mode selection with double etalon .....                                                                                                 | 239 |
| 5.4 拉曼-奈斯驻波声光调制器                                                                                                                        |     |
| Standing wave Raman-Nath acousto-optic modulator .....                                                                                  | 243 |
| 5.4.1 零级光束调制度的计算与测量                                                                                                                     |     |
| Calculation and measurement of zero-order modulation degree .....                                                                       | 244 |
| 5.4.2 匹配网络的优化                                                                                                                           |     |
| Optimization of matching network .....                                                                                                  | 248 |
| 5.4.3 等效阻抗的分析                                                                                                                           |     |
| Analysis of equivalent impedance .....                                                                                                  | 252 |
| 5.5 光场偏振态的描述及操控                                                                                                                         |     |
| Polarization of optical field and its control .....                                                                                     | 256 |
| 5.5.1 偏振态的描述                                                                                                                            |     |
| Description of the state of polarization .....                                                                                          | 256 |
| 5.5.2 波片与菲涅耳棱镜                                                                                                                          |     |
| Wave plate and Fresnel's rhomb .....                                                                                                    | 260 |
| 5.5.3 偏振态的控制                                                                                                                            |     |
| Control of the state of polarization .....                                                                                              | 263 |
| 参考文献                                                                                                                                    |     |
| References .....                                                                                                                        | 264 |
| 第 6 章 非接触光学层析成像                                                                                                                         |     |
| Non-contact Optical Tomography .....                                                                                                    | 266 |
| 6.1 实验装置及其应用                                                                                                                            |     |
| Experimental apparatus and its applications .....                                                                                       | 267 |
| 6.1.1 系统设计                                                                                                                              |     |
| System design .....                                                                                                                     | 268 |
| 6.1.2 系统性能评估                                                                                                                            |     |
| System performance evaluation .....                                                                                                     | 272 |
| 6.1.3 光学漫射层析成像                                                                                                                          |     |
| Optical diffuse tomography .....                                                                                                        | 281 |
| 6.1.4 光学荧光层析成像                                                                                                                          |     |
| Fluorescent optical tomography .....                                                                                                    | 285 |
| 6.2 大数据组光学漫射层析成像影像重构方法的实验验证                                                                                                             |     |
| Experimental demonstration of an analytic method for image<br>reconstruction in optical diffusion tomography with large data sets ..... | 288 |
| 6.3 大数据组荧光光学层析成像                                                                                                                        |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fluorescent optical tomography with large data sets .....                                                                                                                                                                                                                                                                        | 294 |
| 参考文献                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
| References .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 300 |
| 附录                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
| Appendix .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 301 |
| A 通过偏振器产生的椭圆偏振光强度表达式<br>$P_t = P_0( \varepsilon_1 ^2 \sin^2 \vartheta' +  \varepsilon_3 ^2 \cos^2 \vartheta')$ 的推导<br>Derivation of the expression for the intensity of elliptically-polarized<br>light passing through a polarizer $P_t = P_0( \varepsilon_1 ^2 \sin^2 \vartheta' +  \varepsilon_3 ^2 \cos^2 \vartheta')$ ..... | 301 |
| B 椭圆偏振光椭率参数 $ \varepsilon_1 $ 和 $ \varepsilon_3 $ 的确定<br>Determination of the polarization parameters $ \varepsilon_1 $ and $ \varepsilon_3 $ of ellipticity<br>for elliptically-polarized light .....                                                                                                                           | 304 |
| C s-, p- 和 d- 分波间库仑相位差的推导<br>Derivation of Coulomb phase differences between s-, p- and<br>d- partial waves .....                                                                                                                                                                                                                | 309 |
| D 量子亏损相位差的推导<br>Derivation of quantum defect phase differences .....                                                                                                                                                                                                                                                             | 312 |
| E CO <sub>2</sub> 激光分子能级图与输出光谱线<br>Energy level diagram of low-lying states of CO <sub>2</sub> and laser<br>wavelength .....                                                                                                                                                                                                     | 314 |
| F 拉曼-奈斯声光调制器 $M_0$ - $\eta_0$ 理论曲线的绘制说明<br>Explanation of $M_0$ - $\eta_0$ curve drawing of Raman-Nath acousto-optic<br>modulator .....                                                                                                                                                                                          | 320 |
| G AJG75-1 型激光无标尺地形仪测图报告及其在黄山索道工程中的应用<br>Scale map surveying report on AJG75-1 laser rangefinder theodolite<br>and its application .....                                                                                                                                                                                          | 322 |
| 主要名词术语英汉对照表                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
| English and Chinese glossary .....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 327 |

# 第 1 章 原子多光子电离<sup>①</sup>

## Multiphoton Ionization of Atoms

### 中英文内容提要

本章将介绍原子多光子电离, 主要讨论不同偏振态激光与铷原子相互作用, 通过测量光电子角分布来研究多光子电离过程. 研究发现使用椭圆偏振光可以完全确定双光子电离过程中, 包括激发到连续态的各离化通道的相对离化截面以及 s 和 d 分波波函数的相对相位等原子动力学参数. 我们首先从原子多光子电离的基本概念出发进而讨论使用线偏振光测量光电子角分布的传统方法. 然后给出在任意偏振光作用下双光子电离的光电子角分布理论推导, 并指出使用椭圆偏振光的优越性. 接着介绍实验装置和实验细节, 特别是如何用一种特制的光电子成像装置记录光电子角分布 (即电子云). 最后, 我们详细讨论左右旋椭圆偏振光的铷原子双光子电离以及用这一特制的成像装置测量光电子角分布的实验方法. 通过比较由实验和理论上得到的电子云影像可以完整地确定这三个离化参数. 实验所得到的相对离化截面以及分波相位差与理论数据极为符合. 这一结果同时也直接验证了由量子亏损理论得到的相位关系式.

