

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: LIU Qiang, WANG Zaiyuan, WANG Jiehao, et al. Research Progress on Low-noise Laser for Space-based Gravitational Wave Detector (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7):0751409

柳强,王在渊,王洁浩,等. 面向空间引力波探测的低噪声激光器研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7):0751409

# 面向空间引力波探测的低噪声激光器研究进展 (特邀)

柳强<sup>1,2</sup>, 王在渊<sup>1,2</sup>, 王洁浩<sup>1,2</sup>, 李宇航<sup>1,2</sup>

(1 清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

(2 光子测控技术教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:**低噪声激光器是空间激光干涉仪引力波探测器的核心组件之一,激光器的输出功率、强度噪声、频率噪声等性能直接影响空间引力波探测器的灵敏度。空间引力波探测器对激光器的结构设计、噪声水平等提出了严格的要求。本文介绍了空间引力波探测器的目标和对激光器的要求,分析了激光器噪声性能对探测器灵敏度的影响,梳理了国内外典型探测任务中低噪声激光器研究进展,比较了不同激光器的噪声性能。最后,阐述了强度噪声抑制和频率噪声抑制的原理和进展,并对国内空间引力波探测用的低噪声激光器的研究进行了展望。

**关键词:**空间引力波探测;低噪声激光器;主控振荡功率放大;强度噪声抑制;频率噪声抑制

中图分类号:TH744

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225107.0751409

## 0 引言

爱因斯坦在 1916 年发表的广义相对论中预言了引力波的存在<sup>[1]</sup>。由于引力波信号非常微弱,需要灵敏度极高的探测器才能探测。在经历了以韦伯共振棒为代表的引力波探测器的失败后<sup>[2]</sup>,人们提出了用激光干涉仪探测引力波的构想<sup>[3]</sup>。2015 年,利用灵敏度为  $10^{-23}$  量级的第二代激光干涉仪引力波探测器(advanced LIGO, aLIGO),人类探测到第一个引力波事例 GW50914<sup>[4]</sup>。至今,以 LIGO 为代表的地面激光干涉仪引力波探测器已经探测到 50 多个引力波事例<sup>[5]</sup>。事实证明,激光干涉仪(Laser Interferometer)探测灵敏度高,频带宽度大,具有广阔的发展前景,是目前引力波探测器中的主流设备<sup>[6]</sup>。引力波已经成为人类观测宇宙的新窗口,开展引力波探测对研究宇宙的起源和进化具有重要的意义,是当代物理学重要的前沿领域之一<sup>[7]</sup>。

引力波覆盖的频率范围非常宽,在低频段存在更高红移、更大特征质量和尺度的引力波波源。如正在吞噬周围天体的超大质量黑洞,由于其辐射的引力波频率较低,一般为 mHz 量级<sup>[6]</sup>,受限于地表震动、引力梯度噪声等因素的影响,采用地面引力波探测器难以实现低频段的引力波探测。1990 年,欧洲空间局(European Space Agency, ESA)提出用激光干涉仪空间天线(Laser Interferometer Space Antenna, LISA)探测低频段的引力波<sup>[8]</sup>。其原理是利用空间相距十万甚至上百万千米的测试质量把引力波信号转化为测试质量间距变化的信号,然后利用高精度的激光干涉仪测量出该变化信号。因此,高精度的空间激光干涉测距系统,是获取引力波信号的直接手段<sup>[7]</sup>。

激光器作为激光干涉仪的核心组件,其性能对空间引力波探测器的灵敏度具有十分重要的影响。例如,进入激光干涉仪的激光功率大小决定了引力波探测器的散粒噪声;激光的功率波动导致测试质量位置

基金项目:国家重点研发计划(No. 2020YFC2200403)

第一作者:柳强(1971—),男,教授,博导,主要研究方向为全固态激光及频率变换技术、光场调控技术、激光探测技术等。Email: qiangliu@tsinghua.edu.cn

共同第一作者:王在渊(1981—),男,博士研究生,主要研究方向为单频光纤激光器和光纤放大器。Email: wangzaiy18@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2022-04-08;录用日期:2022-05-25

<http://www.photon.ac.cn>

的波动,产生辐射压力噪声;激光的频率波动会转化为功率波动,不仅产生辐射压力噪声,还直接影响星间应答式激光干涉测量精度;此外,空间环境对激光器的力学、热学和抗辐射性能等环境适应性都提出很高要求<sup>[9]</sup>。针对空间引力波探测器的任务需求,各国研究机构积极开展低噪声激光器相关技术的研究,在结构设计、输出功率、强度噪声抑制和频率噪声抑制等方面已经取得重要的进展。本文针对国内外空间引力波探测器中的低噪声激光器的研究进行了梳理和归纳,分析比较了不同类型低噪声激光器的性能,并对国内用于空间引力波探测的低噪声激光器研究进行了展望。

## 1 空间引力波探测器简介

与地面引力波探测器相比,空间引力波探测器可以消除地面震动噪声的干扰,省略造价高昂的真空管道,还可以把激光干涉仪的臂长做得很长,极大地提高了引力波探测器的位置灵敏度,可以探测到更弱的、频率更低的引力波。除LISA外,目前在研的空间引力波探测器还包括日本的分赫兹干涉引力波天文台(DECIGO)<sup>[10]</sup>、中国的天琴计划<sup>[11]</sup>和太极计划<sup>[12]</sup>。图1为空间引力波探测器部署示意图,其中,LISA、DECIGO和太极计划采用日心地球轨道运行,天琴计划采用地心轨道运行。LISA、太极计划和天琴计划采用在空间部署三颗全同卫星构成等边三角形星座的方案,而DECIGO由四个等边三角形星座组成,其中两个星座部署在同一位置,另外两个星座等角度分布在日心轨道上。

