

清华大学学术专著

正交偏振激光原理

张书练 著



清华大学出版社

清华大学学术专著

正交偏振激光原理

张书练 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书概述了激光偏振,特别是近期正交偏振激光器及其应用领域的研究成就。第1章是激光原理基本内容概述;第2章介绍塞曼双频激光器和四频环形激光器;第3章~第6章是本书的主体部分,有大量的已有专著和教科书中没有的激光实验、激光现象和激光应用的新知识,是对激光原理和技术较为系统的深化和展览;第3章和第4章介绍各种双折射效应使气体、Nd:YAG微片、半导体等激光器的一个频率变成两个正交线偏振频率及控制其频差的原理,给出了一系列正交线偏振激光器的结构;第5章描述正交偏振激光器的频率、功率、偏振旋转、调谐、模竞争、回馈等特性;第6章阐述利用激光的正交偏振特性把激光器自身“演变”成传感器的原理和技术,如纳米激光器测尺、波片相位延迟测量仪等。

本书可供国内外从事激光教学和科学研究的教师、科技人员、科技管理人员、研究生和大专院校本科生阅读。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

正交偏振激光原理/张书练著. —北京:清华大学出版社,2005.1

(清华大学学术专著)

ISBN 7-302-09696-1

I. 正… II. 张… III. 正交—偏振—激光器—原理 IV. TN248

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第106577号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:张秋玲

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市春园印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:153×235 印张:16 字数:265千字

版 次:2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-09696-1/TN·223

印 数:1~2000

定 价:68.00元

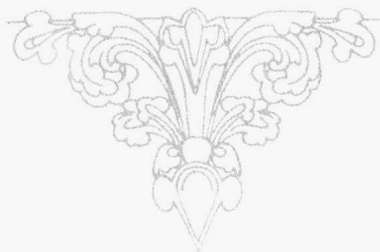
本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704



作者简介



张书练 清华大学教授，博士生导师。先后任清华大学精密仪器与机械学系人事科和科研科科长，清华大学科技处综合科长，并代理过副处长和副系主任的工作。1993年至2004年任清华大学光电工程研究所所长。1996年至今任清华大学精密计量技术及仪器国家重点实验室主任，中国计量测试学会理事，中国计量测试委员会副主任。担任十几个学术刊物的审稿人或特约评审。曾经在比利时布鲁塞尔自由大学访问15个月，在德国卡塞尔大学讲学3个月，在韩国科学技术研究院合作研究6个月。多年来一直从事激光技术及纳米测量仪器的研究，主持了30余项科学研究项目。发表论文140余篇，其中被SCI收录40余篇。专利20余项，其中美国专利2项。出版专著（和教科书）2部。3次任国际学术会议专题合作主席，受SPIE委托编辑SPIE国际会议论文集2部。作为第一完成人，获国家教委科技进步（自然科学）一等奖1项、北京市科技进步二等奖1项。参加的项目获国家科技进步二等奖1项。获横山亮次、梅贻琦优秀论文奖3项。科学研究兴趣广泛，包括光钳技术、光纤光栅传感技术、三角法测量技术、LCOS显示技术等。最具代表性的贡献是与国内外同行一起创立“正交偏振激光及应用”学术体系中的一系列独创性贡献。这些成就为本专著奠定了基础。



Preface

This monograph summarizes polarization characteristics of lasers, in particular recent research achievements of orthogonal polarized laser and applications of these lasers. Serving as the basis for the following chapters, Chapter 1 introduces the main contents of laser fundamentals systematically and briefly. Chapter 2 presents clearly, though shortly, the principles of Zeeman Dual-Frequency Lasers and Four-Frequency Ring Lasers. Chapter 3 to 6 is main part of the book, and you can see a great deal of new knowledge of laser experiments, phenomena, theoretical analysis and applications, which did not appear in other textbooks and monographs. In this sense, this monograph is systemic complement and development for laser fundamental and technology. In Chapter 3 and 4, we introduce the principles that birefringence of various materials located in laser cavity makes one frequency of gas, Nd: YAG microchip and semiconductor lasers split into two orthogonal polarized frequencies. The frequency difference of the two frequencies can be changed and controlled. A series of configurations of orthogonal polarized lasers are given. The characteristics of orthogonal polarized lasers are treated in Chapter 5, such as frequency turning, intensity turning, polarization rotation, mode competition, and optical feedback act. The applications of orthogonal polarized lasers are dealt with in Chapter 6, where you can see how to change a laser itself into a sensor, such as laser nano-meter ruler, measurement of phase retardation of wave plates, etc.