In this chapter, we discuss multiphoton ionization of atoms and the determination of atomic parameters through the measurement of the photoelectron angular distribution (PAD). In particular, using elliptically-polarized light for these measurements we are able to determine the atomic parameters necessary to unambiguously describe the two-photon ionization of atomic rubidium. These parameters include the relative cross sections for various ionization channels as well as the phase difference between s and d partial waves. We will begin our discussion with the basic concept of multiphoton ionization of the atom, and then switch over to the measurement of PAD through two-photon ionization using linearly-polarized light. Afterward, we will present a theoretical derivation of the angular distribution with arbitrarily-polarized light in terms of these cross sections and phases, demonstrate the advantages of using elliptically-polarized light and discuss details of the experiment. Finally, we discuss an effective photoelectron imaging tech-

---

<sup>①</sup> The major results were first reported in APS DAMOP meeting, Santa Fe, NM, USA, May 1998, and published in *Physical Review Letters*, 84, 3795(2000) and *Physical Review A*, 62, 053404(2000). Authors: Zheng-Min Wang and D.S.Elliott

nique, with which photoelectron angular distributions (i.e. electron clouds) are recorded, as well as complete measurements of two-photon ionization in atomic rubidium using both right- and left-elliptically-polarized light. The results show that with this approach the three parameters can be completely determined. The measured phase differences and relative cross sections for ionization into s and d channels are in good agreement with theoretical data. The agreement of these results is a direct experimental confirmation of the relation of quantum defect phase.

## 1.1 引 言

### Introduction

Experimental methods of determining relative photoionization cross sections and phases of continuum electronic wave functions are typically very difficult to carry out. Only a few complete determinations have been reported in the past<sup>[1~5]</sup>. A complete measurement is one in which all the relative photoionization cross sections for exciting the different outgoing waves, as well as the phase differences between these channels, are unambiguously determined. Each of the past determinations required multiple measurements, such as photoelectron angular distributions for two-color ionization with a variety of angles between the directions of linear polarization of the two laser fields<sup>[1,2]</sup>, simultaneous measurement of the angular distribution and spin polarization of the photoelectron<sup>[3,4]</sup>, or simultaneous measurement of the photoelectron angular distribution and the residual alignment of the ion<sup>[5]</sup>. Observations of circular dichroism in photoelectron angular distribution measurements have also been identified for their potential in yielding relative cross sections and phase differences<sup>[6,7]</sup>. In addition to each of these experiments requiring multiple measurements, they typically yield only the cosine of the phase difference of continuum waves, rather than the phase difference directly, an ambiguity which must be resolved by some other means. While theoretical techniques for calculating the phases of atomic continuum wave functions for simple systems seem to be well in hand, it is still of great value to subject the results of these techniques to further, more rigorous experimental tests.

Two-photon ionization of an unaligned alkali metal atom initially in a ground  $ns^2S_{1/2}$  state produces an outgoing photoelectron in a continuum  $\epsilon s^2S_{1/2}$ ,  $\epsilon d^2D_{2/3}$  or  $\epsilon d^2D_{5/2}$  states. The angular distribution of photoelectrons ejected from the atom depends upon the superposition state created by these three outgoing waves, which in



turn depends upon the relative magnitude of the two-photon ionization cross sections for excitation into these three continuum states,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{3/2}$ , and  $\sigma_{5/2}$ , respectively, the phase difference between continuum channels,  $\xi_s - \xi_d$ , and the polarization state of the light. All told, three atomic parameters are necessary in order to predict the angular distribution (The three cross sections represent only two independent parameters, since only the relative magnitudes are relevant, and the fine structure intervals of the  $^2D$  bound state series<sup>[8]</sup> indicate that the phase difference between the two continuum d channels is only  $0.003\pi$ , and therefore negligible).

In this chapter, we discuss the measurements of photoelectron angular distributions for two-photon ionization of atomic rubidium using elliptically-polarized light<sup>[9]</sup>. These measurements represent a complete determination of the atomic parameters relevant for photoionization (i.e., relative cross sections and continuum function phase differences) through a single laboratory observation, in contrast to all previous methods as discussed above. The results yield not only the magnitude of the phase differences (modulus  $\pi$ ) but the sign as well, and are in excellent agreement with expected values over a range of photoelectron kinetic energies. A theoretical analysis of the experimental determinations is presented in Ref.[10].

The traditional technique for the measurement of PAD uses a single channel electron detector to collect the photoelectron flux in several directions in a plane perpendicular to a laser beam with linearly-polarized light. Unfortunately, the atomic parameters cannot be uniquely determined from these measurements of PAD. In order to measure complete angular distributions of photoelectrons we use a special designed apparatus with a micro-channel plate (MCP) and a charged coupled device (CCD) camera to collect the photoelectrons emitted from the interaction region in all directions. The collected electrons form a two-dimensional image on the phosphor screen. The images created by elliptically-polarized light are asymmetric. This image asymmetry in the present procedure is critical in that it allows us to exploit the asymmetry of the angular distribution to carry out our complete determinations.

## 1.2 原子多光子电离与光电子角分布

### Multiphoton ionization of atoms and photoelectron angular distributions

This section is primarily concerned with the basic concept of multiphoton ionization of atoms, the principle of the measurement of PAD, and the determination