

# 风起于青萍之末 浪成于微澜之间 ——漫谈 30 年科研:激光谐振仪器体系的建立

张书练<sup>1</sup>, 刘维新<sup>2</sup>

- (1. 清华大学 精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;  
2. 山东大学(威海)空间科学研究院 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 山东 威海 264209)

**摘要:** 科学方法研究是比获得成果更基础的工作, 此文是一篇总结作者 30 多年科学研究路径和概括研究成果相兼的论文。作者从几个基本的激光物理问题出发, 通过改变激光器谐振腔的结构, 在腔内/外增加元器件, 逐步发现了两镜激光器、三镜激光器腔调谐中的诸多物理规律, 并据此研制成多种激光精密测量仪器。概括了整个研究过程中作者科学研究的基本理念, 简述了作者研究激光中发现的物理现象, 总结了建立的激光谐振仪器的科学体系。

**关键词:** 激光原理; 正交偏振; 激光腔; 频率分裂; 激光回馈; 测量仪器

**中图分类号:** TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0703001

## The wind rises at the duckweed tips, the wave ripples between water gratings ——Rambling of system establishing of lasers resonance instruments

Zhang Shulian<sup>1</sup>, Liu Weixin<sup>2</sup>

- (1. State Key Lab of Precision Measurement Technology and Instruments, Precision Instrument Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China)

**Abstract:** The scientific method research is more basic than to get results. This article was a summary of the author's 30 years of scientific research path and the research results. The researches began from some fundamental problems of laser principle, and the laser resonator structure was changed by inducing special optical elements intro/extra cavity. Then various physical phenomena were found with tuning resonator of the two mirrors laser and the three mirrors laser. And we had developed several kinds of precision measuring instruments based on the newly designed laser itself. In this paper, the basic idea of the author's scientific research was summarized, and the physical phenomena found in the laser were introduced briefly, and the scientific system of the laser resonance instruments was established.

**Key words:** laser principle; orthogonal polarization; laser cavity; frequency splitting; laser feedback; measuring instruments

收稿日期: 2016-06-14; 修订日期: 2016-07-05

基金项目: 北京市科委项目(Z151100002415027); 国家自然科学基金(61475082); 国家重大仪器专项(2011YQ04013603)

作者简介: 张书练(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光器及精密测量仪器方面的研究。Email: zsl-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

## 0 引言

《红外与激光工程》邀笔者写一篇论文,内容不限。与《红外与激光工程》合作多年,思来想去,还是写一篇兼有感受和学术两者的论文吧,回应编辑部朋友们的关爱。找个词概括所要说的有点难,“风起于青萍之末,浪成于微澜之间”倒可以代表笔者对科学技术的向往和对发现、发明过程的认识。

希望副标题“激光谐振仪器体系的建立”能概括笔者的学术体系,与同行朋友们分享。也借此,回答同行们的一些提问和疑问。

## 1 学术体系

### 1.1 激光谐振仪器

谐振敏感仪器并不陌生,电容式位移传感器就是1种。2电容极板之一发生位移,2极板间相互间距离改变了,电容量改变,测出电容量的改变,就能测出位移。借助激光器谐振进行传感的典型应用案例就是激光陀螺。当环形激光腔所在的平面发生旋转,在激光腔中顺时针和逆时针行进的光束对应的谐振腔长度会反向改变,测出这一改变引起的频率差变化,就可测出环形激光器转动的速率,再积分就得出旋转的角度,这就是激光陀螺。

对于激光器,谐振腔对外界参数的敏感性早为所知。由于激光腔十分“娇气”,很易失谐,一直都难以成功实现激光谐振仪器。除了激光陀螺,其他尝试几乎没有实现成功及应用。但“天有规律必有用”,有用和无用之间仅一念之差,一线之隔。“娇气”、“失谐”也是有规律的,而且意味着敏感。敏感规律是可利用的,敏感才可成就传感器。例如光纤端面的反射会使光再入光纤,破坏光纤通信系统的工作,但这却引发了光纤光栅的发明。光纤光栅是非常好的光纤内反射镜和对长度、温度敏感的元件。

笔者课题组曾研究过激光陀螺,并一直关注它的发展。“环形”激光陀螺成功地利用了激光谐振测量飞行器、船舶等的转角,而对于同作为光振荡器的驻波激光器(“线形”激光谐振腔)并没有被利用,很可惜。对此发生了兴趣,这是学术探索最开始的出发点。

科学研究有2条路,1条是科学发展的自然延伸,如,从法拉第电磁感应定律等到麦克斯韦方程

组,完全是好奇心和兴趣的驱动,人类永远希望了解未知的世界。另1条路是应用需求,战争催生了炮弹,召唤出了原子弹。兴趣和应用两种驱动力是科技的两个轮子。

### 1.2 学术体系形成

现在笔者有1个较大课题组,30年前则是笔者孤身一人开始了激光器的频率分裂研究,目的是以“环形”激光器频率分裂为榜样,利用驻波激光器(“线形”激光器)的内部物理特性,设计出基于激光谐振的新仪器,实现对一些参量的极高敏感性的传感、测量。