This monograph provides comprehensive readings to educators, researchers, managers, university students, and engineers in the fields of laser and measurement.

序

本书作者张书练刚参加工作时就和我在一起进行激光技术的研究。尽管因实验室的搬迁和他攻读研究生离开了我的实验室,但我了解他学术的发展,熟悉本专著的内容。我十分高兴为此专著作序。

本书的作者刚开始研究正交偏振激光器时和我讨论过他的基本想法。他当时的目的是为了突破塞曼效应双频激光器遇到的瓶颈问题。利用塞曼效应的双频激光器已有 30 年历史,由于原理限制,其输出频率差以 3MHz 左右为上限,以它做光源的双频激光干涉仪的测量速度因此受到了限制。为了获得更大的频率差,人们不得不使用声光调制器等移频技术。他设想在驻波激光器内加入晶体石英以获得间隔远大于 3MHz 的两个频率并取得了成功,这就是以石英晶体为频率差调谐元件的双折射双频激光器,也是本书内容的开端。不过当时,尽管注意到了这种激光器输出光的正交偏振特性,但并没有刻意为其冠以正交偏振的名义,作者通常以“激光频率分裂”来称呼他的研究,突出的是专门技术。近年来,随着研究的发展,与激光器偏振态正交性相关的效应越来越多,给应用带来的好处也更加明显。我想作者把此书命名为“正交偏振激光”也是基于这种理解。正因为有了相互正交的偏振特性,双频激光的两个频率成分才能被方便地区分和利用。

展开来看,研究激光器偏振有着广泛的意义。一般归纳,受激辐射赋予激光四种特性:单色性、相干性、方向性和高强度。实际上,受激辐射也带给激光“偏振”这一重要特性。激光纵模(频率)一定是偏振的,同时,相邻纵模偏振方向的夹角不是任意的,要么相互平行,要么相互垂直。迄今为止,主流半导体激光器的模式都是同偏振的。但现有教科书和专著很少以较大篇幅就激光的偏振特性展开讨论,而特意改变激光偏振为我所用的内容更为鲜见。人为改变和利用激光偏振的仅有布儒斯特窗、电光 Q 调制等少数例子。究其原因,主要是人们认可谐振腔各向异性造成激光偏振的事实,但没有对改变激光器内部结构以改变其偏振态给予足够重视,此方面的研究成果也就不是很多,没有写成专著的足够素材。

张书练教授等国内外学者把研究正交偏振激光及应用作为多年的孜孜以求的奋斗目标,使学术空间空前开阔,研究成果迅速增加,形成了“正交偏

振激光”这样一个控制激光正交偏振频率间隔,研究正交激光物理现象及其应用的领域。与“激光频率分裂”相比,“正交偏振激光”更强调此类激光器的输出特性。正交偏振激光器具有一般激光器的特性,也要涉及到激光理论和实验的各个方面。因此,本专著源于激光原理,又系统地深化和发展了激光原理,成为激光原理的一个新部分。本专著文字量不算很大,但有足够多新鲜内容可读,有足够深度的理论和实验结果可用。

本专著运用激光谐振腔、激光器增益、激光功率特性等基本理论和概念,论述了正交偏振激光器,包括双折射双频激光器、双双折射双频激光器、双折射-塞曼激光器等的的工作原理和一系列实施结构。此原理的巧妙之处在于把激光谐振腔理论和各种形式的双折射相结合,即在激光谐振腔内置入石英晶体、方解石、人造应力双折射、电光晶体等元件,使激光器的一个频率分裂为两个正交偏振的频率,其间隔正比于双折射大小,可以从 1MHz 到 1 个纵模间隔,甚至超越纵模间隔,出现低阶纵模频率越过高阶纵模频率的现象。运用空间分离或塞曼效应把增益原子分成两群以减小模竞争,又同时利用腔内双折射效应产生中等大小频率差的双双折射双频激光器和塞曼-双折射激光器是激光技术的精彩之作。