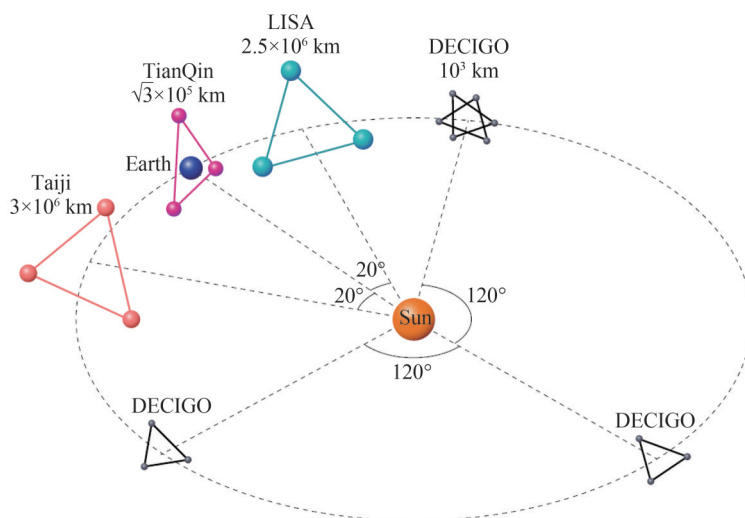


图1 空间引力波探测器部署示意图<sup>[13]</sup>

Fig.1 Schematic of space-based gravitational wave detector constellations<sup>[13]</sup>

表1归纳了空间引力波探测器的设计参数。在四种空间引力波探测器中,DECIGO的臂长最短,利用星间法布里-珀罗(Fabry-Perot,FP)谐振腔探测0.1 Hz~10 Hz的引力波,弥补了地基引力波探测器(LIGO)和空间引力波探测器(LISA、太极和天琴)之间的探测频段间隙。与DECIGO相比,LISA、太极和天琴的臂长更长,可达上百万千米,需要采用星间应答式激光干涉测量技术<sup>[14]</sup>探测0.1 mHz~1 Hz的引力波。

## 2 空间引力波探测器对激光器的要求

空间引力波探测器对激光器的要求主要体现在激光波长、功率、线宽、相对强度噪声和频率噪声等方

表1 空间激光干涉仪引力波探测器的设计参数

Table 1 Design parameters for space-based gravitational wave detectors

Mission	Armlength	Frequency range	Strain sensitivity	Operation orbit	Lunch time
DECIGO	$1.0 \times 10^3$ km	0.1 Hz~10 Hz	$10^{-23}/\text{Hz}^{1/2}$	Heliocentric	2030
LISA	$2.5 \times 10^6$ km	1 mHz~1 Hz	$10^{-20}/\text{Hz}^{1/2}$	Heliocentric	2034
Taiji	$3.0 \times 10^6$ km	0.1 mHz~1 Hz	$10^{-20}/\text{Hz}^{1/2}$	Heliocentric	2033
TianQin	$1.7 \times 10^5$ km	0.1 mHz~1 Hz	$10^{-20}/\text{Hz}^{1/2}$	Geocentric	2035

面。空间引力波探测器采用星间应答式激光干涉测量技术,干涉臂长远大于地面引力波探测器的臂长,为满足星间长距离传播的需求,减少激光在星间传播中的损耗,应选择发散角小、空间介质吸收率较低的激光。LISA、太极计划和天琴计划采用波长为1 064 nm的激光,激光在星间传播时避免了星际间等离子体的影响<sup>[7]</sup>。此类激光器技术相对成熟,具有很好的功率稳定性、频率稳定性和相位稳定性,相关技术成熟,器件性能可靠,已经成功地在LIGO系统中得到应用。

根据空间引力波探测器的指标要求,LISA、太极计划和天琴计划要求的激光功率为2~5 W,主要关心引力波探测器响应频段内(0.1 mHz~1 Hz)的强度噪声和频率噪声,这是因为激光器的噪声是空间引力波探测器的主要噪声来源之一,是影响空间引力波探测器灵敏度的重要因素<sup>[15]</sup>。

由于光的量子性质,激光器发射的光子数存在统计涨落,在时域上表现为激光功率的波动,在频域上表现为激光的强度噪声。当激光束进入空间引力波探测器时,在与光电探测器和测试质量的相互作用中产生的噪声称为光量子噪声,通常表现为散粒噪声和辐射压力噪声。散粒噪声是光电探测器中的强度量子噪声,在高频区域占主导地位;辐射压力噪声是从测试质量反射的光子的动量转移产生的,在低频区域占主导地位<sup>[15]</sup>。

当激光束进入光电探测器时,产生的光电流也存在涨落,即在引力波探测器的读出端引起噪声,称为散粒噪声,其大小用谱密度表示为<sup>[15]</sup>

$$h_{\text{shot}}(f) = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\hbar c \lambda}{2\pi P_{\text{in}}}} \quad (1)$$

式中, $L$ 是干涉仪臂长, $\hbar$ 是狄拉克常数, $c$ 是光速, $\lambda$ 是激光波长, $P_{\text{in}}$ 是进入激光干涉仪的激光功率。可以看出,散粒噪声与频率无关,是“白噪声”,其大小与 $\sqrt{P_{\text{in}}}$ 成反比。

