

# 光学学报

## 双折射双频激光器及干涉仪的关键和全链条技术

张书练<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>北京镭测科技有限公司, 北京 100022

**摘要** 双频激光干涉仪功能强大, 50 年来保持良好的发展势头, 应用面(特别是在先进制造业)越来越宽广。本文以解决关键技术为线, 概述笔者及合作者经 40 年坚韧研究完成的“可伐-玻璃组装式单频 He-Ne 激光器→双折射双频激光器→双频激光干涉仪”的全链条技术。技术亮点有: 开国内可伐-玻璃组装式 He-Ne 激光器之先, 吹制工艺或成历史; 开国内外内雕应力双频激光器之先, 解大频差和高功率不可得兼之难, 保持 1 mW 功率运转而频差可以在 1~40 MHz 范围选择, 还在源头上消除了干涉仪一直存在的测量非线性误差。目前, 双折射双频激光器和干涉仪已在北京镭测科技有限公司批量生产。中国计量科学院测试结果表明, 此双频激光干涉仪非线性误差小于 1 nm, 测量 70 m 长度时误差小于 5 μm。

**关键词** 激光器; 双频激光; 干涉仪; 研究历程; 可伐-玻璃组装式结构; 技术链条; 激光雕刻

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221318

### 1 引言

1801 年, 英国物理学家托马斯·杨观察到了光的干涉现象。正如王大珩先生所说的“光学老又新”, 200 多年来, 以“光干涉”为基础的发明层出不穷, 直至近年尚有光学相干层析术(OCT)应用于临床医学领域, 有光纤光栅制作的各种传感器, 还有引力波的探测成功。最早的光学干涉仪是迈克耳孙-莫雷发明的, 采用光谱灯作为光源, 他们的干涉仪实验否定了以太的存在。激光问世后, 出现了以 He-Ne 单频激光器为光源的干涉仪, 即单频激光干涉仪。为了消除环境对干涉仪的干扰, 出现了以 He-Ne 双频激光器为光源的干涉仪, 即双频激光干涉仪。光刻机基本上都选择双频激光干涉仪来获得纳米测量精度。

激光干涉仪利用激光作为长度基准, 是先进制造业(机床、光刻机、航空、航天等)制造精度的保证。近 50 年来, 激光干涉仪的应用范围越来越广, 市场需求越来越大。制造精度和生产效率的不断提升, 对激光干涉仪的测量精度和速度提出了更高的要求。

激光干涉仪所用的“激光”束来自 He-Ne 激光器。He-Ne 激光器的谱线窄(约 1.5 GHz), 易于实现单频运转, 腔长短于 150 mm 即可; 它将功率-频率曲线标志点作为波长(频率)稳定参考, 波长(频率)的稳定度高达  $10^{-8}$  甚至  $10^{-12}$  量级; 光束灿烂橙红可见, 且器件装

调简便; 发散角非常小, 传播到百米外光斑直径仍为几毫米。因此, 至今国内外的单频干涉仪和双频干涉仪都使用 He-Ne 激光器作光源。单频激光器加磁场(塞曼效应)形成双频激光器<sup>[1]</sup>。单频干涉仪和双频干涉仪, 无论是装于光刻机的, 还是机床检测用的, He-Ne 激光器有不可动摇的地位。He-Ne 激光器也存在不足, 如与半导体激光器和固体微片激光器相比, 它体积大(典型  $\phi 20 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ), 有寿命限制。多年来, 曾有很多尝试用半导体激光器作激光干涉仪的激光源, 但至今远达不到 He-Ne 激光器的技术指标。近年来, 鲜有关于半导体激光干涉仪的试探性研究了。本课题组进行了固体微片双频激光干涉仪的研究<sup>[2]</sup>, 该干涉仪的体积小( $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ )、耗能低(小于 1 W), 虽然已得到广泛应用, 但是其目前的精度尚不可与 He-Ne 激光器干涉仪比肩。

He-Ne 激光器体积大、有寿命限制, 造成激光干涉仪也有同样的缺憾, 但在技术上, He-Ne 双频激光干涉仪还存在两个更难解的问题, 并成为瓶颈。1) 国内外早先的双频激光器靠塞曼效应产生两个频率, 频率之差在 3~5 MHz 范围内, 不能达到光刻机等要求的更大频差(如 10、20、40 MHz), 这是世界性难题。激光器频差大, 干涉仪才能提高测量速度, 提高使用时的工作效率。2) 国内外计量单位早有结论, 无论是单频还是双频激光干涉仪, 各型号都有几纳米甚至十几纳米的非

收稿日期: 2022-06-14; 修回日期: 2022-07-20; 录用日期: 2022-08-31; 网络首发日期: 2022-09-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(68978018, 69778010, 4992006, 50127501)、中德研究中心中德国际合作项目[GZ405(303/3)]、国家科技重大专项(2009ZX02208-009)

通信作者: \*zsl-dpi@tsinghua.edu.cn

线性误差(实际上,将其称为“相位小数误差”更合适),测量长度越小,非线性误差对干涉仪精度影响越大。这一误差早就被发现,并且有不少文献讨论,但一直没有找到有效的解决办法,只能知而避之。市场上的 He-Ne 激光器并不是为干涉仪而制造,用于激光干涉仪时常出现跳模,不能改制成符合双频干涉仪要求的双频激光器,因此淘汰率较高。

除了上述两个关键难题之外,对中国来说,还有一个绕不过去的坎。尽管早在 20 世纪 70 年代中国就能制造 He-Ne 激光器,但一直不能制造可伐-玻璃组装结构的功率大于 0.5 mW 的 TEM<sub>00</sub> 模的单纵模(又称为单频率)He-Ne 激光器。功率约为 1 mW 的单频 He-Ne 激光器全靠进口。通常,在单频激光器光增益路径上加磁场后(产生塞曼效应)就变成双频激光器。沿激光束方向加纵向磁场即纵向塞曼激光器,加横向磁场就变成横向塞曼激光器。在相当长的时间内,进口的大部分单频激光器不能改装成双频激光器,这成为我国制造双频激光干涉仪的障碍。

科学研究是为了解决问题的,解决国内瓶颈问题和世界难题才是创新的本意,才有意义,也才能激发研究兴趣。为此,我们设定了目标,一步一个脚印,不顾是否“热门”的拷问,遇到理论问题就解决理论问题,遇到技术关卡就解决技术问题,发表未曾报道的实验结果前自己重复确认无误,并换人重复,刨根问底,走不通了就改方案再来。经 37 年积累,我们解决了上述全部关键问题,成功研制出“可伐-玻璃组装”结构的 He-Ne 激光器,终结了我国只靠玻璃吹制 He-Ne 激光器的历史。这一长期坚持的研究打通了“单频 He-Ne 激光器→(双折射)双频激光器→双频激光干涉仪”的全技术链条,并成功实现批量生产,获得了广泛认可。研究是技术的升华,也是一场意志的磨炼。