这本专著中给出了一些过去读得到却难以看得见的重要激光现象。如 He-Ne 激光器中的强模竞争(即激光 Lamb 理论定义的耦合常数大于 1 的情形),其发生条件是两个频率的间隔足够小,使其在增益曲线上的烧孔大面积重叠,以致增益不够维持两频率同时振荡,导致其中一个频率熄灭。以往,驻波激光器的最小频率间隔就是纵模间隔。即使谐振腔长达 0.5m 的激光器,其纵模间隔也只有 300MHz 之大,在竞争中一个频率使另一个频率熄灭的现象也是难以发生的。借助本专著所述的频率分裂技术,两个激光频率之间的间隔可调到任意小,观察强模竞争现象成为易事。在腔调谐时,还能清楚地看到强模竞争发生的区间宽度:在两个频率间隔从 30MHz 到约 100MHz 以内时,抑制熄灭宽度约有 300MHz 之大,几乎相当于烧孔宽度,这是以前我们所不知道的。一频率分裂成两个频率的过程中,一旦第二个频率突跳出来,频率差已在 30MHz~40MHz 以上了。这些现象的观察和数据的获得是激光实验技术上的重要发现和进步。

本专著还介绍了很多新发现,关于旋光性引起的激光偏振面旋转、正交偏振激光回馈等内容就是这样。其中包括了 Nd:YAG 微片、半导体、He-Ne 等正交偏振激光器。作者在这些激光器上新发现的回馈自混合效应和理论十分丰富,包括两正交频率的相互抑制、强度转移、双折射外腔回馈

引入的偏振跳变和条纹倍频、非准直外腔强回馈中高阶倍频效应与偏振跳变实验等。这些研究成果不仅在激光物理中具有重要的理论和实践意义,也为解决激光回馈应用中的瓶颈问题打下了基础。

本专著发展了激光器的新应用。传统的激光应用仅将激光器视为一个光源,本书中则将激光器自身“演变”为传感仪器,应用在压力(强)、位移、振动、角度和磁场等物理量的测量方面。其中,“纳米激光器测尺”综合利用正交偏振激光器的模分裂、双同位素混合谱线、模竞争、腔调谐和猫眼腔镜等特性或器件,圆了多年来试图利用“腔长改变半个波长,激光频率移动1个纵模间隔”的原理进行位移测量的梦,且分辨率远高于半个波长。而“频率分裂量与纵模间隔之比乘以 180° 即为波片位相延迟”的原理使波片测量不再依赖于角度等机械量的测量并可溯源到光波长基准。期待这些首创的研究成果广泛应用。

本专著内容大部分来自清华大学张书练课题组最近十几年的百余篇文章(其中40余篇SCI收录论文)和20余项发明专利(含2项美国专利)。他们在“正交偏振激光”中的研究成果在国内外独树一帜,形成了一个创新性的、从基础研究到应用研究的较为系统、完整的学术体系,是国际上对此领域做出开创性贡献的最重要的课题组之一。我认为,他们的一些发明和发现将成为发展激光技术的典型事例,对激光教学也将产生广泛影响。一个课题组能开辟一个研究方向,并有很多新原理的发明创造是十分可贵的。本专著的内容还包括来自法国、德国、美国、英国、日本、瑞士等国外科学家的相关研究,与本专著作者的工作相得益彰,构成一个更完整的整体。

相信本书的出版将会引起我们对激光偏振和双频激光的更大关注,其理论分析和实验现象将加深人们对激光原理一般概念的理解,促进正交偏振激光的应用,特别是在精密计量中的应用。本书对本科生、研究生的教学也将产生很大影响。本专著的出版是国内外激光技术和精密计量两领域研究的一件要事、喜事。