“激光原理就是讲3个元件,2个反射镜和其间的1块工作介质”。这种说法并不是贬低了高大上的激光,而是高度的概括和抽象。1个老科学家几十年前说的话回答疑问。他说,牛顿定律只讲质点的3个最简单的运动,就形成了经典力学。研究力学从马拉车的辐条运动开始,产生不了伟大的学说。

笔者在3个元件的激光器内部加入另1个元件,开始了对激光中物理效应和这些效应的应用研究。这种逐步在激光器内增加元件,先观察现象后开展应用的方式贯穿了整个研究过程。30多年过去了,如长藤结瓜,一路上结下颗颗果实,至今逐步形成了系统且完整的学术体系。研究结果写成中文专著《正交偏振激光》(张书练,清华大学出版社,2005)<sup>[1]</sup>;英文专著《Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications》(Shulian Zhang, Wolfgang Holzzapfel, Wiley 和清华大学出版社分别于2013和2014印刷)<sup>[2]</sup>。

除了全新的内容外,专著也对一些原有教科书中的概念做了补充,肯定回答了一些老师和学生困惑的问题。如各项同性介质激光器的偏振态是怎样的?爱因斯坦预言受激发射光子与激发光子应该是同偏振的,那么,激光束也就应该是高度偏振的,教科书没有写出这一点。又比如,教科书讲,两模(频率)在1个烧孔中,模的强度因为模竞争而起伏。实际上,这并不正确,正确的答案是:对于类似于HeNe激光器这样综合展宽激光器,烧孔有200~300MHz之宽,但2模间隔仅在小于40MHz(左右)时才熄灭1个频率,直到熄灭前,没有功率的无规则起伏发生。

这些研究填补了很多学术空白,包括激光物理效应的研究空白,以及基于新原理的仪器空白,使十

余类新原理仪器问世并应用,形成 1 个有机结合,层层深入的学术体系。

### 1.3 解放思想,相信自己

回首研究历程,成语“风起于青萍之末,浪成于微澜之间”正可以体现这期间的从无到有,从小到大的坚持,坚持了创新,坚守了个人和课题组的价值。已站在中国大学的宝塔尖上,不能等待别人的推动。对于研究中碰到这样那样的一些疑问,在此做一些说明。

笔者认为,学术研究在不断创新,解放思想的同时,很重要的一项是相信自己。坚守“耕作于青萍之末,划浆于微澜之间”。这里的“自己”是指中国的科学界。经历了“863”,跟踪阶段结束了,迎来了万众创新。

研究项目的知名度往往来自“属于哪个级别”,“经费量级”,文章上了哪个知名刊物。这是需要的,但最核心的应该看是不是世界首创以及对社会的影响和贡献,特别是长远影响。判断这一点是困难的,但是必需的,因为它具有导向性。

国外提出的研究,常常自然地被认为重要,很快成为中国的热点,资助者放心,评价者踏实,研究者还可把责任推给国外。中国自己的思想没有人跟进。说有并非来自国外热门的原始发现,原始创新,怀疑就来了。似跟着热门去发现,跟着热门去创新才是发现和创新。热门里有创新,应该研究,可能会形成推动社会的力量,但热门里是没有最原始创新的。需要逐步学会原始创新,形成学术界的习惯。不要一提自己的发现和原始发明,首先去怀疑,应该从跟踪的习惯中解放自己了。

为了科学,为了中国的科学,真的相信国人自己,真的为国人自己的发现,为自己的发明鼓与呼。

## 2 研究布局:风起于青萍之末 浪成于微澜之间

### 2.1 激光原理的 3 元件

前文已经指出,激光器非常高大上,但却又很简单,就是 3 个元件:2 个反射镜和两个反射镜之间的 1 个(块)介质。3 个元件的激光器见图 1(a)。M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 是 2 个反射镜。激光原理课本最核心的有四章,就是讲这 3 个元件。

在激光原理书中<sup>[4]</sup>,讲 2 个反射镜的有 2 章。1 章是激光谐振腔,讲激光器的模式:横模(光束横截面上的光强分布)和纵模(激光光束包含的光谱,即激

光频率)。另 1 章是高斯光束,讲光传播时的光束直径,波面和发散角。激光原理书中有 1 章讲激光介质,叫“光和物质的相互作用”,解释原子吸收光子和发射光子的过程。把激光介质置于 2 个反射镜之间,也是 1 章,叫激光器的工作特性。

### 2.2 在激光器中引入更多元件

3 个元件 1 本激光原理书,当进一步在激光器中加入更多元件时,特别是双折射元件,将会得到更多激光新知识。课题组的任务就是在“3 个元件”激光器的基础上,在激光器内一个一个地增加元件。增加 1 个元件观察发生的现象,再看看现象可以不可以作为仪器原理。然后研究之,由知识再转化为发明,得到新的仪器(激光谐振精密仪器)。这些发现和发明已经系统整理在专著《Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications》。该书大体上一半讲物理现象,一半讲仪器。

