



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 1 4

光频标

沈乃澂 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 1 4

光频标

沈乃澂 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

光频标/沈乃澂编著. —北京:北京大学出版社, 2012. 9

(中外物理学精品书系·前沿系列)

ISBN 978-7-301-20031-5

I. ①光… II. ①沈… III. ①激光频率标准—研究 IV. ①TM935.113-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 281265 号

书 名: 光频标

著作责任者: 沈乃澂 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-20031-5/O·0857

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038 出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

650 毫米×980 毫米 16 开本 26.5 印张 460 千字

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 70.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: (010)62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

《中外物理学精品书系》

编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海清	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学家的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了《中外物理学精品书系》,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,《中外物理学精品书系》力图完整呈现近现代世界和中国物理科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

《中外物理学精品书系》另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,《中外物理学精品书系》还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统地整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套《中外物理学精品书系》的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其它相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

《中外物理学精品书系》编委会 主任
中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

内 容 提 要

光频标即激光频标,始于20世纪70年代,是光学波段的频率标准.本书对光频标的产生、发展和激光频率测量的历史、现状和未来发展趋势作了详尽的介绍和描述,可以分为四个部分:第一、二章叙述了微波频标与光频标建立的实验基础和历史概况,以及与精密测量基本物理常数的关系.第三、四章介绍了光频标建立所使用的各种激光器及与激光谱线相符合而作为参考的各类吸收谱线.第五、六章介绍了获得非线性窄谐振以及采用囚禁离子或原子研制的光频标准的原理和实验方法,包括获得窄谐振吸收信号的条件及具体的实验方法.第七、八章是本书的核心内容,介绍建立光频标必须有的测量方法及其测量不确定度.第七章是20世纪70年代至90年代三十年间采用的传统光频链方法;第八章介绍1999年实现的新的突破:用光梳来测量光频标的频率,首创这项方法的科学家获得了2005年诺贝尔物理学奖.

本书包含丰富的数据和测量方法,以及国际比对的资料,对于当前光钟的研究和前景也进行了介绍,包括了作者与合作者多年来的部分成果.可供本科生、研究生和教师以及从事研制激光频标的企业参考.

序

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动规律的基础科学.由于物理学本质上是一门以实验为主体的科学,物理规律必须经过严格的实验检验,其中包括一些物理量的精密测量.在物理量的精密测量中,一般均采用国际单位制所推荐的基本单位和导出单位.其中,基本单位的定义和复现方法是计量学研究的主要内容,它与现代物理学有着极其密切的关系.两者联系的纽带就是基本物理常数.

本书书名“光频标”是“激光频率标准”的简称.顾名思义,激光频率标准是激光各个波段的频率标准,包括远红外、中红外、近红外和可见光,直至紫外波段.这些从长波到短波的激光频率值的溯源是微波频标.为了精密测量各个波段的激光频率,计量学家和物理学家经历了多年的努力,建立了从微波频段至可见光波段的激光频率测量链.1983年,由真空中光速值 299 792 458 米/秒的国际推荐值而确定的新的米定义正式采用.这个定义使由微波频标铯原子钟定义的时间秒的定义,与用真空中光速确定的米的定义直接统一起来.在世纪交替前夕的 1999 年,激光频率测量技术出现了突破,德国 MPQ 的 T. W. Hansch 博士率先用飞秒激光频率梳在实验上建立了从微波频标到激光频标的直接联系,美国 JILA 的 J. Hall 博士紧随其后,用上述方法完成了一系列激光频标频率的精密测量.2005 年,他们获得了诺贝尔物理奖.这是物理学的最新成果用于计量学精密测量的范例之一.

2005 年,计量学家提出了一项前瞻性的建议:除上述时间(频率)和长度之外的现有的五个基本单位全部用基本物理常数来重新定义.此后,这项研究已取得了一系列重要成果.几年后可望陆续实现既定的目标.由此可见,计量学的前沿研究离不开物理学的最新成就,物理学家对基本物理常数精益求精的研究和测量,也离不开计量学家坚持不懈的努力,其实许多计量学者也都是物理学家.