清华大学教授 中国科学院院士

周炳琨

2004.11,北京

前 言

“偏振”是各种激光器的普遍性质,这是由激光形成的原理决定的。激光束是由激光器内发光介质粒子的受激辐射形成的。受激辐射有鲜明的特点:外来光子照射激光上能级粒子时,粒子辐射出一个光子并跃迁到下能级,受激辐射所产生的光子与外来光子具有相同的相位、相同的传播方向和相同的偏振状态。当激光器内受激辐射形成光子流时,一个模式光子流中的全部光子都具有相同的相位、相同的传播方向和相同的偏振状态。这意味着一个激光纵模(频率)一定是偏振的。同时,激光相邻纵模的偏振态或为平行或为垂直。布儒斯特窗或 Q 调制电光晶体的使用是利用激光偏振的很好例证。

激光器“正交偏振”是指激光器两个相邻的频率具有互相垂直的偏振状态。一对左右旋圆偏振的光也应看做正交偏振光。一般说到“激光两正交偏振频率”时,其频差不是任意的,而是完全由激光腔长决定的。本书研究的则是如何使激光器产生任意频差的两个正交偏振频率,以及这类激光器的结构、特性和应用。

第 1 章简洁而全面地介绍了激光器的一般原理。第 2 章介绍历史上与正交偏振激光相关的成就,主要是塞曼双频激光器和环形激光器,而环形激光器又包括三镜激光陀螺、环形激光流量计和四频(四镜)环形激光器。这些激光器并不都输出本书所专指的“正交偏振激光”,但它们和本书的“正交偏振激光”有一个共同的物理概念,即“激光频率分裂”现象——由一种物理效应把激光器的一个频率“分裂”成两个。历史上这些激光器使用塞曼效应、旋光效应、磁光法拉第效应、Sagnac 效应形成激光频率分裂。

从第 3 章起到第 6 章,介绍由双折射效应在驻波激光器(管)中进行激光频率分裂,形成正交偏振振荡和输出。激光频率分裂所使用的双折射效应包括自然双折射效应、应力双折射效应、电光双折射效应等。从 1988 年在 *Optics Communications* 发表第一篇文章开始,至今已发展成一个原理、器件、现象和应用系统完整的学术体系。

塞曼双频激光器的原理是在 He-Ne 激光放电管上加磁场。激光器加纵向磁场(磁场与光束平行),可以得到两正交圆偏振光(一个左旋,一个右

旋)。如果加横向磁场(即磁场与光束垂直),则得到两正交线偏振光。值得指出的是:塞曼双频激光器左旋光和右旋光的频差不能大于 3MHz,这就限制了它的应用范围。频差不能大于 3MHz 的原因是:只有当磁场增大时频差才能增加;但磁场大到一定时,左旋光和右旋光的中心频率的间隔太大,以至于两光的增益线完全分离,两中心频率不能同时对一个腔模进行模牵引,也就无法将一个频率“牵引”成两个频率。横向塞曼激光器输出频差比纵向塞曼激光器更小,一般在 1MHz 以下。

然而在计量等领域,特别是双频激光干涉仪需要几兆赫兹、几十兆赫兹、甚至上千兆赫兹的频差。激光器的输出频差小限制了双频激光干涉仪的测量速度。由多普勒原理可知,频差 $\Delta\nu=3\text{MHz}$ 时,测量速度的极限为 900mm/s。因而,双频激光干涉仪的理论测量速度最大只能达到 900mm/s。实际上,国内只能达到 300mm/s,国外只能达到 700mm/s。

为了获得大的频差,研究者和干涉仪、测振仪的制造商常将激光器的出射光分成两束,在其中一束光的光路中加入声光调制器或布拉格元件改变其频率,然后再进行合光,从而产生几十兆赫兹的频差。也有直接使用两个纵模的。还有用两个频率不同的稳频激光器对拍的。这些方案都使系统变得复杂,装调增加了难度,稳定性受到影响。