本文将概述双频激光器和双频激光干涉仪研究过程中的技术发明和进步,以及解决的关键技术问题和达到的整体技术指标。

## 2 塞曼双频激光器的频率/功率特性和激光干涉仪的非线性

### 2.1 塞曼双频激光器的输出功率和频差的关联性

塞曼双频激光器自诞生至今,一直是双频激光干涉仪的主流光源,但它的大输出功率和大频差不可兼得,频差加大则会导致激光功率减小。

图 1 所示为传统塞曼双频激光器的原理结构<sup>[1]</sup>。M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 是一对激光反射镜,构成激光谐振腔,M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 把 He-Ne 激光放电管 T 真空密封,先抽真空再充入 He-Ne 混合气。将一纵向磁场 H(即磁场方向与光束方向平行)加在激光器上,磁场作用于激光器增益管内(直径约为 1 mm),可以得到两束圆偏振光(一束左旋光和一束右旋光),其常见的频差为 3 MHz。图 2 所示为加横向磁场的塞曼激光器,在 T 上加横向磁场(磁场

方向与光束方向垂直),得到偏振正交的两束线偏振光,其频差一般小于 1 MHz。由于频差小,加横向磁场的塞曼激光器应用不多。

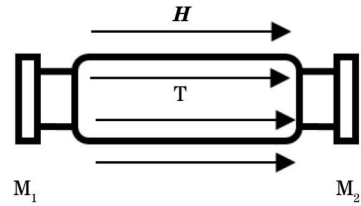


图 1 纵向塞曼双频激光器

Fig. 1 Longitudinal Zeeman dual-frequency laser

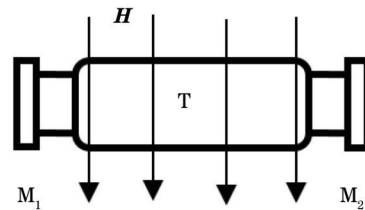


图 2 横向塞曼双频激光器

Fig. 2 Transverse Zeeman dual-frequency laser

以图 1 所示的纵向塞曼双频激光器为例,在纵向磁场(沿激光器轴线方向)的作用下,He-Ne 激光器介质中的 Ne 的光谱线分裂为两条谱线:左旋圆偏振和右旋圆偏振谱线( $\pi$  光谱线和  $\sigma$  光谱线)。如果让一个激光纵模位于两条谱线的中心频率之间,由于激活的激光介质有反常色散(折射率因光的频率变化而改变),即 Ne 的折射率随激光频率呈非线性变化,一个几何上唯一的谐振腔长变成物理上两个不等的谐振腔长:左旋光的谐振腔长度稍短于原来的腔长,右旋光的谐振腔长度略长于原来的腔长。腔长不同,则谐振频率不同,即一个频率分裂成两个频率,频差  $\Delta\nu_{\text{Zeeman}}$  可表示为

$$\Delta\nu_{\text{Zeeman}} = |\nu_0^L - \nu_0^R| \sigma_r, \quad (1)$$

式中: $\sigma_r$  为频率(模)牵引因子,约为  $10^{-3}$ ;  $\nu_0^L$ 、 $\nu_0^R$  分别为左、右旋光的中心频率。左、右旋光的中心频率之差(间隔)  $\nu_0^L - \nu_0^R$  不能大于激光介质的净增益区宽度(约 1000 MHz)。当磁场强度为 0.3 T 时,  $\nu_0^L - \nu_0^R$  已经达到 1100 MHz,超出净增益区宽度的范围。所以,塞曼双频激光器左旋光和右旋光的频差受到限制。近年来,有学者把频差  $\Delta\nu_{\text{Zeeman}}$  提高到 7 MHz,可满足光刻机的应用需求,但功率已经下降到 0.2 mW 左右。如果再靠加大磁场来获得大频差,则功率将进一步下降,成了“鬼火”,不能使用了。也就是说,塞曼双频激光器已经没有潜力可挖了。鉴于塞曼双频激光器不能同时兼顾大的输出功率和大的频差,本课题组提出并研发了“双折射双频激光器”和“双折射-塞曼双频激光器”。

## 2.2 激光干涉仪的非线性误差

激光干涉仪的干涉条纹处理存在相位小数误差,本文沿用习惯说法,称这一误差为非线性误差。使用双频激光干涉仪进行位移测量(如对光刻机工作台、机床导轨等的运动进行测量)时,测得的位移正弦信号里包含了一个附加相位,使所测得的位移与实际位移偏离线性关系,即非线性误差。位移正弦信号移动半个波长形成一个余弦干涉条纹,同时非线性误差也改变一个周期。对于 He-Ne 激光器出射激光,移动 316.4 nm,非线性误差在 316.4 nm 的中间(1/4 个激光波长处)最大,谷值出现在两侧(3/4 个激光波长处)。因此,测得的不足半个波长的位移中非线性误差具有随机性,没有办法消除。绝大部分激光干涉仪(包括单频激光干涉仪和双频激光干涉仪)的非线性误差都有几纳米甚至十几纳米。

非线性误差早在 1983 年由美国 HP 公司的 Quenelle<sup>[3]</sup>首次发现。1988 年,侯文玖等<sup>[4-5]</sup>也观察到非线性误差,并对此进行了测量,他们认为双频激光干涉仪两个不同偏振态的光束在干涉光路两臂上出现了两个频率的光混叠,由此导致非线性误差的产生。1987 年,美国 IBM 公司的研发工程师 Bobroff<sup>[6]</sup>认为非线性误差来自分光镜中频率分量泄漏,其实这也是双频的光混叠。1998 年,美国国家标准与技术研究院(NIST)的 Stone 等<sup>[7]</sup>通过旋转光路中的偏振片来观察干涉仪的非线性误差。旋转偏振片的本质是两个频率光通过偏振片后强度比例发生变化,从而改变混叠程度,导致非线性误差大小发生变化。张志平等<sup>[8]</sup>也进行了相关研究,并取得不错的效果。非线性误差是 28 nm 以下光刻机的主要误差来源,是需要解决的关键问题之一。