在图 1 中给出了逐层展开这些研究的基本思路。

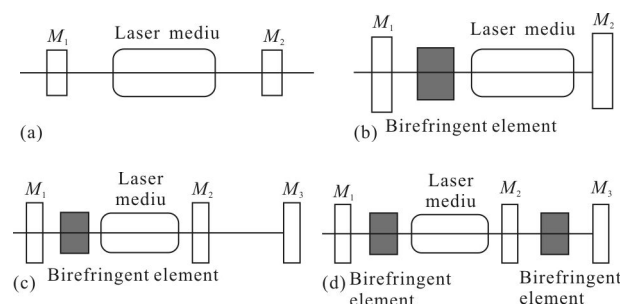


图 1 不同激光腔结构

Fig.1 Different laser cavity structure

激光器中谐振腔(M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 镜)和增益介质构成了激光器的核心部分,这是图 1(a)的形式。

如果在谐振腔内放入双折射元件,则成为图 1(b)的形式。激光器则产生正交偏振激光输出,即 1 个偏振态平行于水平面的纵模,1 个偏振态垂直于水平面的纵模。

进一步,在两腔镜之外再增加 1 个回馈反射镜 M<sub>3</sub>,就变成了图 1(c)的形式,M<sub>3</sub> 把激光器输出光再反射回激光器。由于激光器为正交偏振输出,回馈光和腔内光的作用,和激光介质的相互作用就复杂丰富得多,应用的可能性也增加了。

再进一步,在 M<sub>2</sub> 和 M<sub>3</sub> 之间放入双折射元件,就成为图 1(d)的形式。分析这种结构下的激光特性,又

观察到不少现象。

正交偏振光的特性又给出了 1 个空间: 1 个偏振光还是 2 个偏振光回馈到腔内, 这就是图 2 的结构。

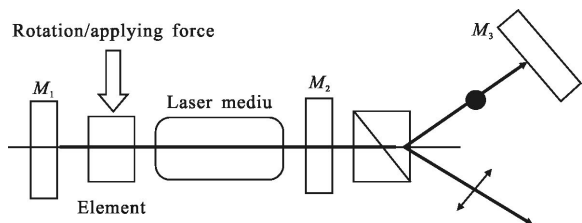


图 2 激光器本身作为传感器  
Fig.2 Laser working as a sensor

这些结构使课题组的研究一步步深入到激光器内部, 不再将激光器本身作为 1 个“黑箱”使用, 使各种物理效应放大显现出来, 找到规律, 具体在文中第 3 部分给出。

人类利用了一切物理效应进行发明创造。有了对激光物理方面的规律的新发现, 笔者就想利用这些发现进行尝试。这一试, 就有了精密测量的新原理, 试出了 3 类 10 种新仪器, 也就形成了激光谐振仪器体系。具体应用在第 4 部分给出。

这个学术体系, 是国内外以前没有的, 是从小的创新点开始, 在我国自己的研究土壤中艰难成长起来的。美国光学学会刊物 *Optics & Photonics News* 对这个学术体系给出了高度肯定的评价: "Precision metrologists have traditionally thought of lasers as mere light sources. Now, orthogonally polarized lasers are being applied as sensors themselves due to their unique intrinsic properties. They're being developed and used to measure displacement, wave plates' retardation, force and weight-and are often more accurate and affordable than currently available interferometers or inductance transducers."<sup>[4]</sup>

### 3 激光现象

对激光现象的研究最初是从 HeNe 激光器开始的, 以后扩展到固体激光器(微片 Nd:YAG 激光器)、半导体激光器 VCSEL 等。多种激光器加上图 1 给出的各种激光腔结构, 基本网尽了激光器的光学构成。根据笔者发现的激光现象, 就可以得出每种构成具有什么光强和偏振特性。关于这些物理效应, 详细内

容可参看专著: 《Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications》, 第 1~10 章。文中下面将主要发现点概括为 3 类。

#### 3.1 激光频率分裂中的物理现象

激光频率分裂是在普通激光器中(见图 1(a))所没有, 而在图 1(b)结构中常见的现象。笔者发现, 光学元件由于自然双折射, 或者加工残余的应力双折射, 放入激光腔后, 沿着双折射的 2 个方向, 会使原本长度唯一的谐振腔“分裂”为物理长度不同(光程不同)的两个腔长。结果是使激光 1 个频率(纵模)变成了 2 个频率, 并且它们的偏振方向是正交的(相互垂直)<sup>[4-5]</sup>。

在多种激光器实验了多种光学元件后, 笔者发现了共同的物理规律: 分裂的两个频率的频率差正比于双折射元件的光程差(也是相位差)。这个正比关系非常重要, 提供了 1 种激光外部(双折射元件)影响激光内部(频率或频差)的手段, 这也是多款激光谐振仪器进行测量的基础。