为了解决这一问题,我们开始研究新的双频激光器,以期突破塞曼双频激光器的 3MHz 频差的限制。开始时不可能想得到,这竟是一条不归之路。越研究内容越广,越探索学术越深,内容越展越宽,今后还有很多事要做。回头想想倒也明白,毕竟偏振是激光器的共性问题,而过去对它的研究太少了。

开始,在普通的驻波 He-Ne 激光器腔内放入一片石英晶体,因为石英晶体具有双折射效应,寻常光(ordinary light,简称 o 光)和非寻常光(extraordinary light,简称 e 光)在腔内有不同的光程,这样就会使一个激光纵模分裂成两个,产生几十、几百甚至上千兆赫兹的频差输出。之后,又对腔内加入 KD^*P 电光晶体造成的频率分裂现象、应力双折射引起的频率分裂现象进行了专门研究,都得到正交偏振激光输出。还将激光频率分裂技术用于 Nd:YAG 激光器,获得了几吉赫兹的频差输出。由于使用的石英晶体(包括波片)、 KD^*P 、施加了应力的光学玻璃片等,都是利用了双折射效应。我们称这样的双频激光器为双折射双频激光器。这类激光器的理论基础和原理见第 3 章,器件结构见第 4 章。研究的激光器类型包括 He-Ne 激光器($0.6328\mu\text{m}$ 和 $1.15\mu\text{m}$)、LD 泵浦的 Nd:YAG 微片激光器、半导体

激光器。

在研究中发现,与塞曼双频激光器有频差上限相反,驻波 He-Ne 双折射双频激光器的输出频差有一个下限,其频差不能小于 40MHz。这是由于模竞争引起的。频差大约小于 40MHz 时,在两个正交偏振模之间存在强烈的模竞争(耦合),从而导致其中一个模式熄灭而得不到频差。

从学术上看,在塞曼双频激光器的 3MHz 频差上限和双折射双频激光器的 40MHz 频差下限之间有一个空白,等待去填充。从应用上讲,双折射双频激光器 40MHz 的频差对一些应用很合适(如激光测振仪),但对另一些应用来说又有点大。因为这使得它的后序处理电路比较复杂。一般认为,频差在 4MHz~20MHz 之间比较合适。这样的频差既可满足双频激光干涉仪快速测量的要求,又能使后序处理电路简单易行。但无论是塞曼双频激光器还是双折射双频激光器,都不能提供这样的频差。经过多年的困扰,又研究成一种新原理的 He-Ne 双频激光器——双折射-塞曼双频激光器,输出频差能在 1 兆赫到几百兆赫之间连续可调,覆盖了 4MHz~20MHz 范围内的任一频差值。除了我们外,瑞士的 S. Pajarola、法国的 M. Brunel 和 M. Vallet 等人也对半外腔结构双偏振半导体激光器进行了研究。

新的器件有新的激光物理现象,有与其他激光器不同的输出特性。研究这些现象和输出特性,获得对正交偏振激光器全面而有深度的了解是科学的任务。研究包括:两个正交频率的强模竞争现象、功率调谐现象、频差调谐现象、旋光性影响、光回馈现象、单频振荡正交偏振激光器腔调谐中的偏振跳变和光徊滞(法国 Floch 的研究)、双折射外腔回馈中的偏振跳变、非准直外腔强回馈激光强度高阶倍频与偏振跳变等。这些现象的发生涉及 He-Ne 激光器、半导体激光器、LD 泵浦微片 Nd:YAG 激光器。第 5 章将介绍“正交偏振激光”的这些特有的现象。

第 6 章将介绍应用“正交偏振激光”特有现象进行的 10 项应用研究。包括:基于正交偏振光竞争的位移测量(又称为激光器纳米测尺)、基于正交偏振光回馈效应的位移测量、波片相位延迟量测量、力和质量测量(德国 Holzapfel)、角度测量、重力测量、弱磁场测量等。读者将会在阅读中感受到这些原理的精彩和应用潜力。实际上其中一些已经在应用之中,有一些则是考虑产业化的时候了。