上述研究都观察到非线性误差,并找到激光干涉仪非线性误差的产生机制:干涉仪两臂光路上出现的两种频率光的混叠。造成频率混叠的主要因素包括:偏振分光棱镜无法使两束相互垂直的偏振光完全分开;干涉仪内光学元件并非理想器件;激光器本身出射光偏振非正交。然而,哪个因素是主要因素?没有回答。笔者认为,造成频率混叠的主要因素是把圆偏振变为垂直偏振的四分之一波片引起的相位延迟。由于世界上没有“真正”的四分之一波片,因而也就没有真正把左旋、右旋圆偏振光转化成相互垂直的两束偏振光的可能。四分之一波片总有加工误差,而且有很大的温度系数。环境温度不可能不变,四分之一波片的 90°相位延迟也就总有误差。

对于单频激光干涉仪的非线性误差,笔者认为,其主要来源是“单频不单”,如激光器腔镜由镀制在玻璃基片表面的多层介质膜构成,介质膜内的微弱双折射使激光束含有隐形的另一个光成分。

中国计量科学院将“差分 F-P 激光干涉仪”用于光学干涉仪非线性误差的测量。该系统的测量精度为 1 nm,测得的镱测双频激光干涉仪的非线性误差也是

1 nm,可达到差分 F-P 激光干涉仪的精度极限。笔者以中国计量科学院研究测得的 1 nm 为对外交流的依据。本课题组根据参考文献[4-5]的原理建立了一个使参考光和测量光比相后计算激光干涉仪非线性误差的系统,用于双频干涉仪误差研究。经由几个单位的专家组成的测试组使用自制仪器测得本课题组研制的双频干涉仪的非线性误差为 $\pm 0.15$  nm,测得某一公司生产的干涉仪(随机 1 台)非线性误差为 $\pm 2$  nm。

## 3 双折射双频激光器

为了突破上述塞曼双频激光器的两个瓶颈(如 2.1 节和 2.2 节所述),本课题组寻找新的原理,开始了后来称为“双折射双频激光器”的研究之路。

1985 年,本课题组将晶体石英片放置在激光器内,晶体石英的双折射使激光的一个频率分成两个频率,两个频率的偏振方向相互垂直(正交偏振),这就是最早以干涉测量为目的设计的双折射双频激光器。这一结果于 1988 年发表在 *Optics Communications*<sup>[9]</sup>,并申请了中国和美国专利<sup>[10-11]</sup>。两个频率光的偏振方向相互垂直是由晶体石英的天然特性决定的。1989 年,经双折射双频激光器鉴定会测定,本课题组制作的两台双频激光器的频差是几十 MHz 和一百多 MHz,证明了上述方法可行,但还不能获得小于 40 MHz 的频差,需要继续研究。

在激光器谐振腔内放置双折射元件,由于双折射元件对寻常光(o 光)和非寻常光(e 光)有不同的折射率,原本唯一的谐振腔长“分裂”为物理长度不同的两个腔长,两个谐振腔长有两个谐振频率,即发生了频率分裂,一个激光频率变成了两个。激光器输出的频差  $\Delta\nu$  可表达为

$$\Delta\nu = \left| \frac{\nu}{L} \right| \delta, \quad (2)$$

式中: $\nu$  为激光介质发光的中心频率; $L$  为谐振腔的物理腔长(忽略双折射元件的 o 光和 e 光的微小差别); $\delta$  为由双折射元件的 o 光和 e 光的光程差, $\delta = L_e - L_o$ 。若以角弧度  $\Delta\Phi$  表示该相位差, $c$  表示真空光速,有

$$\Delta\nu = \frac{c}{L} \frac{\Delta\Phi}{360} = \frac{c}{L} \frac{\Delta\Phi}{2\pi}. \quad (3)$$

在对激光产生的频差估算中,当  $\Delta\nu$  大于 40 MHz 时,式(2)和(3)的计算结果较为精确。但是,当  $\Delta\nu$  接近或小于 40 MHz 时,两式完全不适用。本课题组的理论和实验证明:当 He-Ne 激光器的两个频率之差小于 40 MHz 时,会出现强烈的激光纵模竞争,而强烈的竞争导致一个频率熄灭,频差消失,所以该现象又被称为频差闭锁;当频差大于 40 MHz 时,模竞争强度减弱,两个频率都独立稳定振荡<sup>[12]</sup>。这表明,传统观念中的由模竞争引起的功率起伏情况并没有出现,它只是缺少实验基础的猜测。顺便一提,微片激光器也不存在由竞争引入的功率起伏。

本课题组经过反复实验,从调谐激光频率(即用压

电陶瓷以 1 nm 为步距改变激光谐振腔长度)的过程中观察到:一个频率振荡会陡然变成两个频率振荡,而前者功率陡然下降一半,刚升起的频率则获得同样的功率。继续调谐腔长,最早振荡的频率会陡然消失,而后起振的频率功率升高到最大值。两个频率同振的区间宽度和一个频率独振的区间宽度因激光器腔长有所不同。此外,如果频差小于 40 MHz,在任何腔长下,两个频率之一总是熄灭的(extinguished)。图 3 所示为两个频率中一个频率生存伴随着另一个频率熄灭的过程。具有 40 MHz 间隔是两个频率都能独立振荡的条件,或是一个频率因竞争而熄灭的分界点。因激光器的差异,数据“40 MHz”不严格,不同批次之间,或者同批次不同激光器之间的差别为几 MHz,如果使用应力双折射元件,其效果和使用晶体石英相同。

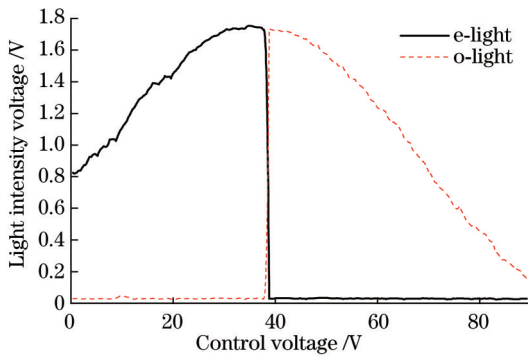


图 3 频差为 20 MHz 时的强烈模竞争:激光强度对腔长的调谐曲线  
Fig. 3 Strong mode competition curves at 20 MHz frequency difference: laser intensity versus cavity long tuning

激光束两个频率的偏振方向相互垂直(正交)是由石英晶体、应力双折射元件的光学特性决定的,这些元件与生俱来具有两个相互垂直的本征方向,决定了其在激光腔内时激光束的偏振方向具有正交性。

张书练等<sup>[13]</sup>发明了“双折射激光器窗片”和“双折射激光腔镜”的激光结构,分别如图 4 和图 5 所示,其中  $M_1$ 、 $M_2$  是一对激光谐振腔镜, T 是内充 He-Ne 气体的激光增益管, W 是一片装于激光放电管的窗口片,力 F 对径地(即沿圆片的一条直径)加在 W 上,在 W 内产生