由于光子具有动量,当大量光子撞击悬浮在真空中的测试质量时,光子的动量传递给测试质量,产生的作用力称为光辐射压力。由于光子数的统计涨落,光辐射压力随时间变化而变化,继而引起测试质量位置的波动,形成辐射压力噪声,其大小用谱密度表示为<sup>[15]</sup>

$$h_{\text{rp}}(f) = \frac{1}{mLf^2} \sqrt{\frac{\hbar P_{\text{in}}}{2\pi^3 c \lambda}} \quad (2)$$

式中, $m$ 是测试质量的质量, $L$ 是干涉仪臂长, $f$ 是辐射压力噪声的频率, $\hbar$ 是狄拉克常数, $P_{\text{in}}$ 是进入激光干涉仪的激光功率, $c$ 是光速, $\lambda$ 是激光波长。可以看出,辐射压力噪声与 $f^2$ 成反比,与 $\sqrt{P_{\text{in}}}$ 成正比。

由式(1)和式(2)知,增大输入激光的功率,可降低高频处的散粒噪声,但低频处的辐射压力噪声就会增加。在激光功率不是非常大的情况下,散粒噪声和辐射压力噪声无关,光量子噪声的大小可表示为两种噪声之和,即

$$h_{\text{om}}(f) = \sqrt{h_{\text{shot}}^2(f) + h_{\text{rp}}^2(f)} \quad (3)$$

对于引力波探测器覆盖的频率范围来说,当散粒噪声与辐射压力噪声相等时,光量子噪声最小,称为标准量子极限 $h_{\text{SQL}}(f)$ ,其大小仅与激光干涉仪的具体参数(臂长、测试质量)有关<sup>[15]</sup>。

空间引力波探测器采用星间应答式激光干涉测量技术,通过精确测量星间激光传播路径的相位改变量 $\Delta\varphi$ 来测量星间激光干涉仪的臂长变化量 $\Delta L$ ,即<sup>[16]</sup>

$$\Delta L = \lambda \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{c}{\nu} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (4)$$

由式(4)可知,激光的频率波动是引力波探测器测量噪声的一个直接来源。激光频率不稳定性可以用光谱学中的线宽、时域中的艾伦方差和频域中的功率谱密度(或幅度谱密度)来描述<sup>[16]</sup>。激光线宽描述的是光谱学中的频率分辨率,艾伦方差描述的是激光频率的时间稳定性,功率谱密度是激光频率噪声平方的傅里叶变换<sup>[16]</sup>。三者从不同角度描述了激光的频率波动,线宽越窄,代表着更好的单色性和时间相干性,其频率噪声也较低。例如,LIGO中激光器的频率稳定性要求达到 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 量级<sup>[17]</sup>,LISA中激光器的频率噪声要求达到 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} @ 10 \text{ mHz}$ 量级,我国“引力波探测”重点专项申报指南中,要求种子激光器的线宽小于2 kHz,频率漂移小于1 MHz/min。

由于星间应答式激光干涉测量技术需要在各卫星间传输参考时钟信息,便于利用锁臂技术(Arm-locking Technique)和时间延迟干涉(Time-delay Interferometry, TDI)等技术消除频率噪声的影响,需要在传输光路中增加一个电光相位调制器,利用其2.4 GHz边带实现参考时钟信息的传输。由于GHz量级的相位调制只能通过波导电光调制器实现,其承受功率约为200 mW,远低于激光器的输出功率,因此,不能在输出光路中直接添加波导电光调制器。采用主控振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)的激光器设计可以很好地解决该问题,是最有前景的激光器选择之一<sup>[18]</sup>。

综上所述,激光器的输出功率、强度噪声和频率噪声对空间引力波探测器的灵敏度具有十分重要的影响。用于空间引力波探测器的激光器需要具有合适的激光功率、强度噪声低、单频运转和频率噪声低等特性。表2列举了LISA、DECIGO、天琴和太极四种空间引力波探测器的低噪声激光器关键参数。

表2 空间引力波探测器的低噪声激光器关键参数

Table 2 Key parameters of low-noise lasers for space-based gravitational wave detector

Missions	Laser type	Wavelength/nm	Power/W	Power stability/Hz <sup>-1/2</sup>	Frequency stability/(Hz·Hz <sup>-1/2</sup> )
DECIGO	MOPA	515	10	1×10 <sup>-8</sup> @1 Hz	1 @1 Hz
LISA	MOPA	1 064	2	2×10 <sup>-4</sup> @0.1 mHz~1 Hz	30 @10 mHz
Taiji	MOPA	1 064	2	10 <sup>-4</sup> @0.1 mHz~1 Hz	30 @0.1 mHz~1 Hz
TianQin	MOPA	1 064	4	2×10 <sup>-4</sup> @1 mHz~1 Hz	10 @10 mHz

### 3 国外空间引力波探测器中的低噪声激光器研究进展

#### 3.1 LISA 中的低噪声激光器研究进展

LISA是最早提出的、发展最久的空间引力波探测计划,LISA中的低噪声激光器由NASA戈达德太空飞行中心研制,主要挑战来自于激光的偏振特性、单频运转以及对功率稳定性和频率稳定性的高要求。为实现这些目标,一般采用技术成熟、操控方便、内部噪声低、功率稳定性和频率稳定性都较好的MOPA激光器。其结构原理如图2所示,其中,主控振荡器采用低功率、低噪声的单频激光器,功率放大器采用光纤放大器,二者进行独立控制,可在保持种子激光良好特性的同时获得较大的功率输出。针对LISA的任务需要,人们研究比较了非平面环形振荡器(Nonplanar Ring Oscillator, NPRO)<sup>[19]</sup>、光纤激光器、外腔半导体激光器(External Cavity Diode Laser, ECDL)<sup>[20]</sup>等不同主控振荡器注入的低噪声MOPA激光器,在激光器的结构设计、低噪声性能、环境实验和空间运行可靠性等方面取得了重要的进展<sup>[21]</sup>。