本书是按原理→器件→现象→应用的顺序写成的。四块内容中,每块都包含大量的内容。比如现象部分(第 4 章)就包含如下内容:强模竞争现

象,中等模竞争与强模竞争之间的转换(即竞争中两个频率之一从振荡到熄灭或从熄灭到振荡的过程);确定强模竞争的频差范围为 $0\text{MHz}\sim 40\text{MHz}$ 左右;双折射双频激光器腔调谐中出现的四种偏振态组合(o 光振荡、 e 光不振荡, o 光、 e 光同时振荡, o 光不振荡、 e 光振荡, o 光、 e 光都不振荡);双折射双频激光器频差调谐现象;双折射-塞曼双频激光器的功率调谐、频差调谐特性;正交偏振激光回馈自混合干涉中两个频率的相互抑制,强度的转移;双折射外腔回馈引入的条纹倍频现象;石英晶体旋光性造成的频率分裂畸变等。这样一种写作方法较符合常规思维方式。但它是存在缺陷的。很难有机会按照科学对某一器件(如双折射-塞曼双频激光器等)的发明过程展开介绍,使读者对这一发明进程有更具体的了解。在此,将以几个重要的发现、发明过程作为线索作以下说明。

当进行以获得双折射双频激光为目的研究时,通过频率分裂技术,使一支激光器输出了两正交线偏振光。而实验得到的频差对石英晶体调谐角关系曲线的形状出乎预料:它不是一条单调上升的,而是具有一定“周期”特性的曲线。特别是前两个周期,竟然没有达到 1 个纵模间隔就出现了回缩。按晶体折射率椭球计算,在调谐角 90° 的范围内, o 光和 e 光的折射率差是单调增加的,即只按石英晶体双折射不能解释这种畸变现象。经过半年的反复实验,证明所得的实验曲线经得住考验之后才送往 *Optical Communications* 发表。实验中还发现,激光的频差可以大到几百兆赫兹,但不能小于 40MHz 。这又提出两个问题:第一个是为什么频差不能小于 40MHz ,第二个问题是怎样才能使频差小于 40MHz 。

研究得到的关于第一个问题的解答是:因为激光器存在强模竞争,当频差小于 40MHz 时,两个正交频率之一因为竞争失败而熄灭,频差自然也就消失。 40MHz 的这一强模竞争的区间远比以往人们在研究环形激光中得到的强模竞争的区间大得多。环形激光强模竞争的区间仅是兆赫量级。

关于第二个问题,为了克服模的强竞争,获得小于 40MHz 的小频差,提出源于一种思想的两种方案。该思想就是设法让 o 光和 e 光各拥有属于自己的那一部分增益原子,不再相互竞争。两种方案的一个是空间分离 o 光和 e 光,让它们各走自己的光路,各自在自己的光路上和属于自己的那部分增益原子相互作用获得增益。这就是本书 4.6 节中介绍的双双折射元件双频激光器。在双双折射元件双频激光器中,激光腔内同时放入方解石片和石英晶体片,它们的双折射效应相差 18.68 倍。方解石将腔内激光束分成偏振相互垂直,路径不重合但平行传播的两光束。由于它们在空间分开,

传播光路不重合,所以竞争消失。同时,以兆赫兹度量的精度旋转石英晶片精密调节 o 光和 e 光的频差。第二种方案是把增益原子分离为两群,简单的可认为其一半属于 o 光,另一半属于 e 光,这就是 4.5 节中介绍的双折射-塞曼双频激光器。在双折射-塞曼双频激光器中,既在腔内放置双折射元件产生频率分裂,获得 o 光和 e 光,又对激光器加横向磁场,把增益原子分为两群,一群放大 o 光,一群放大 e 光。o 光和 e 光都只从属于自己的原子群获得增益,相互之间的竞争大大减弱,都能稳定振荡。

双频激光器内的模竞争并非只有害,没有利。正交偏振竞争位移传感激光器十分成功地利用了模竞争这一本不讨人喜欢的现象,巧妙地将模竞争之弊转化为利。正交偏振竞争位移传感激光器也曾被称为偏振组合位移传感激光器,后来又叫纳米激光器测尺。这里的“纳米”采用了逐步被更多人认可的定义(0.1nm~100nm 属纳米的范围)。