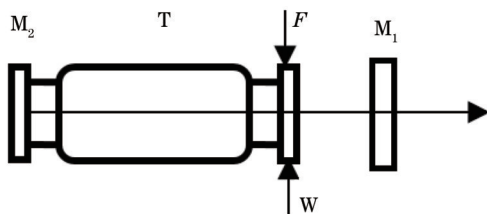


图 4 由应力双折射窗片造成频率分裂的激光器,外力加在激光增益管窗片上  
Fig. 4 Laser with frequency splitting caused by intra-cavity stress birefringence element, and the force is applied to the window plate

应力,应力使 W 变成双折射元件(双折射激光器窗片),使得激光器的一个频率被分成两个。图 5 中的  $SM_2$  也是一片光学玻璃,但内(左)面镀高质量的增透膜,透射大于 99.9%(反射率小于万分之一),其右表面镀激光输出膜(反射率约为 1%),故称  $SM_2$  为(应力)双折射激光腔镜。双折射激光腔镜是激光器成为双折射双频激光器的主要元件之一,这是因为它具有全内腔、稳定性向好的优点。这又是一项关键技术。

本课题组在早先的实验中利用金属环对径的两个螺钉加力,后改用两块弹簧片加力(图 6)。对径加力即是给圆片的一条直径的两端加力。弹簧片加力螺钉见于图 6 的  $M_2$  对称轴上的元件。2010 年,本课题组制备出由弹性加力的应力双折射双频激光器<sup>[14]</sup>。双频的产生原因是精密螺纹进给对径加力变为两个软弹簧片对径加力,从而提高了激光器的频差设定精密度。

本课题组用激光腔调谐技术对包括强激光纵模竞争在内的 He-Ne 激光光强和频差进行了系统的研究,与本文内容密切相关的是频差为 0~40 MHz 的频差闭锁区间。这一区间正好是双频激光干涉仪最有用的频差区段,测量速度快而且性价比高,这是因为绝大多数双频干涉仪的测量目标移动速度引起的多普勒效应就出现在这一区间。频差不能过大,当频差较大时,虽然测量速度较快,但与激光配套的电子系统结构会变得复杂,成本提高了,这对有些应用是不必要的。

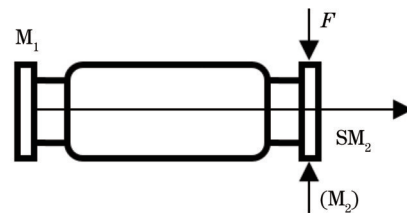


图 5 由内应力双折射腔镜造成频率分裂的激光器  
Fig. 5 Laser with frequency splitting caused by intra-cavity stress birefringence cavity mirror

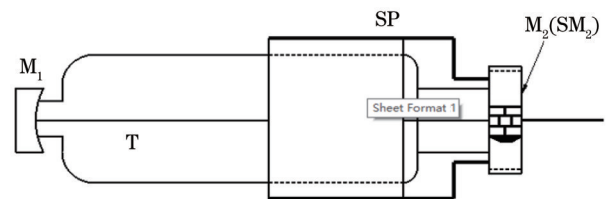


图 6 应力双折射双频激光器,利用弹力筒箍把弹簧片固定在应力双折射腔镜上  
Fig. 6 Stress birefringence dual-frequency laser in which the spring is fixed on the stress birefringence cavity by spring-loaded barrel hoop

## 4 双折射双频激光器特性的理论和实验

本课题组对双折射双频激光器的特性进行了理论

分析和实验比对。偏振正交性的原理分析主要基于矩阵理论<sup>[15]</sup>,而频率之间的竞争分析基于考虑了光场的正交偏振特性扩展的Lamb理论<sup>[16]</sup>。如同时考虑晶体石英的旋光性和双折射特性,实验曲线也可由矩阵理论计算得出<sup>[17]</sup>。在使用应力双折射激光器获得双频振荡时,式(2)和(3)已经够用,不必修正。

模竞争理论分析很繁长,因篇幅限制,本文只给出和双频激光关系密切的强模竞争的实验和理论分析。所说的强模竞争发生时,两个频率之一熄灭。

对于He-Ne气体激光器,多用基于标量平面波电场的Lamb半经典理论,与本文的频率分裂激光器的正交偏振光束不同。最初,借鉴环形激光陀螺频差修正的理论分析结果,与本课题组的实验结果相差也很大。标量Lamb理论过高地估计了模式之间的竞争强度,强模竞争区宽度超过100 MHz,而环形激光理论对竞争估计不足,算出的强模竞争区很窄,与实验结果不符。本课题组选择扩展的Lamb理论,不仅考虑了光场的正交偏振特性和原子能级的简并性,还考虑了Ne的两种同位素配比、原子之间的碰撞等因素的影响。

作为典型的强模竞争例子,图3所示为较小频差(20 MHz)下的充Ne的双同位素光强调谐曲线。所说的光强调谐曲线是用压电陶瓷推动半外腔激光器的谐振腔镜之一(如把图4的M<sub>1</sub>贴在压电陶瓷上),使激光腔长改变,激光谐振频率也改变,在激光器的谐振频率扫过激光介质增益线的过程中,观察各激光频率(纵模)强度的变化,结果如图3所示。在中心频率附近,两模(频率)强度发生突变,e光(实线)的强度突然转移给o光(虚线),这跳变是在激光器腔长改变大约1 nm内发生的。腔长的改变是由加在压电陶瓷的控制电压改变实现的。该实验结果说明,频差小于20 MHz时,两个频率中总有一个处于被抑制状态,且随腔长改变而变化角色,或胜出或被抑制熄灭交替发生。

图7给出了共存频域宽度随激光频差的变化关系。由图7可知,沿横轴正方向(调谐压电陶瓷伸缩的电压方向),双模共存区宽度先增大后减小,在频差为200 MHz左右达到最大值,当频差大于700 MHz时共

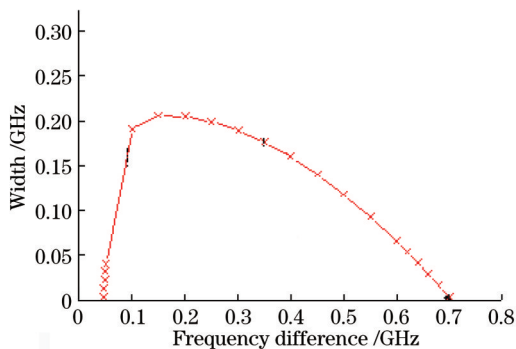


图7 两个频率共存的频域宽度和激光频差的变化关系

Fig. 7 Relationship between the width of frequency domain and laser frequency difference