笔者用多个发现中的 1 个物理规律说明激光频率分裂过程。按图 1(b)给出的激光腔构成, 内部放入石英晶体(片), 同时存在双折射和旋光效应。改变光线和晶轴的夹角, 分裂的两个激光频率的差如图 3 所示<sup>[6]</sup>。转角较小时, 两种效应都起作用, 转角变大, 频差与转角成线性关系(双折射为主)。笔者运用激光振荡自洽条件和谐振腔矩阵理论成功得到了石英晶体造成频率分裂的解析关系式, 严格证明了分裂的两频率是正交偏振的, 也解释了频差曲线的“畸变”。此外, 利用加电压的 KDP 晶体, 或者加外力的玻璃片等方法, 都可以产生频率分裂。

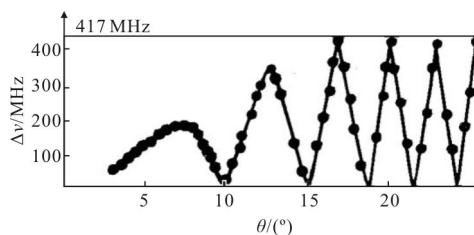


图 3 激光频率分裂随石英片旋转角度变化

Fig.3 Laser frequency splitting changed with rotation angle of quartz plate

#### 3.2 两镜激光器腔调谐中的物理现象

在笔者研究之前, 成功利用激光谐振腔调谐的实例仅有激光稳频。另外, 国内外同行也以激光谐振

腔调谐为手段,进行激光基础物理现象的研究。但是,他们的研究,或激光纵模之间的频率差无法小于 1 个纵模间隔(频差越小,模竞争效应越强烈),或多个纵模相互混在一起无法分开单独研究每个纵模的变化,导致对一些基本、重要的激光物理现象研究缺位,知识的缺漏。

采用图 1(b)的激光腔形式,使激光频差从几 MHz 到上千 MHz 之间连续可调节,然后用偏振分光棱镜 PBS 从空间分离两正交偏振光,对每个纵模进行单独、定量的研究;最后,移动腔镜  $M_2$ ,调谐激光腔长,研究不同频差下分裂纵模相互间的模式竞争、强度转移、频差调谐等情况,获得了多项发现。

其中 1 个典型的发现是确定了  $0\sim 360^\circ$  相位差的元件对应会产生 3 种光强调谐曲线<sup>[7]</sup>,如图 4 所示。研究发现,频率分裂的 2 个激光纵模存在 1 个刚好熄灭的状态,对应的临界频差为  $\Delta\nu_c$ (约为 40 MHz),元件的临界相位差为  $\phi_c$ ,则有:图 4(a)中  $\phi \geq \phi_c$ ,两正交偏振光总可以同时振荡,随腔长交换它们的强度,此消彼长,光强调谐曲线称为“模式共存曲线”。图 4(b)中  $(\phi_c/2) < \phi < \phi_c$ ,在每个周期曲线靠近中间的位置,振荡频率和熄灭频率的光强快速交换,但不能

同时存在,光强调谐曲线称为“模式跳变曲线”。图 4(c)中  $\phi < (\phi_c/2)$ ,两正交偏振光中只有其中之一可以振荡,另 1 个被完全抑制,光强调谐曲线称为“模式抑制曲线”。

需要注意的是,上面的发现说明,He-Ne 激光器的临界频差  $\Delta\nu_c$  约为 40 MHz,比这个频差小会发生强烈模竞争,反之 2 频率都能稳定存在。笔者在 Lamb 半经典理论中引入正交偏振矢量分析,建立理论模型解释了这个现象,以及其他相关的物理规律。这个发现修正了以前学术界普遍认为大于 40 MHz 时两频率处于不稳定状态的看法。

### 3.3 三镜激光器中的物理现象

图 1(c)、(d),图 2 中在激光器(三镜激光器结构)外放置反射镜  $M_3$  把激光部分或者全部反射回谐振腔,一般称作激光回馈(也叫激光自混合干涉)。在文中研究之前,国内外学术界同行无一例外都是用反射镜把激光器输出的所有纵模(频率)全部反馈回谐振腔,而不区分纵模多少和间隔大小,不区别偏振状态,不顾及频率之间的竞争。课题的研究则通过技术条件去分开不同的纵模(偏振态),分别研究单一纵模的回馈行为,研究不同纵模之间的相互耦合。

笔者对三镜激光器进行了大量研究,发现的物理现象和规律很多,详细实验和理论结果可参考专著,下面只给出 1 个代表性的结果。

如图 1(c)的激光腔结构,当反射镜  $M_3$  为高反射率且稍微偏离激光轴线(欠准直)时,观察到了“纳米级光学条纹”<sup>[8]</sup>,如图 5 所示:(1)  $M_3$  每移动  $\lambda/80$ ,光