下面介绍纳米激光器测尺的提出和研究过程。1993 年,本书作者想到一个问题:既然双折射双频激光器的频差可以从 40MHz 变成 1 个纵模间隔,就可以通过改变两个频率的差来给定两个频率进入激光器出光带宽的延迟量。基于此,可让它们各自的功率调谐曲线相差 90° 相位。仿双频激光干涉仪,又可能用这一现象进行位移测量并判断位移的方向。实验结果出乎意料:在调谐双折射双频激光腔长时,两个频率出现在出光带宽内的前后间隔远远大于它们的频率间隔。如频率间隔仅 60MHz,但先进入出光带宽的频率走过 270MHz 时另一个频率才生长出来。而且一种偏振光的出现必是另一种偏振光功率下降的开始;一个频率功率的上升必伴随另一个频率功率的下降;一种偏振光的功率极大值必对应另一种偏振光的极小值。显然,这和原设想的现象很不相同,构思等待修改。由于经常把这一问题拿出来思考一番,于 1995 年冬天,终于在观察功率调谐曲线中又有了新的想法,且确定了新的原理。这就是 6.1 节中给出的内容。目前,此种位移传感器已成为仪器,实现了 30 年国内外欲把一支激光器自身演变成为一个传感器的理想。当 1996 年 7 月初,一同学完成了他的本科毕业设计论文时,他所建成的实验装置已经能够看到位移测量的功能:可判断位移的方向, $\lambda/8$ 位移可输出 1 个脉冲。1998 年 12 月该研究成果申请了专利(专利号:ZL99103514.3)。又经过进一步研究,作为一个装置,于 1999 年进行了原理鉴定。当时的测量范围为 7.8mm,分辨率 79nm。现在已仪器化,测量范围已达到 15mm,分辨率 79nm。

其他发现、发明的研究进程不再赘述。

或许是偶然,也可能是出于必然,在激光理论和技术发展到如此高度的20世纪末,居然留下如此一块科学空地让国内外科学家去发掘,走进激光器的“内部”去研究。弹指一挥间,十几年已经过去。激光双频现象及应用从一点展开,逐渐发展,现已形成了比较系统的体系。我们相信,这些研究成果能对科学技术的进步有所贡献,对激光原理和技术学习能有所帮助。

本书引用的研究成果是最近十几年得出的,主要来自张书练课题组(中国),部分来自 A. Le Floch 课题组(法国)和 W. Holzapfel 课题组(德国),同时也介绍了美国、英国、日本、瑞士等国科学家的研究。

与作者一起从事此项研究的课题组老师有:李岩、韩艳梅、李克兰、郭继华、邬敏贤。金国藩院士在课题启动缺少经费的困难时期从思想上、经费上支持了这一研究。

国家自然科学基金委员会资助的项目号:技 85103,68978018,59275237,69286001,69778010,59775088,50127501,60178010。北京市自然科学基金资助的项目号:4922009,4992006。北京市科学技术委员会资助的项目号:H010110250111。国家教育部资助的项目号:GN—90。清华大学资助的项目号:JZ2001007。

张书练编制了写作大纲,收集了专著的素材,将相关历史成就和他自己所在课题组发表的成果写作成文作为本书的原型;金玉叶编写了第1章和第3章各节中相关的激光、物理光学基础理论内容、检查了全部公式,理顺、修改了全书各章节;最后张书练进行全书的又一次修改。宗晓斌翻译了 A. Le Floch 和 W. Holzapfel 的总结性文章;崔迎超写了3.5节初稿;期间,宗晓斌、费力刚、刘刚、万新军等还进行了文字性的修改工作。