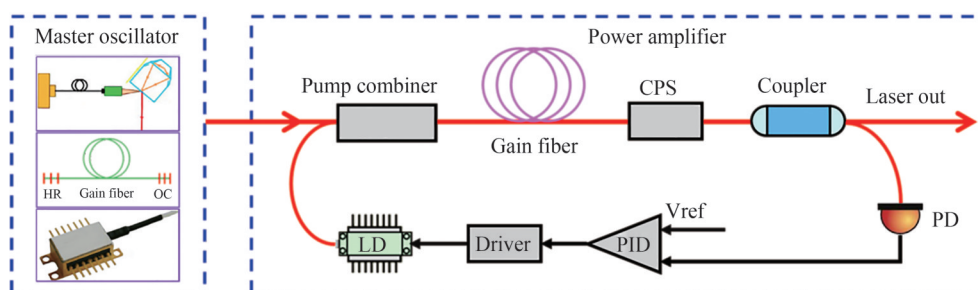


图2 MOPA结构的低噪声激光器原理图  
Fig.2 Schematic of low-noise MOPA laser

##### 3.1.1 NPRO注入的MOPA激光器

NPRO是KANE T J等在1985年提出的由单块Nd:YAG晶体构成的振荡器<sup>[19]</sup>。如图3所示,NPRO采用一体化结构,激光束在晶体内部单向传播,传播路径在不同平面内,能够有效地避免空间烧孔效应带来的影响。因此,NPRO可以获得功率稳定性和频率稳定性都比较好的窄线宽单频激光。NPRO在引力波探测项目中得到了广泛的应用,如aLIGO中采用NPRO注入的MOPA激光器;输出功率为35 mW的NPRO经过了空间试验,在LISA Pathfinder项目中进行了验证<sup>[22]</sup>。



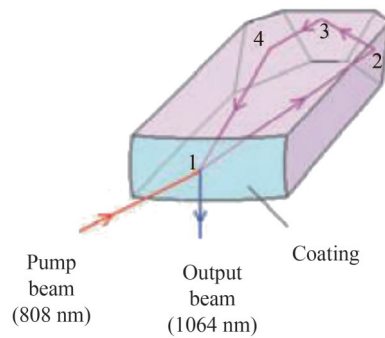


图3 NPRO激光器结构图  
Fig.3 Schematic of NPRO

2005年,德国汉诺威激光中心研制了输出功率为1 W的MOPA激光器<sup>[23]</sup>。主控振荡器采用商用的低功率NPRO(Mephisto 800,Innolight),光纤放大器采用双包层掺镱光纤(长3 m,芯径5.2  $\mu\text{m}$ ,NA=0.15),利用光纤耦合的976 nm LD进行后向泵浦。当激光注入功率为10 mW,泵浦功率为8.3 W时,输出激光功率为1 W。2014年,ESA为下一代重力任务(Next Generation Gravity Mission,NGGM)研制了高稳定性激光器(High Stability Laser,HSL)<sup>[24]</sup>,如图4所示,主控振荡器采用经过空间任务(Tesat)验证的NPRO,注入功率为25 mW,放大器输出功率>500 mW。在该激光器中,采用光电反馈控制技术稳定激光功率,利用超稳光学谐振腔锁定激光频率,对泵浦LD和光纤器件分别进行温度控制,获得了满足NGGM技术要求的低噪声激光。NGGM的激光参数与LISA的要求非常相似,采用的噪声抑制、温度控制等技术也可以用于LISA和其他激光干涉仪的激光器研究。