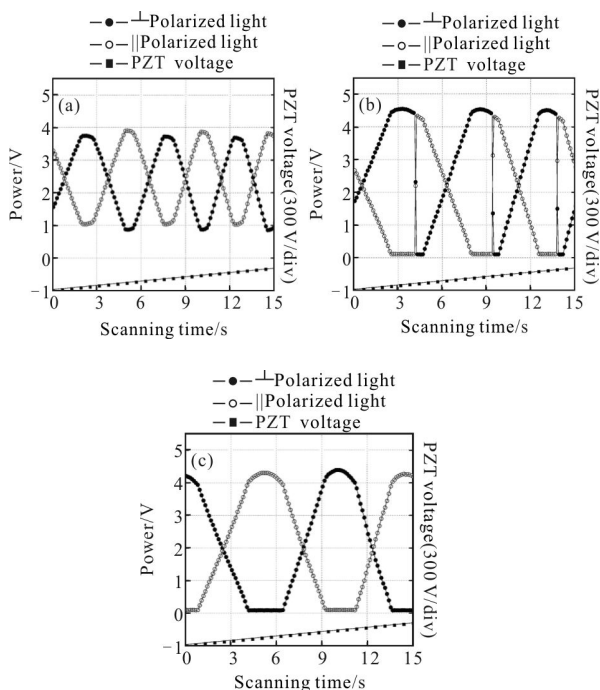


图 4 激光谐振腔调谐时两正交偏振光光强曲线

Fig.4 Laser intensity curve of two orthogonally polarized lights when laser resonator cavity tuning

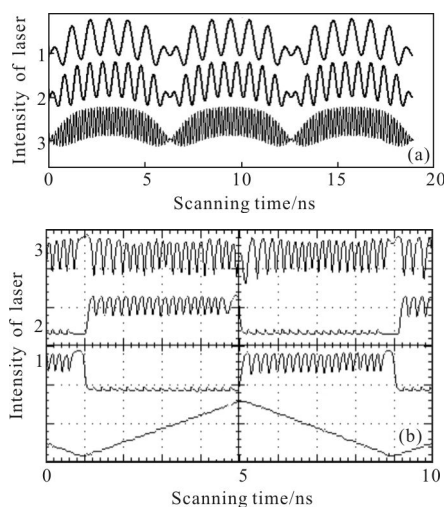


图 5 非准直外腔调谐时两正交偏振激光的光强曲线

Fig.5 Laser intensity curve of two orthogonally polarized lights when laser non-collimated feedback cavity tuning

强变化 1 个周期,产生 1 个纳米级光学条纹(对应于 7.9 nm 宽度的位移);(2)  $M_3$  镜运动方向改变 1 次,激光偏振态 90° 旋转 1 次。这就既可以实现位移测量的高倍率光学细分,也可以实现光学判向,为突破激光干涉仪仅有  $\lambda/2$  光学分辨率提供了新思路。课题组也正是利用这种光学条纹开发了纳米级光学分辨率的位移测量仪器。

#### 4 激光谐振仪器及应用

在激光物理方面有了诸多发现,进一步考虑利用笔者的发现,研制仪器,这些仪器在之前、在国外都是没有过的,因为从发现而来的原理是没有过的。

现在,这些精密测量仪器已小批量产品化的就有 4 类 10 种,还有其他正在开发和完善中的。这是笔者利用观察到的现象开展应用研究的结果,形成了 1 个在很多领域发挥不可替代作用的激光谐振仪器体系。下面分别给出它们各自的特点和应用情况,更详细的内容参看专著<sup>[2]</sup>,第 10~18 章。

##### 4.1 双折射双频激光干涉仪

众所周知,激光干涉仪是科研和工业领域常用的高精密测量仪器,能够溯源到长度基准——光波长。双频激光干涉仪由于抗干扰性好,测量精度高而成为工业测量必不可少的仪器。目前,能够从事激光干涉仪生产的仅有 Agilent, Renishaw, Zygo, JENaer 等少数国外公司,国内尚未有企业单位可提供激光干涉仪整机。

双频激光干涉仪的核心是稳频的双频 He-Ne 激光器,频差越大,可测量速度越高,现在的加工行业就越是需要。但传统的塞曼双频激光器频差一旦超过 3 MHz,激光功率急剧下降,甚至小到只有几十  $\mu\text{W}$ ,无法用于测量。笔者根据激光频率分裂的研究发现,提出将激光器的 1 个腔镜内表面(朝向谐振腔)镀增透膜,外表面镀反射膜,镜体上打孔产生应力双折射使激光频率分裂。这种激光器施加横向磁场,可使频差在几 MHz 到几百 MHz 间任意选定,这就从原理上解决了较大频差和大功率二者兼有的难题,大大推进了国内双频激光干涉仪的自主研发<sup>[9]</sup>。

图 6 中给出了为国家 02 专项研制成的双折射塞曼双频激光干涉仪,指标是:频差 3~20 MHz 及更高,稳频精度优于  $5 \times 10^{-9}$ ,出光功率大于 0.8 mW,且



图 6 双折射塞曼双频激光干涉仪激光头现场测试

Fig.6 Test of laser heads of the birefringence Zeeman dual-frequency laser interferometer