存区宽度几乎降为0 Hz,这是因为能使这么大频差的两个频率同时位于增益线内的频率范围很小。而对于双频激光器,特别关注曲线最左侧,在约40 MHz处,共存宽度几乎直线下降,趋于0 Hz,即两个频率之差小于40 MHz时,共存宽度为0 Hz,两个频率之一熄灭,频差消失。

## 5 双折射-塞曼双频激光器

对于常规双频激光干涉仪应用来说,40 MHz的频差偏大,且频差大了,信号处理成本升高。本课题组进一步寻找产生小于40 MHz频差的方法,发现准共路的双-双折射元件(一片方解石和一片石英晶体)方案可有效消除模竞争<sup>[18]</sup>。其要点是:用一片方解石使激光束分解为两束平行传播的光束(在内径为1.2 mm的毛细管内),这两束光的间距为0.2 mm,而石英晶体可调整平行光束的频差。这一方案可行但器件结构复杂,后来被“双折射+磁场”方案取代。

双折射+磁场,即首先由双折射造成激光器频率分裂,形成的激光束含有偏振方向相互垂直(或正交偏振)的两种光成分;然后在激光器上加横向磁场,所产生的横向塞曼效应使增益原子分成两群—— $\pi$ 群和 $\sigma$ 群<sup>[19]</sup>。 $\pi$ 群和 $\sigma$ 群原子自发发射的光子偏振方向相互垂直。此时的激光谐振腔内,双折射的方向规范光子的偏振方向与其两个相互垂直的主方向一致,且光子期待被激光介质增益放大;介质原子已经被磁场分为 $\pi$ 群原子和 $\sigma$ 群原子,它们自发发射光子的偏振方向也是相互垂直的。 $\pi$ 和 $\sigma$ 原子在高能态上“等待”与自己偏振方向一致的光子“撞击”,发射出一个光子回到下能级,贡献于光放大。于是,正交偏振的光“各吃各粮”,它们之间的相互竞争不存在了,任何小于40 MHz频差的激光都能独立振荡。有双折射,又有横向磁场,两者的方向需要调成一致<sup>[20]</sup>。

这种两束正交偏振光平分增益原子的方法非常有效且简单易行,是另一项关键技术。将塞曼效应加于He-Ne激光器来发明塞曼双频激光器是前人的成就,而把塞曼效应用于为已经运行的由双折射造成的两个频率分配增益原子则是本课题组的贡献。

图6所示为由内应力双折射腔镜造成频率分裂的双频激光器。以这一方案为基础制成的双频激光器曾在中国、德国、韩国应用。本课题组进一步研究用于干涉仪产品的方案——“内雕应力”双折射双频激光器。

## 6 内雕应力双折射-塞曼双频激光器

任何科技领域的发展都依赖技术链条的进步,进步的发生主要是引入其他领域的新成果或交叉多个学科的知识,动力是永远寻找不足并给出解决方法。我们认识到,第5节所述的双折射-塞曼双频激光器还有缺点:结构较复杂,韩国和日本企业希望频差的稳定度还能进一步提高。于是,本课题组进一步提出了“内雕

应力”的概念,并分析了产生双频的原理<sup>[20]</sup>。任何一种材料,当人为切割或在其表面和内部打孔时,材料的内部应力都会改变。对于光学镜片,在激光腔镜表面或基片内部造孔或穴,激光腔镜内的应力都会发生改变,即双折射效应引起了光学相位延迟的改变,由式(2)、(3)可知,激光器输出的频差就会改变。而且,可以算出,让激光器产生数 MHz,甚至几十 MHz 的频差,所需的双折射相位延迟很小。本课题组先用细钻头进行实验,证实了其可行性,又用窄脉冲激光“雕刻”激光器光路上元件,提高了微调频差的控制精度,再用飞秒激光进一步提高了控制精度并缩短了应力趋稳的时间。

2011 年底,利用激光打标内雕技术产生双频,见图 8。图 8(a)所示为激光器结构,图 8(b)为激光输出镜剖面示意图。PMF<sub>1</sub>和 PMF<sub>2</sub>是一对磁条, M<sub>1</sub>和 M<sub>2</sub>是激光腔镜, IS 和 EF 分别对应 M<sub>2</sub>的左表面和右表面。PF 是由 M<sub>2</sub>基片内聚焦的脉冲激光烧出的熔斑。内应力大小、方向由焦斑数量及在基片内部的坐标控制。内应力使激光器一个频率分裂成间隔可控的两个频率。两个频率的光偏振态相互垂直(或称为正交偏振),单频激光器变成双频激光器。这又是一项关键技术。本课题组致力于寻找最便捷、稳定、可靠地让单频激光器变成双频激光器的方式,现在,落实到“内雕应力”产生双折射,从而使得激光器输出双频激光束。两个频率的光偏振态相互垂直可由光弹性理论说明。

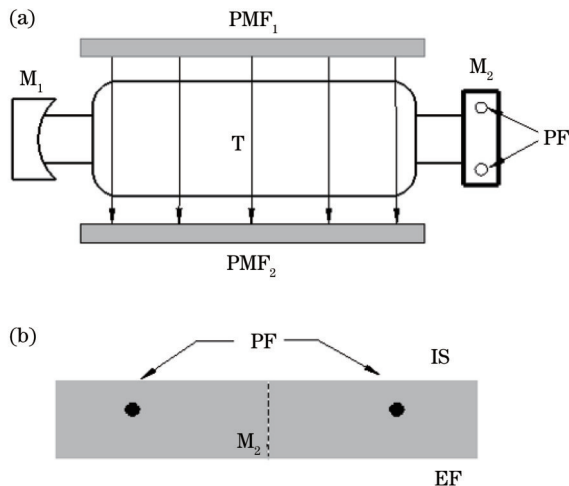


图 8 激光内雕应力双频激光器。(a)激光器结构;(b)激光输出镜剖面示意图

Fig. 8 Internal engraving stress dual-frequency laser. (a) Laser structure; (b) cross-section of laser output mirror

为了避免两个频率对激光增益的竞争导致其一失败而熄灭,也在激光器上加横向磁场,使得增益原子分成两群—— $\pi$ 群和 $\sigma$ 群<sup>[21]</sup>,各自放大与自己同偏振方向的光子,即使频差再小,也能独立振荡输出,各自作为激光干涉仪两臂之一的光束。