周炳琨院士、金国藩院士、彭堃堉院士、严瑛白教授向清华大学出版社推荐了本书的出版。

感谢周炳琨院士为本专著写序。他自始至终关心作者的研究,给予经常性指导。

作者

2004年10月于清华园

目 录

序 前言

1 激光器基本概念	1
1.1 光和粒子的相互作用	2
1.2 光谱线的线型函数和加宽机制	6
1.3 He-Ne 激光器工作原理	14
1.4 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器工作原理	19
1.5 光在介质中的增益系数	22
1.6 激光介质中的粒子反转布居数及增益饱和	24
1.7 阈值条件、稳态增益和出光带宽	27
1.8 谐振腔和激光模式	29
1.9 激光器的模竞争	33
1.10 激光器功率调谐特性	36
2 历史上的正交偏振激光器	41
2.1 塞曼双频激光器	42
2.2 四频环形激光器	46
3 腔内双折射效应产生两正交频率的原理	52
3.1 激光频率分裂原理	52
3.2 用腔内石英晶体产生激光频率分裂	55
3.3 用腔内电光晶体产生激光频率分裂	61
3.4 用腔内应力双折射产生激光频率分裂	65
3.5 半导体激光器的频率分裂	68
3.6 频率分裂的观察和读出	71
4 基于双折射效应的正交偏振双频激光器	76
4.1 几种传统的获得大频差的方法	76

4.2	自然双折射大频差双频激光器	77
4.3	应力双折射双频激光器和应力双折射腔镜双频激光器	80
4.4	等间隔频率分裂超短腔长 He-Ne 激光器	82
4.5	双折射-塞曼双频激光器	84
4.6	双双折射元件的双频激光器	87
4.7	叠层双折射膜双频激光器和叠层双折射膜-塞曼双频 激光器	90
4.8	LD 泵浦双折射可调谐巨大频差 Nd:YAG 激光器	92
4.9	可控频差的双频激光器	97
5	正交偏振激光器的物理现象	99
5.1	双折射双频激光器的光强调谐、模竞争和频差调谐现象	100
5.2	双折射-塞曼双频激光器的光强和频差调谐特性	110
5.3	石英晶体旋光性对频率分裂激光器偏振特性影响的实验 和理论分析	117
5.4	用自洽理论分析腔内石英晶片旋光性对激光频差的影响	124
5.5	正交偏振激光器的光回馈效应	127
5.6	单频振荡的正交偏振激光器腔调谐中的偏振跳变和 光回滞	141
5.7	正交偏振外腔回馈中的偏振跳变	150
5.8	正交偏振 LD 泵浦微片 Nd:YAG 激光器的回馈	168
5.9	基于非准直外腔强回馈的激光强度高阶调制与偏振跳变	176
6	正交偏振双频激光现象的应用	183
6.1	双偏振光竞争位移测量激光器	184
6.2	频率分裂激光回馈位移测量	196
6.3	激光频率分裂光学波片相位延迟测量	199
6.4	腔内石英晶体元件频率分裂位移、角度、振动、重力测量	209
6.5	频率分裂 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器压力测量	216
6.6	频率分裂环形激光器弱磁场测量	219
6.7	力的静态和动态测量	224
	参考文献	229

Contents

Preface

Introduction

1 Fundamental Concepts of Lasers	1
1.1 Interaction Between Light and Particles	2
1.2 Line Shape Function and Line Broadening Mechanisms	6
1.3 Operation Principle of He-Ne Lasers	14
1.4 Operation Principle of LD-Pumped Nd:YAG Lasers	19
1.5 Gain Coefficient of Light in Active Medium	22
1.6 Saturation of Inversion Population and Gain in Active Medium	24
1.7 Threshold Condition, Stationary Gain and Lasing Bandwidth	27
1.8 Resonator and Laser Modes	29
1.9 Laser Mode Competition	33
1.10 Power Tuning Properties of Lasers	36
2 Orthogonal Polarized Lasers in History	41
2.1 Zeeman Dual-Frequency Lasers	42
2.2 Four-Frequency Ring Lasers	46
3 Principle for Producing Two Orthogonal Polarized Frequencies by Intra-Cavity Birefringence	52
3.1 General Principle of Laser Frequency Splitting	52
3.2 Laser Frequency Splitting Caused by Intra-Cavity Quartz Crystal	55
3.3 Laser Frequency Splitting Caused by Intra-Cavity Electro-Optical Crystals	61