为正交线偏振光,已达到业内同类仪器技术水平,部分指标国际领先。

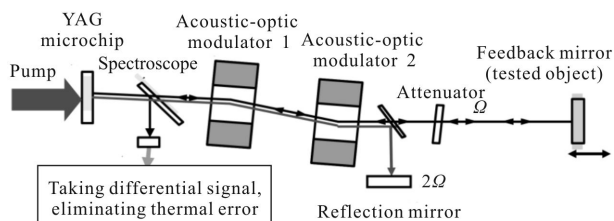
##### 4.2 微片激光回馈干涉仪

进一步思考:传统的双频激光干涉仪测量精度高,但缺点是需要高反射率的目标靶镜配合测量,这在测量微、小、轻、薄、黑、易变形,以及透明液体液面的变化等对象时就无能为力,因为无法放置相对大、沉的目标靶镜。

课题组在 Nd:YAG 激光器回馈研究中发现,在图 1(c)的激光结构下,  $M_2$  和  $M_3$  之间放置声光移频器,使回馈到谐振腔的光被移频到与固体激光器弛豫频率相接近,由于共振放大效应,回馈光信号被显著放大。这样,即使反射率极低的目标(最低到  $10^{-9}$  量级,没有目标靶镜),表面微弱的回馈光也可以被放大感知。这就是 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的最大优势。

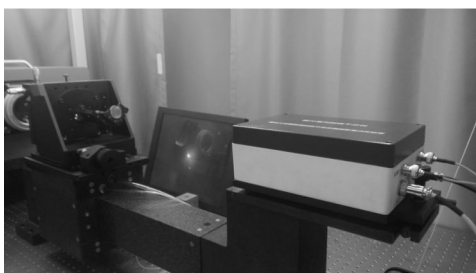
由于激光回馈干涉仪所用光学元器件较多且都处在空程中,漂移大,精度不高,设计了准共路技术消除空程误差。对于激光波长漂移,又提出了主动式温控稳频技术。在解决一系列难题后,已完成 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的产品化。图 7 中给出了这种新型干涉仪的工作原理和测试图<sup>[10]</sup>。

Nd:YAG 激光回馈干涉仪的灵敏度极高,真正实现了非接触式测量,目前是国内外唯一不需要合作目



(a) 激光回馈干涉仪原理图

(a) Schematic diagram of laser feedback interferometer



(b) 激光回馈干涉仪应用

(b) Applying of laser feedback interferometer

图 7 Nd:YAG 激光回馈干涉仪

Fig.7 Nd:YAG laser feedback interferometer

标的干涉仪(或称为第 3 代干涉仪)。其测量分辨率为 1 nm,量程可达到 5 m,激光稳频精度为  $1 \times 10^{-7}$ ,并已批量生产,有 10 多台在高校、研究所和企业使用,解决了传统激光干涉仪不能解决的许多测量难题。

### 4.3 激光纳米测尺

对于很多工业生产单位,百纳米的测量精度已足以满足使用要求,因为机械加工的精度通常在  $10 \mu\text{m}$ 。课题组在多年研究基础上,发展了多种百纳米分辨率激光长度测量仪。激光纳米测尺是其中 1 种基于激光频率分裂原理的精密测量仪器。

激光器纳米测尺是把 1 支激光器直接变成了 1 种位移传感器<sup>[11]</sup>。采用图 1(b)的激光腔结构,放入双折射元件后发生频率分裂。此时,两个腔镜之一(动镜)每移动  $\lambda/2$ ,正交偏振的 2 分裂频率会顺序出现 4 种状态:仅 // 光振荡; // 光和  $\perp$  光同时振荡;仅  $\perp$  光振荡;无光振荡。这样,每个状态对应于腔镜改变(移动)  $\lambda/8$ ,就实现了位移测量的细分和判向。而且这个过程是以激光中心波长为参考点的,因此可以自动溯源到光波长,具有自校准性。

激光纳米测尺的实物如图 8 所示,量程为 12 mm 或 100 mm(对应 632.8 nm 和 1.15  $\mu\text{m}$  两种波长的激光器),分辨率为 79 nm 或 20 nm,线性度  $5 \times 10^{-5}$ ,相关专利完成了知识产权转让。

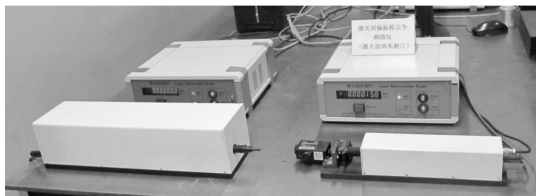


图 8 激光纳米测尺

Fig.8 Laser nanometer

### 4.4 外腔双折射激光回馈干涉仪

另外 1 种百纳米分辨率激光长度测量仪是基于激光回馈原理的,利用三镜激光器中的物理发现进行工作<sup>[12]</sup>。

图 1(c)中的三镜激光器中,在  $M_2$  和  $M_3$  之间放置  $\lambda/8$  相位差的波片,笔者发现了新的物理规律:激光器的光强调谐曲线是类正弦的,与传统的光学干涉信号相当;2 路光信号可以得到  $90^\circ$  相位差,这可以用来实现位移判向和电子细分。由于三镜激光系统只有 1 个光学通道(不同于干涉仪需要干涉臂和测量臂),可以自准直,测量更方便,结构更简单。因此,研发了激光回馈干涉仪,有 He-Ne 激光器和 Nd:YAG 激光器 2 种,分辨率分别为 15.8 nm 和 120 nm,量程 100 mm,线性度优于  $1 \times 10^{-6}$ ,很适合在工厂车间使用。