本书作者沈乃激先生自 1962 年毕业于北京大学物理系,到上世纪末一直在中国计量科学研究院从事光频标方面的研究工作.进入新世纪以来他先后在中国科学院物理所和国家纳米科学中心继续进行光频标等相关领域的工作.飞

秒激光频率梳出现以后,他以极大的热情了解、参与研究和宣传其在光频精密测量上的应用.正是飞秒光频梳的出现,延伸了作者对本书的写作计划,增加了现在第八章的内容,即用飞秒的光频梳直接进行光频的绝对频率测量.本书的内容也包括了作者在不同阶段的部分研究成果.

聂玉昕

2012 年 8 月

作者前言

字面上看来,微波频标和激光频标似乎是一对孪生兄弟,实际上两者并不是同时诞生的.现在这两类频标已成为定义或复现时间和长度这两个基本单位的主要标准,同时它们也是基础物理学关注的热点之一,因此备受物理学家和计量学家的重视.

1967 年的第十三届国际计量大会上,铯原子钟的跃迁频率被用于重新定义时间单位秒,这是国际上第一次用原子的跃迁频率来定义和复现秒.当时长度单位米是用氪 86 同位素的橙黄谱线定义的,因此也是采用氪 86 原子的跃迁频率定义的;但秒和米两个单位的定义之间并无内在的联系.

20 世纪 70 年代初,出现了用饱和吸收谱线稳定的氦氖激光器,如甲烷稳定或碘稳定的氦氖激光器,前者的波长在红外范围,后者的波长在可见光范围.1973 年,由甲烷稳定的氦氖激光的频率和真空波长值得出真空中光速值,与 1958 年的微波测量值相比不确定度降低到 1958 年的近百分之一,70 年代中期国际上采用了这个新的真空中光速值.第五届国际米定义咨询委员会(CCDM)推荐使用甲烷和碘稳定的氦氖激光作为波长标准.这两类氦氖激光器因而可视为早期的第一代激光频标.

1983 年,第十七届国际计量大会作出了一个重要决定,即采用一个全新的米定义取代 1960 年氪 86 同位素橙黄谱线的米定义.新定义中,真空中光速值为一约定值,而长度单位米是由时间单位秒和真空中光速值得出的.这个定义的主要复现方法是从微波频标出发,通过光频测量的方法测得激光频标的频率值,根据新的米定义可导出激光频标的真空波长值,由此来复现米单位.由此可见,这个定义和复现方法将微波频标和激光频标紧密联系在一起,使这对孪生兄弟亲密无间,形影不离.

1999 年,光频测量技术出现了重大突破,飞秒光频梳代替传统庞大而复杂的光频测量链取得成功,两位在此领域作出重大贡献的科学家美国 JILA 的 J. Hall 和德国 MPQ 的 T. W. Hansch 获得了 2005 年诺贝尔物理学奖.这对光频标和光频测量技术具有里程碑的意义.

作者的研究工作正经历了这三十余年的历程.在此历程中,作者有幸参加

633 nm 碘稳定氦氖激光的两次国际比对:第一次是 1980 年,地点在巴黎的国际计量局;第二次是 1998 年,地点在芬兰的赫尔辛基,两次比对的主持人都是国际计量局的 J.-M. Chartier 博士.第二次比对的时间正是飞秒光频梳出现的前夕,飞秒光频梳的出现因而可谓为 633 nm 激光频标的国际比对画上了句号.

本书经历了较长的写作与修改过程,得到了很多单位和研究人员的帮助,在此对中国科学院物理研究所、北京大学信息学院、北京大学物理学院、中国计量科学研究所的有关研究人员致以衷心的感谢.本人的前期研究工作是 20 世纪在中国计量科学研究所完成的,早在 1980 年前后,北京大学的王楚老师就是密切的合作者,我们一起参加了 1980 年赴巴黎的 633 nm 碘稳定激光的国际比对,并取得了很大的成功,王楚老师为此付出了很多心血,使我终生难忘;计量院很多同事们也做出了很多贡献.也要感谢后期合作者李成阳研究员,他和我一起参加了 1998 年赴芬兰的由国际计量局主持的多国 633 nm 碘稳定激光的比对,比对的成功为此类激光的国际比对画上了句号.

1999 年,出现了崭新的光梳技术,这是全新的光频测量方法.不但提高了准确度,而且使原来庞大的测量设备简化为一台光梳系统.这时我已从计量院退休来到物理所工作,当时魏志义研究员正在国外参加光梳技术的研究.聂玉昕研究员、北京大学的董太乾教授和我开始了光梳技术研究课题的准备工作.后来,由魏志义研究员主持了这项研究,在国内首先研制成了用光梳技术测量激光频率的装置.这项成果为本书的写作提供了丰富的资料.在此,对上述诸位及魏志义团队的诸多同事表示由衷的感谢.