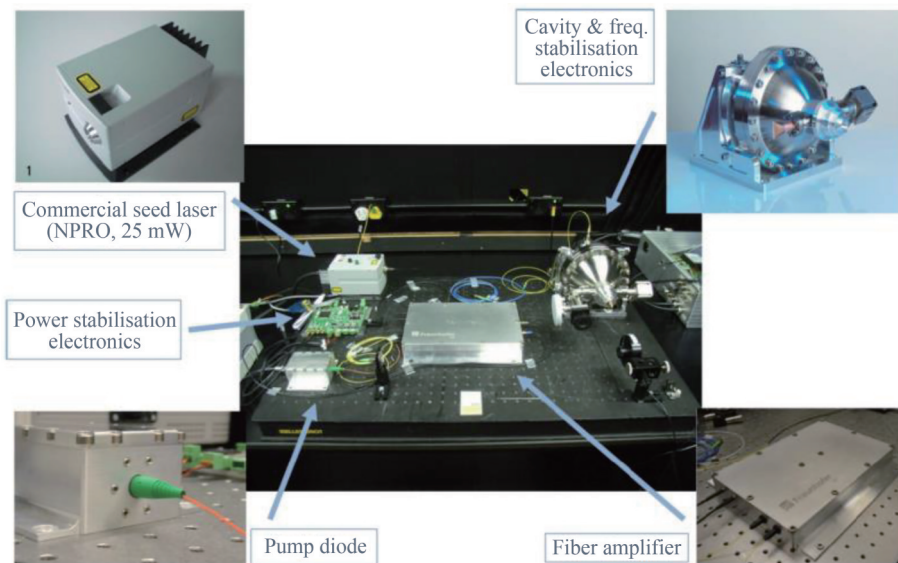
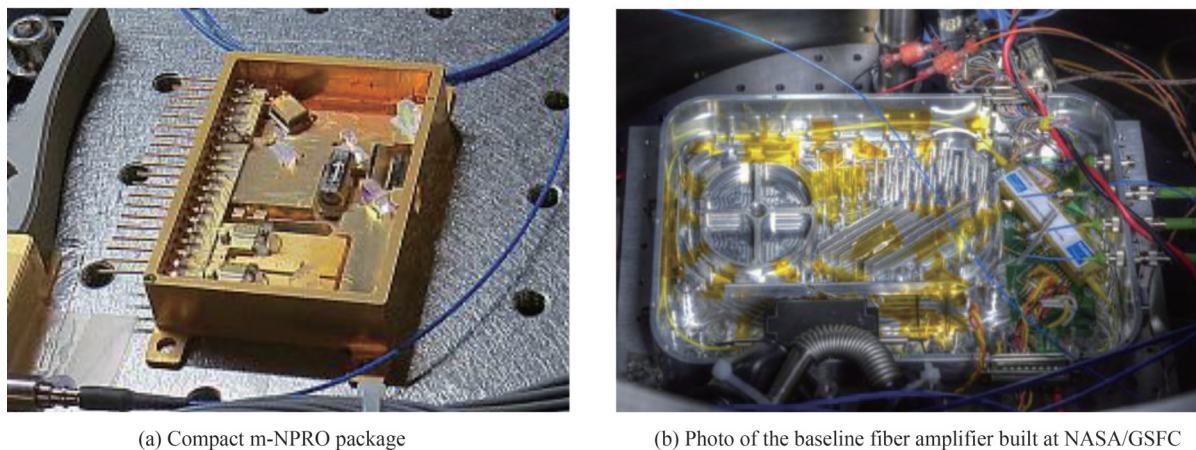


图4 NGGM中的HSL原理样机  
Fig.4 HSL prototype for NGGM at NPL laboratories

受空间航天器环境的限制,用于空间引力波探测器的激光器在体积、重量和功耗等方面有严格的约束,要求激光器体积小、重量轻、功耗低。2019年,NASA GSFC的NUMATA K等研究了采用低功率的单模或低阶多模LD泵浦的蝶形封装的微型NPRO(m-NPRO)的性能<sup>[18]</sup>。m-NPRO的尺寸较小,晶体内光束往返路径短,自由光谱范围大,无跳模调谐范围更广,且m-NPRO的热效应更小,温度控制的鲁棒性更好,因此,m-NPRO比传统NPRO具有更多的优势和应用前景。图5(a)和图5(b)分别为m-NPRO和光纤放大器的实物图,其中,m-NPRO由Avo Photonics生产封装,输出功率为200 mW,光纤放大器采用长为2.3 m、芯径为10  $\mu\text{m}$ 的双包层掺镱增益光纤,利用波长为976 nm的LD正向泵浦,得到输出功率2.5 W的1 064 nm激

光。2021年7月,Avo Photonics对m-NPRO进行了升级,频率噪声性能得到更好地控制,达到 $10^3 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@10^{-4} \text{ Hz}$ 和 $5 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@10^4 \text{ Hz}$ 的水平<sup>[25]</sup>。鉴于m-NPRO激光器具有良好的频率噪声和相对强度噪声性能,研究人员正在对其进行全面的测试,验证其是否满足LISA系统的所有要求。



(a) Compact m-NPRO package

(b) Photo of the baseline fiber amplifier built at NASA/GSFC

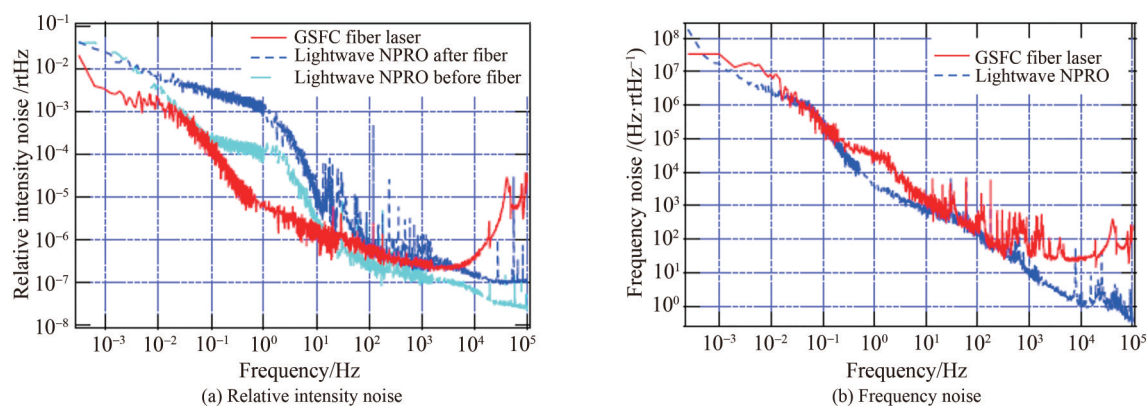
图5 蝶形封装的m-NPRO和光纤放大器

Fig.5 Delivered m-NPRO packages and photo of the baseline fiber amplifier

### 3.1.2 全光纤结构的低噪声激光器

光纤激光器凭借特殊的光波导结构,在热管理、光束质量控制以及系统集成性和稳定性等方面展现出显著的应用优势<sup>[26-36]</sup>。与固体激光器相比,光纤激光器的鲁棒性和转换效率更高。为满足引力波探测器的应用需求,人们开展了单频、窄线宽、低噪声光纤激光器的研究。