### 4.5 激光频率分裂应力/双折射测量分析仪

光学元件内残存应力表现为双折射,对光学系统的性能(如镜头成像质量)负面影响很大。光学波片是基本的光学元件,广泛应用于光通信、光存储、干涉仪、矿石分析等领域。目前常用的测量方法(如旋转消光法、电/磁光调制法等)存在明显问题:测量重复性不高于 1%;测量仪器系统误差未知;不能溯源到自然基准。

课题组根据发现的激光频率分裂原理:分裂的 2 个频率的频率差正比于双折射元件的光程差(也是相位差),研制了新型元件应力/双折射分析仪<sup>[7]</sup>。将待测元件放入谐振腔,测量分裂产生的频差大小,反推得到相位差的大小,即应力/双折射大小。这种测量的最显著优点在于:频率测量精度很高,因此频率差测量精度很高,而且测量是可以溯源到长度基准——光波长(频率对应频差对应波长),这是其他测量方法无法做到的。激光频率分裂应力/双折射测量仪的实物如图 9 所示。

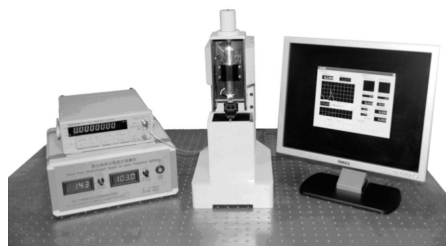


图 9 激光频率分裂光学相位测量仪

Fig.9 Optical phase measuring instrument based on laser frequency splitting

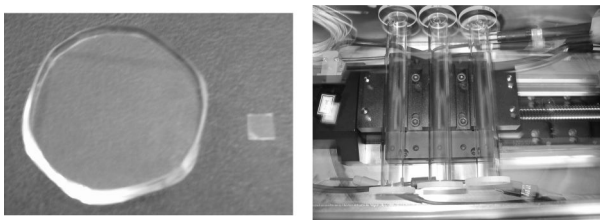
目前,该仪器的测量精度为  $2'(\lambda/10\ 000)$ ,可测

量包括 1/4 波片、半波片、带微小内应力的玻璃片等任意相位差大小的元件。因为最高的精度、长期的重复性和溯源性,2011 年,被国家标准局批准为国家标准。这是世界上第 1 个波片测量标准,有望解决世界性的不同仪器测量结果分散性太大的难题。

#### 4.6 激光回馈应力/双折射测量分析仪

激光频率分裂测量仪的缺点是对样品的表面光洁度和反射率要求很高,不适合精度较低的在线测量。为了弥补这一点,根据三镜激光器回馈中出现的 2 个偏振光模式跳变规律,研发了激光回馈应力/双折射测量分析仪,工作原理是这样的:待测元件放入图 1(b)中的  $M_2$  和  $M_3$  之间,移动  $M_3$  产生模式跳变,在  $\lambda/2$  周期内 2 偏振态光的占比与元件的相位差成线性关系。测量占比就得到了元件的应力/双折射<sup>[3]</sup>。

仪器对待测元件质量要求不高,特别适合透光性差的光学元件,可在线/在盘测量,精度与通常采用的椭圆仪相当,但结构简单,成本低很多。图 10 给出了测量的晶体和玻璃样品,精度达到  $0.1^\circ(\lambda/3\ 600)$ ,能满足大规模工业化生产和测试需求。



(a) Nd:YAG 和 GaN 晶体样品 (b) 真空玻璃管样品  
(a) Nd:YAG and GaN crystal sample (b) Vacuum glass tube sample

图 10 激光回馈应力/双折射分析仪测量样品

Fig.10 Measurement sample of laser feedback stress/birefringence analyzer

#### 4.7 激光教学仪器

激光物理是高校物理、电子、仪器及自动等专业本科生、研究生的必修课,实验教学非常重要,但是很多激光物理现象的发生条件苛刻或难以展示。笔者将多个物理现象和规律转化为可演示和操作的实验题目,开发了系列教学仪器,包括:(a) 激光横模演示系统;(b) 激光频率分裂与模竞争系统;(c) 激光腔长调谐和回馈系统,仪器如图 11 所示。

这些激光教学仪器可形象、全面进行激光原理的实验,如:激光多种高阶横模(图 12(a));激光偏振

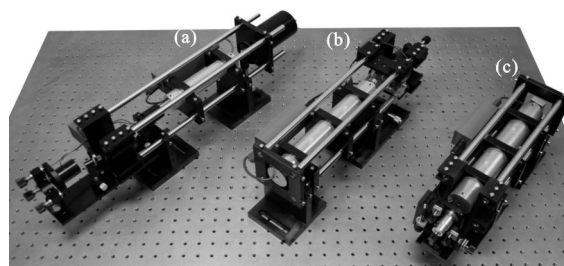
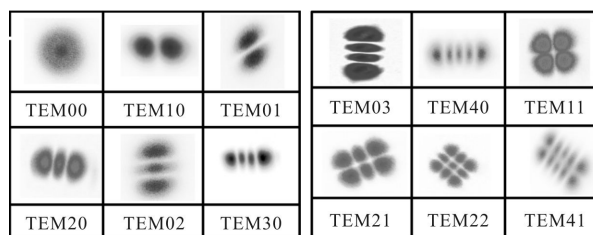