本人从计量院退休后,由臧二军研究员主持团队的研究工作.他们完成了“半非平面单块固体环形激光器研究”,申请了 1998 年的《中国专利》,为我国自主开展 532 nm 碘稳定固体激光创造了条件.2005 年前后,他们用单块环形外腔激光器获得稳定的 532 nm 激光,这是我国的新一代高精度的激光频标,此设计成为光频测量中的关键设备,技术指标达到了国际先进水平.他们为本书提供了详尽的技术资料,在此表示衷心的感谢.

北京大学信息学院的郑乐民教授为本书前期写作提出了重要的修改意见,物理所的聂玉昕研究员长期关心本书的出版,并审阅了全部书稿,在此表示衷心的感谢.本书的编辑顾卫宇在本书成稿期间,多次提出极其细致深入的问题,为本书的改正和补充付出了辛勤劳动,也深表感谢.

沈乃激

2012 年 8 月

目 录

第一章 微波频标及其应用	(1)
§ 1.1 频率标准的历史	(1)
§ 1.2 时间和频率单位定义的发展	(1)
§ 1.3 微波频标作为秒的定义	(4)
§ 1.4 原子频标的原理	(5)
§ 1.5 铯原子钟的发展过程	(6)
1.5.1 初期发展阶段——磁选态	(6)
1.5.2 商品铯钟	(7)
1.5.3 中期发展阶段——光抽运选态	(8)
1.5.4 基准铯原子钟	(9)
1.5.5 铯频标发展的第三阶段——原子喷泉钟	(11)
§ 1.6 铯钟在复现国际原子时(TAI)中的作用	(15)
1.6.1 时标	(15)
1.6.2 铯钟在复现 TAI 中的作用	(16)
§ 1.7 铯原子频标发展趋势	(18)
§ 1.8 铷原子频标	(19)
1.8.1 铷原子能级	(19)
1.8.2 铷原子频标的结构和原理	(19)
1.8.3 铷原子喷泉钟的发展	(20)
1.8.4 铷原子频标的性能	(21)
1.8.5 TV-Rb 钟的性能	(21)
§ 1.9 氢原子频标	(25)
§ 1.10 离子贮存微波频标的发展概况	(26)
§ 1.11 钟和频率标准的重要应用	(27)
1.11.1 全球定位系统	(27)
1.11.2 时间比对的相对论性理论	(32)
1.11.3 钟和频标应用小结	(39)

第二章 光频标准和基本物理常数概论	(43)
§ 2.1 光频信号的特点	(43)
§ 2.2 光学频标的历史及其与微波频标的比较	(44)
2.2.1 光学频标的历史	(44)
2.2.2 光学频标与微波频标的比较	(45)
§ 2.3 光频标准的基本要求	(47)
2.3.1 光频标准的频率稳定度	(47)
2.3.2 光频标准的频率复现性	(47)
2.3.3 光频标准的绝对频率值和真空波长值	(48)
§ 2.4 光频标准、波长标准及米的重新定义	(48)
2.4.1 米的定义与光频标准的关系	(48)
2.4.2 米的重新定义	(49)
§ 2.5 复现米定义所推荐的光频标准及其推荐值	(51)
§ 2.6 光频标准的某些规范条件	(53)
§ 2.7 作为光频标准的激光器的基本性能	(55)
2.7.1 激光模式	(55)
2.7.2 激光线宽	(55)
2.7.3 激光谐振腔的机械和热稳定性要求	(56)
2.7.4 激光噪声	(56)
2.7.5 激光的单模输出功率	(56)
2.7.6 激光辐射与吸收谱线的频率符合	(56)
§ 2.8 光频标准及其测量近况	(57)
2.8.1 光频测量技术的发展和突破	(57)
2.8.2 光频标准的发展	(59)
§ 2.9 基本物理常数概述	(64)
§ 2.10 真空中光速的精密测量	(66)
2.10.1 用激光频标测量光速之前的历史概况	(66)
2.10.2 用激光频标测量真空中光速	(67)
2.10.3 真空中光速与米的重新定义	(68)
§ 2.11 氢原子光谱的精密测量	(69)
2.11.1 氢原子光谱概述	(69)
2.11.2 氢原子光谱的实验和理论研究	(70)
2.11.3 氢原子 1S-2S 的高分辨光谱	(71)