“内雕应力”双折射双频激光器的功率可大于 1 mW,频差可以是 3、5、7、10、20、40 MHz 或更大。对

传统塞曼双频激光器的研究在近两年也有一定进步,国外推出频差为 7 MHz 的塞曼双频激光器,但其功率只有 0.2 mW,这已经是塞曼激光器的极限。同时具有大功率(1 mW 以上)和大频差(几十 MHz),高频差稳定是内雕应力双折射双频激光器的鲜明特征。

“内雕应力”双折射双频激光器不仅用于国产双频激光干涉仪,也用于运行中光刻机的激光器替换,同时为科研单位的科学研究提供了支撑。将该激光器替换正在服役的进口光刻机的原有激光器,可使光刻机的机台误差由 24 nm 下降到 6 nm。

## 7 可伐-玻璃组装式(无吹制)He-Ne 激光器研制

国内研究 He-Ne 激光器的历史很长,产出成果较多,但稳定度最高的是张斌等<sup>[22]</sup>研究的微晶玻璃腔体单频激光器,笔者曾经获得授权使用这种结构的半外腔激光器作为纳米测尺(激光正交偏振竞争纳米测尺)研究的光源。鉴于市场和技术的原因为,我国一直靠进口满足对功率约为 1 mW、长度为 150 mm 的可伐-玻璃组装式单频 He-Ne 激光器的需求,又鉴于内雕应力双频激光器的内雕必须在自己的激光器中实现,自己研究、制造激光器成为必须。本课题组两个研究方向并进:一方面,基于国内吹制激光器的技术探索单频 He-Ne 激光器必须满足的设计参数(腔长、增益、损耗、玻璃材质、腔镜曲面和反射率、镀膜、毛细管参数、充气比压等),成功研制出国产单频 He-Ne 激光器,随后批产,并加工成双频激光器;另一方面,开展可伐-玻璃组装式 He-Ne 激光器研究,以期最终淘汰国内市场上贯制的吹制激光器技术。吹制激光器的壁厚、圆度、同心度、长度等参数全靠人工利用眼睛判断,均匀性和一致性均较差。激光器工作时高压放电,管体温度处处不同,造成功率稳定性差、光束的角向漂移大等缺憾。

可伐-玻璃组装式 He-Ne 激光器的全部零部件都由机械加工而成,零件精度高,并由可伐-玻璃封接技术把激光器壳体、放电管、激光反射镜等零件组装封接为一体。经过近 7 年的努力,终于在 2022 年 1 月研制成功(图 9),现已批量生产。从此,该激光器的功率稳定性提高了一个量级,启动时间从 1 h 缩短为 15 min,出射光束的角向漂移也提高了一个量级。该激光器不仅为激光干涉仪提供了可供选用的激光器,同时将使整个国产 He-Ne 激光器告别吹制,进入一个新的技术高度,结束了我国 50 年一直靠吹制而没有可伐-玻璃组装式 He-Ne 激光器的历史。

## 8 双频激光干涉仪的技术指标

由于各区块技术都是自行发展的,因此本节不全面介绍双频激光干涉仪技术。目前国内外激光干涉仪的总体结构都离不开迈克耳孙干涉仪的光路,有非常多的文献可以参阅。



图9 可伐-玻璃组装内雕应力双频激光器(镭测科技提供)  
Fig. 9 Kovar-glass assembly-internal sculpting stress dual-frequency laser (provided by Beijing Leice Technology Co., Ltd.)

需要强调的是,有了可伐-玻璃组装式激光器和内雕应力双频激光器,双频激光干涉仪就有了强力的心脏,有了自主可控的基础。本课题组的工作是全面设计干涉仪的光、机、电、算模块。激光稳频不再使用偏振分光器和两个探测器比较功率(强度)的方案,而是使用尾光并采用液晶旋光器和单探测器,避免了两个光电探测器性能的不一致;再次改进内雕技术;采用加宽的磁场并精密调节间距;采用折叠光路;设计高标准的扩束准直器;设计可灵活快速调节的云台;设计光探测器,放大器,相位卡,温度、湿度、气压传感器和校准系统;等等。时至今日,可伐-玻璃组装式双折射双频激光器(非吹制)和干涉仪已批量生产,能够满足科学研究和产业的需求。

中国计量科学院对该双频激光干涉仪的测试结果如下:频率稳定度为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ ,分辨率为1 nm,非线性误差小于1 nm,70 m长度测量误差小于 $5 \mu\text{m}$ 。这些数据来自中国计量科学院测试证书,证书编号为CDjx 2014-2352、CDjx 2018-4810、CDjx 2020-04463等。

## 9 结束语

介绍了双频激光干涉仪全链条技术及其研究过程,包括可伐-玻璃组装式激光器、内雕应力双频激光器、双折射双频激光干涉仪。简述了传统塞曼双频激光干涉技术的两个瓶颈,即测量的非线性误差、大频差/高功率不可兼得。讨论了“瓶颈”的物理起因,说明了突破这些瓶颈遇到的不可逾越的困难。为了发展激光干涉仪,本课题组不走由“塞曼效应”产生圆偏振光的路径,而是走上由“双折射效应”产生正交偏振光、由“塞曼效应消除强模竞争”的征程。

研究期间,经历了多次否定之否定,体会了发表具有创新性高水平文章的不易,也体会到高水平文章距离实际应用的千里之遥,要创造成功必须跨越基础研究和试错这两个台阶。笔者多年指望把发明的技

术转移到企业,实现发明者脱手,企业完成转化,但发现这条路艰难难行。仅就由双折射效应产生的正交偏振双频激光振荡而论,经历了太多次方案的进步与否定。由激光器内石英晶片产生双频,把石英晶片做成激光反射镜(对着增益管的通光面镀增透膜;另一通光面镀高反射膜,即激光腔镜),在半外腔激光器增透窗片上施加应力(即弹性力学中的光弹效应),把全内腔激光器的激光腔镜做成双折射应力腔镜,做加力框用细牙螺丝对圆腔镜的一条直径两端加力,用一对弹簧片施加应力,并用激光内雕在激光双折射腔镜内形成微斑,进而形成双频。

我们遇到的另一个实际问题是:国内生产He-Ne激光器几十年,但还不能制造可伐-玻璃组装结构的单横模单纵模的激光器,脖子被卡,只能自己研发。经过7年的努力,终于成功了。有了双折射-塞曼双频激光器这个核心器件,双频激光干涉仪的研制进展顺利。但面对实际应用,客户希望仪器易于现场安装,鲁棒性强,经几年的试错、改进,终于达到了这些要求。

笔者在本项研究中发表的论文和授权专利数量较多,因篇幅限制,本文仅列出少数作为参考文献。如需更多,可见专著《不创新我何用,不应用我何为——你所没有见过的激光精密测量仪器》所列参考文献表。