2005年,TRÖBS M研究了一种用于LISA的分布反馈光纤(Distributed Feedback Fiber,DFB)激光器及光纤放大系统<sup>[27]</sup>,其中,DFB激光器的型号为Y10(Koheras),输出功率为7.9 mW,光纤放大器采用双包层掺铒增益光纤,利用980 nm多模LD泵浦,得到输出功率为1 W的激光。自由运转时,光纤激光器的频率噪声在 $<100 \text{ Hz}$ 频段与NPRO相当,在 $>100 \text{ Hz}$ 频段比NPRO高3个量级。采用Pound-Drever-Hall技术稳频后,稳频带宽内的频率噪声得到有效抑制,除0.1 Hz附近外,其他频段噪声性能满足LISA的技术要求。2010年,NASA的NUMATA K为LISA研究了一种环形光纤激光器<sup>[28]</sup>,泵浦LD采用单纵模稳波长的976 nm激光器,增益光纤采用长度为40 cm的双包层单模保偏掺铒光纤,采用纤芯泵浦,实现了无跳模运行。图6所示为环形光纤激光器与商用NPRO的频率噪声和相对强度噪声性能。从图中可以看出,在 $<1 \text{ kHz}$ 频段,环形光纤激光器的频率噪声与NPRO相当,相对强度噪声优于NPRO。在弛豫振荡峰( $\sim 40 \text{ kHz}$ )附近,其频率噪声和相对强度噪声远高于商用NPRO。



(a) Relative intensity noise

(b) Frequency noise

图6 环形光纤激光器和NPRO的噪声性能比较

Fig.6 RIN and frequency noise of fiber laser and NPRO



虽然光纤激光器在低频段与NPRO激光器有类似的噪声性能,但由于弛豫振荡效应,在MHz频段会出现放大的相对强度噪声尖峰,该频段的相对强度噪声影响激光外差干涉测量,限制了光纤激光器在空间引力波探测器中的应用。

### 3.1.3 ECDL注入的MOPA激光器

ECDL具有线宽窄、调谐范围宽、单模输出、输出功率高等优良特性,在干涉测量技术<sup>[29]</sup>、相干光通信<sup>[20]</sup>、原子钟<sup>[30]</sup>等领域有着广泛的应用。2010年,NUMATA K等研究了1 550 nm平面波导外腔激光器(PW-ECL)的噪声性能,0.1 mHz~100 kHz频段的噪声性能与NPRO激光器相当,适用于精密测量和空间任务等应用,已经用在国际空间站光学测试平台和集成(OpTIIX)项目上<sup>[31]</sup>。2014年,NUMATA K等首次研究了蝶形封装的1 064 nm PW-ECL的特性<sup>[32]</sup>,通过精密实验评估了激光器性能,比较了PW-ECL工作在27.8 °C和29.4 °C时与NPRO的相对强度噪声和频率噪声,如图7,在<3 MHz的范围内,PW-ECL的强度噪声优于NPRO激光器;对于频率噪声,在低于0.1 Hz范围内,PW-ECL的频率噪声与NPRO相当,但高频处的频率噪声比NPRO至少高1个量级。

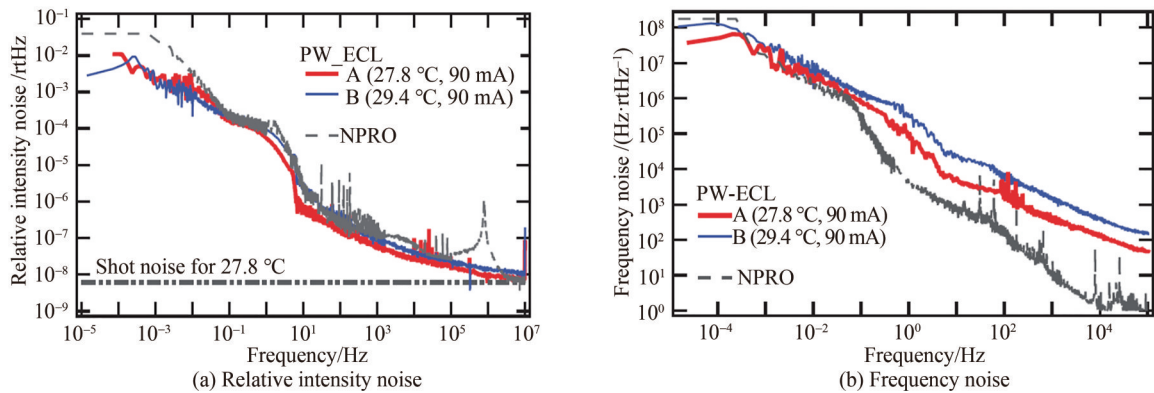


图7 PW-ECL和NPRO的噪声性能  
Fig.7 RIN and frequency noise of PW-ECL and NPRO

2018年,DAHL K等为LISA研制了PW-ECL注入光纤放大器的MOPA激光器<sup>[33]</sup>,如图8所示。PW-ECL的输出经半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)进行预放大,注入光纤放大器的激光功率约300 mW,放大后得到2.1 W的输出功率。在该系统中,通过分束器把部分种子激光接入频率稳定系统,利用参考腔和Pound-Drever-Hall技术锁定PW-ECL的激光频率,频率噪声约为 $20 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ 。虽然PW-ECL具有结构紧凑、成本低等优点,但是其频率噪声依然比LISA的要求以及NPRO的频率噪声高,目前还没有更好的方法降低其频率噪声。