2.11.4	20 世纪 80 年代的实验测量概况	(72)
§ 2.12	里德伯常数的精密测量	(74)
2.12.1	第二次世界大战前至 20 世纪 60 年代末的测量结果	(74)
2.12.2	20 世纪 80 年代后的测量结果	(75)
§ 2.13	用基本物理常数重新定义一些基本单位的建议	(79)
2.13.1	引言	(79)
2.13.2	瓦特天平和 X 射线晶体密度实验	(80)
2.13.3	新定义对常数值的影响	(81)
2.13.4	新定义对 $m(\kappa)$ 值的影响	(83)
2.13.5	实际质量测量系统及采用 $m(\kappa)$ 的约定值	(83)
2.13.6	用基本物理常数重新定义一些基本单位	(84)
2.13.7	基于固定 h 或 N_A 值的千克定义时确定基本常数的最佳值	(86)
2.13.8	结论	(88)
附 1	2010 年和 2006 年基本物理常数的国际推荐值	(88)
附 2	2010 年与 2006 年的 CODATA 常数推荐值不确定度的比较	(91)
第三章	光频标准使用的激光器	(96)
§ 3.1	氦氖激光器的激发机理	(96)
§ 3.2	氦氖激光的跃迁谱线和氦氖激光器	(97)
3.2.1	氦氖激光的跃迁谱线	(97)
3.2.2	氦氖激光器	(98)
§ 3.3	影响激光器频率稳定的因素分析	(100)
3.3.1	决定激光谐振频率的基本公式	(100)
3.3.2	外界的温度影响	(100)
3.3.3	大气变化的影响	(101)
3.3.4	机械振动的影响	(102)
3.3.5	光学元件位移的影响	(102)
3.3.6	磁场影响	(103)
3.3.7	激光管放电噪声的影响	(103)
3.3.8	光反馈的影响	(103)
§ 3.4	氦氖激光获得单频运转的方法	(104)
3.4.1	缩短腔长的方法	(104)
3.4.2	复合腔选模的方法	(104)

3.4.3	法布里-珀罗腔选模的方法	(105)
3.4.4	轴向磁场选模的方法	(105)
§ 3.5	多谱线氦氖激光器的理论、结构及有关特性	(105)
3.5.1	多谱线氦氖激光的理论基础	(105)
3.5.2	多谱线氦氖激光器的结构	(106)
3.5.3	多谱线激光器的特性	(107)
3.5.4	单一波长的氦氖激光输出	(108)
§ 3.6	氩离子激光器	(108)
§ 3.7	染料激光器	(110)
§ 3.8	半导体激光器	(112)
3.8.1	概论	(112)
3.8.2	单模获得的方法	(113)
3.8.3	机械设计和准直	(114)
3.8.4	LD 的温度调谐特性	(117)
3.8.5	频率调谐和调制	(118)
3.8.6	压窄 LD 线宽的方法	(119)
3.8.7	633 nm 单模半导体激光器	(119)
§ 3.9	半导体激光抽运的固体激光器	(120)
3.9.1	抽运用的半导体激光器	(120)
3.9.2	Nd:YAG 激光器	(121)
3.9.3	Nd:YVO ₄ 激光器	(122)
3.9.4	DPSS 的优点	(122)
§ 3.10	用环形腔获得单频运转的方法	(123)
3.10.1	单块晶体的非平面环形腔	(124)
3.10.2	半非平面单块 Nd:YAG 环形谐振腔	(126)
第四章	光频标准中作为参考的吸收谱线	(130)
§ 4.1	吸收谱线作为光频标准的参考	(130)
4.1.1	分子吸收谱线的优点	(130)
4.1.2	作为参考谱线的基本要求	(131)
§ 4.2	分子的跃迁能级和超精细光谱	(132)
4.2.1	二原子分子的跃迁能级	(132)
4.2.2	碘分子超精细光谱的量子理论	(135)
4.2.3	预言碘分子超精细分量新的经验公式	(139)