**致谢** 感谢清华大学校内、校外的合作者,感谢本课题组的博士、硕士研究生,以及北京镭测科技有限公司的工程师们的坚持。

## 参 考 文 献

- [1] 周炳琨,高以智,陈侗嵘,等.激光原理[M].6版.北京:国防工业出版社,2014.  
Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R. Principle of laser[M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [2] Chen H, Zhang S L. Microchip Nd: YAG dual-frequency laser interferometer for displacement measurement[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 6248-6256.
- [3] Quenelle R. Nonlinearity in interferometric measurements[J]. Hewlett-Packard Journal, 1983, 34(4): 10.
- [4] 侯文攻,裘惠孚.塞曼激光的偏振椭圆化对外差式交流比相干涉测量的影响[J].计量学报,1988(3):199-202.  
Hou W M, Qiu H F. The influence of elliptical polarization of Zeeman-laser upon the heterodyne phase comparing interferometry[J]. Acta Metrologica Sinica, 1988(3): 199-202.
- [5] Hou W M, Zhao X B. Drift of nonlinearity in the heterodyne interferometer[J]. Precision Engineering, 1994, 16(1): 25-35.
- [6] Bobroff N. Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity[J]. Applied Optics, 1987, 26(13): 2676-2682.
- [7] Stone J A, Howard L P. A simple technique for observing periodic nonlinearities in Michelson interferometers[J]. Precision Engineering, 1998, 22(4): 220-232.
- [8] 张志平,杨晓峰.激光外差干涉技术在光刻机中的应用[J].激光与光电子学进展,2022,59(9):0922017.  
Zhang Z P, Yang X F. Application of laser heterodyne interference technology in lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922017.
- [9] Yang S, Zhang S L. The frequency split phenomenon in a HeNe laser with a rotational quartz plate in its cavity[J]. Optics

- Communications, 1988, 68(1): 55-57.
- [10] 张书练, 杨森, 郭敏贤, 等. 石英晶体调谐 He-Ne 双频激光器: CN2053386U[P]. 1990-02-21.  
Zhang S L, Sen Y, Wu M X. He-ne dual-frequency laser with quartz crystal tuning: CN2053386U[P]. 1990-02-21.
- [11] Zhang S, Yang S, Wu M, et al. Quartz crystal tuning HeNe double frequency laser: US 05091913A[P]. 1992-02-25.
- [12] Zhang S L, Li K L, Wu M X, et al. The pattern of mode competition between two frequencies produced by mode split technology by tuning of the cavity length[J]. Optics Communications, 1992, 90(4/5/6): 279-282.
- [13] 张书练, 肖岩, 李岩, 等. 二维施力方式的塞曼双折射双频激光器: CN2506002[P]. 2002-08-14.  
Zhang S L, Xiao Y, Li Y. Dual-refraction dual-frequency Zeeman laser device with stable frequency difference and its method for stabilizing frequency difference: CN2506002[P]. 2002-08-14.
- [14] Zhou L, Zhang S, Guo H, et al. Precision controlling of frequency difference for elastic-stress birefringence He-Ne dual-frequency lasers[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(11): 3141-3144.
- [15] 郭继华, 神帅, 蒋建华, 等. 双折射双频激光器偏振特性的分析[J]. 光学学报, 1996, 16(1): 32-36.  
Guo J H, Shen S, Jiang J H, et al. Study on polarization state of a He Ne laser with a activity plate in its cavity[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(1): 32-36.
- [16] 宗晓斌. 频率分裂激光器的调谐分析及在任意波片测量中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2005.  
Zong X B. Tuning analysis of frequency splitting laser and its application in arbitrary wave plate measurement[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [17] 郭继华, 神帅, 蒋建华, 等. 双折射双频激光器频差特性分析[J]. 光学学报, 1996, 16(6): 716-720.  
Guo J H, Shen S, Jiang J H, et al. Study on beat frequency of a He-Ne laser with an activity plate in its cavity[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(6): 716-720.
- [18] Zhang S L, Jin Y Y, Fu J, et al. Mode suppression, its elimination, and generation of small frequency differences in birefringence He-Ne lasers[J]. Optical Engineering, 2001, 40(4): 594-597.
- [19] 张书练, 韩艳梅, 金玉叶, 等. 没有频率差闭锁的双折射双频激光器及其频差精度控制方法: CN1233092[P]. 2003-02-12.  
Zhang S L, Han Y M, Jin Y Y, et al. Birefringent dual frequency laser without frequency difference locking and its frequency difference accuracy control method: CN1233092[P]. 2003-02-12.
- [20] 张书练. 不创新我何用, 不应用我何为: 你所没有见过的激光精密测量仪器[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.  
Zhang S L. What can I do without innovation? What can I do without application: a laser precision measuring instrument that You have never seen before[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [21] 张书练, 朱守深, 李岩. 一种氦氖双频激光器频差产生和赋值方法: CN102780154B[P]. 2014-03-19.  
Zhang S L, Zhu S S, Li Y. A method for generating and assigning frequency difference of HeNe double frequency laser: CN102780154B[P]. 2014-03-19.
- [22] 张斌, 龙兴武, 刘贱平, 等. 微晶玻璃腔体一体化兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器 ( I ): 结构与工艺[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0814005.  
Zhang B, Long X W, Liu J P, et al. Lamb-dip frequency-stabilized He-Ne laser with an integrated cavity made of zerodur ( I ): structure and techniques[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0814005.

## Key and Whole-Chain Technologies for Birefringent Dual-Frequency Lasers and Interferometers

Zhang Shulian<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup>Beijing Leice Technology Co., Ltd., Beijing 100022, China

### Abstract

**Significance** The laser interferometer with a wavelength of 632 nm is the length benchmark of today's nano age and is also the precision guarantee of advanced manufacturing (machine tools, lithography machines, aerospace, etc.). The spectral line of the helium-neon (He-Ne) laser with a wavelength of 632 nm is narrow and has a natural highly stable frequency point that can be regarded as the mark point of the high stability of frequency (wavelength). The light with a wavelength of 632 nm is orange-red, which can facilitate the alignment of light paths. These excellent characteristics of the He-Ne laser make it the best choice as a light source for single-frequency laser interferometers and dual-frequency laser interferometers. Most lithography machines choose dual-frequency laser interferometers to guarantee nanoscale measurement accuracy. Due to their large size and limited lifetime, numerous research was conducted to replace He-Ne lasers with semiconductor lasers but failed.