图 11 三种激光教学仪器

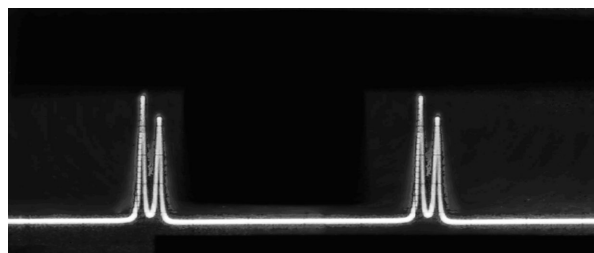
Fig.11 Three kinds of laser teaching instrument

和正交偏振;激光频率分裂(图 12(b)),激光回馈效应等。使枯燥的光学、激光、物理问题变得形象生动,可制造效应,可操作效应,可应用效应。通过实验达到深入学习光学和激光类课程的目的,训练把 1 种效应转变成另 1 种效应中的创新思维,理解发明创造是怎样得到的。目前已有 50 台教学仪器在教学和科研中应用。



(a) 激光横模

(a) Laser transverse mode



(b) 激光频率分裂

(b) Laser frequency splitting

图 12 激光教学仪演示

Fig.12 Demonstration of laser teaching instruments

## 5 结束语

从课题组多年的研究历程看,创新是推动科研不断进步、不断提升的最初动力。秉持“不新不为”的科研态度,才能在发现和发明的道路上越走越远,而最



原创的发现发明只有从基础研究中获得。课题组在完成了激光物理方面的诸多发现之后,逐步形成了系统而完整的激光谐振仪器体系,在丰富激光物理的同时,也研制了 10 多款具有自主知识产权的新型仪器,解决了行业内传统仪器所不能解决的难题。随着这些仪器的走向市场,科研成果真正实现了从 1 个学术体系到一系列实际应用的转变。这些,在 OPN(Optics & Photonics News)的评论中给出了最好的注脚:“精密测量研究者的传统思维只是把激光器看成光源……但是,(课题组)基于其独特的性质,正交偏振激光器自身被用作传感器,测量位移、波片、力和重量,具有优于传统干涉仪和电感传感器的特性。”

回顾这个过程,几句话笔者认为很重要,送给读者。要形成“不新不为”的思维习惯,要相信“天有规律必有用”的信条,相信“走的人多了就成了路”规律,相信“从众没发明”、“热门里没有原始发明”。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Shulian. Principle of Orthogonal Polarization Lasers[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [2] Zhang Shulian, Wolfgang Holzapfel. Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications [M]. Berlin: Wiley and Tsinghua University Press, 2013.
- [3] Zhang Shulian, Thierry Bosch. Orthogonally polarized lasers and their applications [J]. *Optics & Photonics News*, 2007, 18(5): 38-43.
- [4] Zhang Shulian, Guo Hui, Li Kelan, et al, Laser longitudinal mode splitting phenomenon and its applications in laser physics and active metrology sensorsp [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1995, 1(23): 1-28.
- [5] Zhang Shulian, Han Yanmei. Method and experiment of linearly splitting HeNe laser modes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, B3(6): 61-64.
- [6] Yang Sen, Zhang Shulian, The frequency split phenomenon in a HeNe laser with a rotation quartz crystal plate in its cavity [J]. *Optics Communications*, 1988, 68: 55-57.
- [7] Liu Weixin, Liu Ming, Zhang Shulian. Method for the measurement of phase retardation of any wave plate with high precision [J]. *Applied Optics*, 2008, 47: 5562-5569.
- [8] Fei Ligang, Zhang Shulian, The discovery of nanometer fringes in laser self-mixing interference [J]. *Optical Communications*, 2007, 273: 226-230.
- [9] Zhu Shoushen, Zhang Shulian, Liu Weixin, et al. Laser-micro-engraving method to modify frequency difference of two-frequency HeNe lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 63(6): 159-163. (in Chinese)
- [10] Wang Xin jun, Zhang Shulian. Quasi-common-path laser feedback interferometry based on frequency shifting and multiplexing [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 367-369.
- [11] Du Wenhua, Zhang Shulian, Li Yan. Principles and realization of a novel instrument for high performance displacement measurement-nanometer laser ruler [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2005, 43: 1214-1225.
- [12] Zhang Shulian, Liu Gang, Zhu Jun, et al. self-hybrid interference effect and its application progress in displacement measurement [J]. *Process in Natural Science*, 2005, 15(7): 788-798. (in Chinese)
- [13] Fei Ligang, Zhang Shulian. Polarization flipping in quasi-isotropic laser with optical birefringence feedback[J]. *Optical Express*, 2004, 12(25): 6100-6105.