§ 4.3 碘分子的跃迁能级及饱和吸收谱线	(140)
4.3.1 碘分子的跃迁能级	(140)
4.3.2 $B-X$ 能级之间振转跃迁的识别	(144)
4.3.3 $B-X$ 跃迁的超精细结构特征分析	(146)
4.3.4 饱和吸收的主谱线和交叉谱线	(148)
§ 4.4 碘蒸气压力和碘谱荧光之间关系的理论考虑	(149)
4.4.1 弛豫过程	(149)
4.4.2 Stern-Volmer 公式	(150)
§ 4.5 碘的吸收系数及其饱和强度	(152)
4.5.1 碘的吸收系数	(152)
4.5.2 碘的吸收饱和	(154)
§ 4.6 633 nm 附近碘吸收谱线的观测和计算	(157)
4.6.1 633 nm 附近碘吸收多普勒谱线的观测	(157)
4.6.2 633 nm 附近碘吸收谱线超精细分量的检测	(158)
4.6.3 用 633 nm LD 对碘超精细分量的观测	(158)
§ 4.7 532 nm 碘吸收谱线中超精细分量的计算和检测	(160)
4.7.1 532 nm 碘分子的超精细谱线的优点	(160)
4.7.2 532 nm 碘分子的超精细谱线的检测	(160)
4.7.3 我国对 532 nm 碘分子的超精细谱线的检测	(163)
4.7.4 我国制作的碘吸收室的比对测量	(164)
第五章 获得非线性窄谐振的原理和实验方法	(168)
§ 5.1 谱线的加宽机制	(168)
5.1.1 非均匀加宽	(168)
5.1.2 均匀加宽	(169)
§ 5.2 饱和吸收激光光谱学	(171)
5.2.1 窄谐振的谐振条件与宽度	(171)
5.2.2 “烧孔”效应和兰姆凹陷	(173)
§ 5.3 无多普勒加宽的非线性激光光谱学	(174)
§ 5.4 用 He-Ne 激光进行饱和吸收的实验观测	(175)
5.4.1 633 nm 氖吸收的观测	(175)
5.4.2 3.39 μm 甲烷吸收的观测	(177)
5.4.3 633 nm 碘吸收的观测	(179)
5.4.4 在可见光谱区内碘吸收的观测	(180)

§ 5.5	氦氖激光的增益和线形	(180)
5.5.1	氦氖激光能级粒子数差及增益曲线	(180)
5.5.2	增益线形	(182)
5.5.3	增益的谱线加宽	(182)
§ 5.6	激光功率曲线的兰姆凹陷	(183)
5.6.1	兰姆凹陷的产生	(183)
5.6.2	产生兰姆凹陷的条件	(184)
§ 5.7	兰姆凹陷的稳频方法	(186)
5.7.1	兰姆凹陷稳频方法的原理	(186)
5.7.2	兰姆凹陷稳频激光器	(187)
5.7.3	频率稳定度、复现性测量和真空波长值	(188)
§ 5.8	双纵模稳频方法	(190)
5.8.1	双纵模氦氖激光器	(190)
5.8.2	稳频的实施方案	(193)
5.8.3	双纵模稳频激光的实验观测步骤	(193)
5.8.4	稳频激光的功率和频率稳定度测量	(194)
5.8.5	频率复现性分析	(195)
§ 5.9	腔内饱和吸收稳频方法	(196)
5.9.1	633 nm 碘稳频的氦氖光频标准概况	(196)
5.9.2	633 nm 氦氖激光的腔内饱和吸收	(198)
5.9.3	奇次谐波锁定的理论计算	(199)
5.9.4	三次谐波和五次谐波锁定技术的伺服控制系统	(202)
5.9.5	三次谐波锁定与五次谐波锁定频差的测量及分析	(204)
5.9.6	频率稳定度和复现性	(205)
§ 5.10	633 nm 碘稳定氦氖激光的国际比对	(206)
5.10.1	早期的国际比对	(206)
5.10.2	20 世纪 90 年代的国际比对	(207)
5.10.3	五次谐波锁定的首次国际比对	(209)
§ 5.11	514.5 nm 碘稳定的 Ar^+ 光频标准概况	(210)
5.11.1	国际研究概况	(210)
5.11.2	法俄联合研究的概况	(210)
5.11.3	美国研究的概况	(212)
§ 5.12	3.39 μm He-Ne/ CH_4 光频标准	(213)