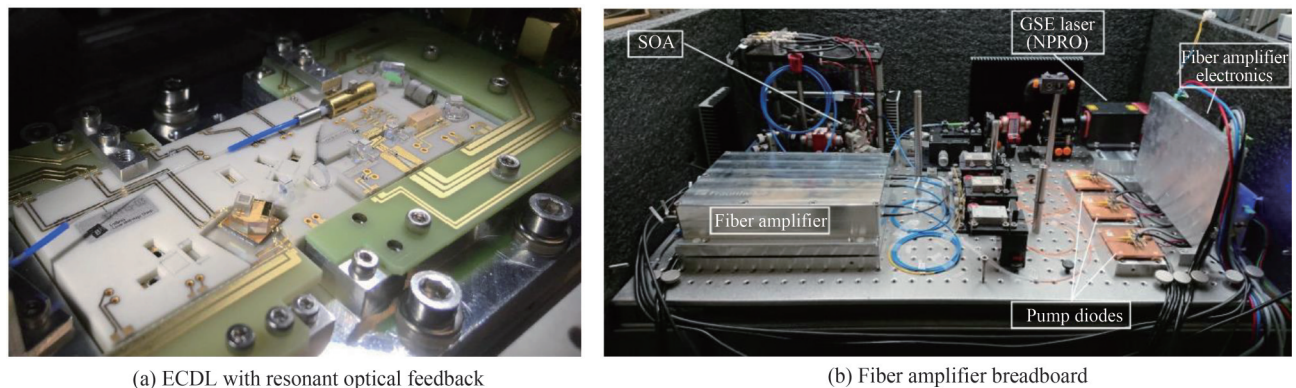


图8 PW-ECL注入的MOPA激光器  
Fig.8 Schematic layout and photograph of the micro-integrated PW-ECL

从激光器的结构尺寸和噪声性能等方面来看,m-NPRO是目前最优的主控振荡器。通过优化结构设计和封装,m-NPRO可以满足除差分相位噪声之外的所有要求,因此,m-NPRO注入的MOPA激光器是LISA中低噪声激光器的最优方案。2021年5月,NASA为LISA交付了第一台原型激光器<sup>[34]</sup>,如图9所示。其中,低噪声主控振荡器由Avo Photonics研制,光纤放大器由Fibertek研制,输出功率为2 W,该激光器由瑞士电子与微技术中心进行测试。

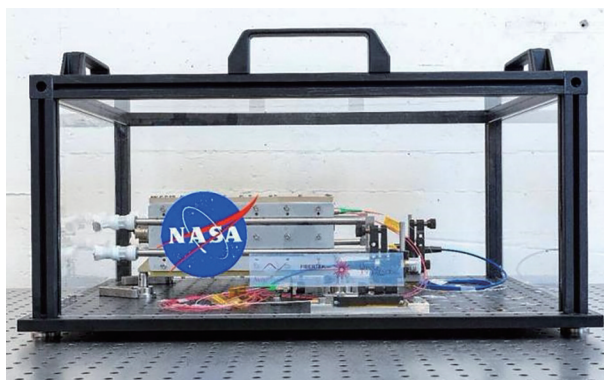


图9 LISA 第一台低噪声激光器原型样机  
Fig.9 The first prototype of a laser for LISA

### 3.2 DECIGO 中的激光器研究

DECIGO是由日本发起的空间引力波探测计划,计划在日心轨道上部署臂长为1 000 km的激光干涉仪,探测0.1~10 Hz频段的引力波,弥补LIGO与LISA之间的频段范围,计划于2030年左右发射<sup>[35]</sup>。DECIGO采用MOPA结构的激光器,主控振荡器的波长为1 030 nm,激光经光纤放大器放大后进行频率变换,输出515 nm的激光,其原理如图10所示。

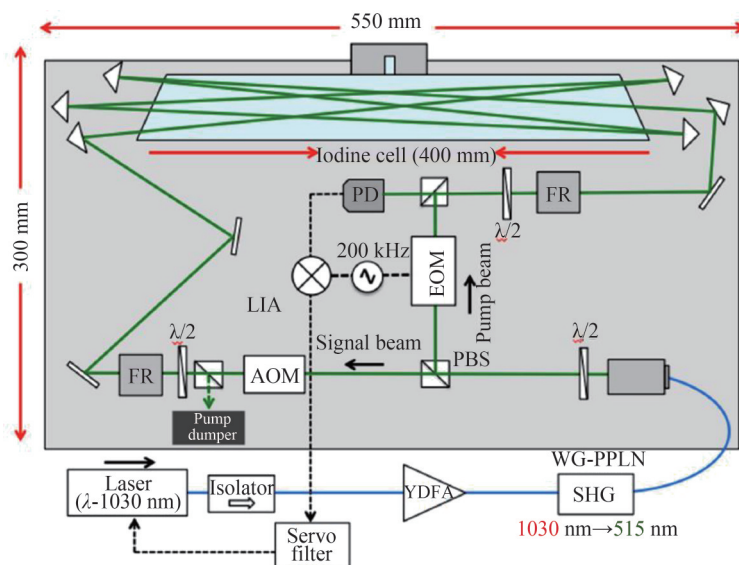


图10 DECIGO 碘稳频激光器的原理图  
Fig.10 Schematic diagram of  $I_2$ -stabilized laser for DECIGO