Due to the limited lifetime of He-Ne lasers, interferometers used in lithography and other applications often need to be stopped to replace the end-of-life lasers. However, the following are the real bottlenecks confronted, which need to be studied preferentially. First, we used to transform single-frequency lasers into dual-frequency lasers by the Zeeman effect (Figs. 1-2). One drawback of Zeeman dual-frequency lasers is that a large frequency difference and high power cannot be achieved simultaneously; in other words, if the frequency difference is large, the power becomes small, which cannot meet



the larger frequency difference (such as 10, 20, and 40 MHz) requirement of lithography machines. Second, as early as 1983, it was discovered that either single-frequency or dual-frequency laser interferometers have a nonlinear error as large as a few nanometers or even dozens of nanometers. This error has long been found by foreign measurement units and National Institute of Metrology of China, but it has not been solved.

In this regard, China faces the problem that it cannot manufacture the He-Ne lasers of the kovar-glass assembly structure for laser interferometers. Such He-Ne lasers purchased in the market have a high elimination rate due to frequency instability and mode jumps.

**Progress** To break through the two technical bottlenecks of Zeeman dual-frequency lasers, our research team started the study of the birefringent dual-frequency laser. In 1985, we placed a crystal quartz plate inside a He-Ne laser. The birefringence of crystal quartz caused the laser frequency to split, and one frequency was divided into two frequencies with orthogonal polarization. Subsequently, the frequency splitting is caused by the stress birefringence inside the optical glass plate in the laser, and then the stress birefringence cavity mirror causes the laser to produce two frequencies. By the stress birefringent cavity mirror, the surface of the mirror substrate facing the laser gain tube is coated with an anti-reflection film so that the laser beam passes through without loss. The other surface of the mirror substrate is coated with a laser reflection film as the laser cavity mirror (Figs. 4-6). The stress in the optical substrate causes the laser to change from single frequency to double frequencies. This laser can emit a frequency difference of more than 40 MHz, but it can achieve a frequency difference of less than 40 MHz.

The frequency difference from 1 MHz to 40 MHz is the most useful interval for dual-frequency laser interferometers as the Doppler frequency shift caused by the velocity of the measured target displacement is in this region for most dual-frequency laser interferometers. If the laser frequency difference is large, the electronic system matching with the laser will be complicated and costly, which is unnecessary for some applications.

The experiments show that when the difference between two frequencies is less than 40 MHz, the coexistence width of the two frequencies is zero; with one extinguished, the frequency difference disappears. The reason why the frequency difference of less than 40 MHz cannot be obtained is theoretically analyzed, namely that the intense mode competition of the laser makes one of the two frequencies extinguished. The scalar Lamb theory overestimates the competition intensity between modes while the Lamb ring laser theory underestimates the inhibitory effect of competition on one of the two frequencies, which is inconsistent with our experiments. We choose the extended Lamb theory and consider the effects caused by the orthogonal polarization characteristics of laser beams, the degeneracy of the atomic energy level, the ratio of two isotopes of Ne, the collision between atoms, and other factors. The theoretical analysis results are consistent with the experimental results. It is shown that when the frequency difference is less than 40 MHz, one of the two frequencies is always in the suppressed state and alternates between winning and being extinguished due to the change of the cavity length (Fig. 3). The relationship between the width of the coexistent frequency domain of the two frequencies and the laser frequency difference is calculated (Fig. 7).

Furthermore, our team looks for a method to generate a frequency difference less than 40 MHz. First, the frequency of the laser is split by birefringence; as a result, a laser beam contains two optical components with perpendicular (or orthogonal) polarization to each other. Then, a transverse magnetic field is applied to the laser, and the transverse Zeeman effect divides the gain atoms into two groups. Thus, each one of the two polarized lights obtains a gain from its atomic group, and there is no competition between them so that the two frequencies with a difference of less than 40 MHz can oscillate independently. The main direction of birefringence and the transverse magnetic field direction should be consistent.

We put forward the concept of "internal engraving stress" for generating dual frequencies. The narrow-pulse laser is focused on the inside of the cavity mirror substrate to engrave the stress birefringence of the He-Ne laser (Fig. 8). The "internal engraving stress" improves the precision of the frequency difference. The polarization of light at two frequencies is perpendicular to each other, which can be explained by the photo-elastic theory. A birefringence-Zeeman dual-frequency laser is made by adding the transverse magnetic field to the internal engraving stress birefringence dual-frequency laser. In a wide range of applications, this laser has proved its excellent characteristics.

The internal engraving stress dual frequencies need to be implemented directly for the He-Ne laser. Hence, a dual-frequency He-Ne laser with kovar-glass structure is developed, which has the power of about 1 mW and a length of about 150 mm (Fig. 9). At the same time, it solves the problem that China was unable to manufacture He-Ne lasers of kovar-glass structure, as well as the problem of the high elimination rate of He-Ne lasers in the manufacturing of laser interferometers.

The birefringent dual-frequency lasers with kovar-glass assembly structure (non-blowing technology) and interferometers have been mass-produced, and so are the temperature, humidity, pressure sensors, and calibration systems, which meet the needs of scientific research and the industry. The dual-frequency laser interferometer is tested by National Academy of Metrology of China, and the results are as follows: the frequency stability is  $10^{-8}$ - $10^{-9}$ ; the resolution

is 1 nm; the nonlinear error is less than 1 nm, and the length measurement error of 70 m is less than 5  $\mu\text{m}$ .

**Conclusions and Prospects** This paper introduces the whole-chain technology of dual-frequency laser interferometers completed by our research team, including the laser with kovar-glass assembly structure  $\rightarrow$  internal engraving stress birefringence dual-frequency laser  $\rightarrow$  birefringent dual-frequency laser interferometer. We solve the two bottlenecks of the traditional Zeeman dual-frequency laser interferometry, namely, the nonlinear error of measurement as large as a few nanometers or even more than 10 nm and the impossible coexistence of a large frequency difference and high power. The laser power is 1 mW, and the frequency difference ranges from 1 MHz to hundreds of MHz, with a nonlinear error of less than 1 nm. Upon the replacement of the failed laser for a lithography machine, the positioning error of the workbench is reduced to a quarter of what it was.

Our team has carried out research on the solid-state micro-chip dual-frequency laser interferometer, which is smaller in size (e.g., 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  1 mm) and consumes less power (less than 1 W) than the He-Ne laser interferometer and can achieve nanoscale resolution. Despite its wide application scope, its accuracy is not comparable to that of the He-Ne laser interferometer. It seems that the He-Ne dual-frequency laser would remain the main source of the interferometer for a long period of time, but it is hoped that one day the solid-state micro-chip dual-frequency laser interferometer will have the same accuracy as the He-Ne dual-frequency laser interferometer.

**Key words** lasers; dual-frequency laser; interferometer; research history; kovar-glass assembled structure; technology chain; laser engraving