DECIGO的激光器由日本电器通信大学激光科学研究所研制。2012年,MUSHA M等采用DFB光纤激光器(波长1 030 nm,输出功率10 mW)作为主控振荡器,注入光纤放大器后输出功率为200 mW的1 030 nm激光,倍频后得到20 mW的515 nm激光。利用碘吸收稳频技术,频率噪声可达 $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ ,符合DECIGO的技术要求<sup>[36]</sup>。2017年,SUEMASA A等研究了输出功率为43 mW的515 nm稳频激光器,频率噪声性能达 $0.4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$ ,外环强度噪声达 $1.2 \times 10^{-7}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ 。为提升输出激光的功率,



SUEMASA A 等设计了一个两级的光纤放大器<sup>[37]</sup>,如图 11 所示,第 1 级为预放大器,采用长度为 1.5 m 的保偏增益光纤,由 976 nm 的 LD 进行纤芯泵浦,得到最大功率为 420 mW 的激光输出,第 2 级功率放大器的增益光纤长度为 3 m,利用多模 976 nm 的 LD 进行包层泵浦,得到 10 W 的 1 030 nm 激光,经倍频后输出 2 W 的 515 nm 激光,利用碘吸收稳频后,短期频率噪声性能达  $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ ,长期频率稳定性可达  $1.2 \times 10^{-14}$ 。

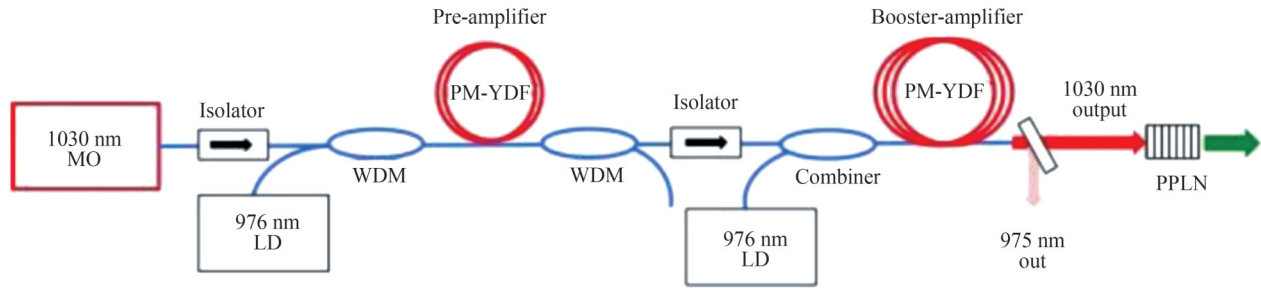


图 11 DECIGO 中的光纤放大器  
Fig.11 Schematic diagram of fiber amplifier for DECIGO

DECIGO 的激光器已经实现了其技术试验任务 B-DECIGO 对激光功率、频率噪声和强度噪声的需求。接下来的工作是改进激光器的结构设计,提高机械稳定性和坚固性,提高 515 nm 激光的输出功率至 10 W,并通过主动控制技术进一步降低频率噪声和强度噪声,满足 DECIGO 空间任务的要求。

## 4 国内空间引力波探测器中的激光器研究进展

我国从 20 世纪 70 年代开始引力波探测器的研制,并于本世纪初布局空间惯性传感、星间激光干涉测量等空间引力波探测核心技术的研究<sup>[33]</sup>。2020 年和 2021 年,围绕空间引力波探测的重大科学问题和瓶颈技术,分别有 15 项和 13 项重点专项任务立项。空间引力波探测的相关研究成为国内高校和科研机构的研究热点。目前,国内空间引力波探测计划有天琴计划和太极计划,均采用在空间部署三颗卫星的结构,如图 1 所示,天琴计划采用地心轨道运行,星间距离为 17 万千米;太极计划采用与 LISA 一样的日心轨道运行,星间距离为 300 万千米,激光干涉仪的臂长最长,探测灵敏度也是最高的。

### 4.1 天琴计划中的激光器研究

2014 年 3 月 24 日,中山大学提出天琴计划,并于 2015 年 7 月启动,计划于 2035 年前后发射,目标是实现对  $10^{-4} \sim 1 \text{ Hz}$  频段空间引力波的探测<sup>[11]</sup>。2019 年 12 月 20 日,天琴 1 号试验卫星成功发射,现已圆满完成 6 个月的试验任务,试验结果优于任务验收指标<sup>[38]</sup>。在天琴 1 号试验星中,中山大学采用自制的 DBR 激光器进行在轨验证激光功率、温度控制等技术。图 12 为激光器实物和结构图,采用蝶形封装,内部集成了光隔离器、TEC、热敏电阻等组件,利用自研的电路控制系统实现激光器内部的精确控温和功率稳定输出<sup>[39]</sup>。经过功率稳定后,激光器输出功率为 18 mW,功率漂移为 0.6 mW/h。

为验证自制的 DBR 激光的性能,确保激光干涉仪有效载荷的可靠性,天琴 1 号试验星同时搭载了一个商用的 RIO 激光器作为备份,该激光器具有窄线宽( $\sim 15 \text{ kHz}$ )、波长稳定性好、更低的相对强度噪声和位相噪声等优点。RIO 激光器输出功率为 21 mW,功率漂移为 0.8 mW/h。在轨试验结果表明,激光干涉仪可以测到 0.5 nm 的位移,分辨率约 25 pm,位移噪声约为  $30 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1 \text{ Hz}$ ,DBR 激光器和 RIO 激光器均能满足天琴 1 号任务需求。

天琴计划需要单频运转、波长为 1 064 nm、输出功率为 4 W、频率噪声低于  $10 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@10 \text{ mHz}$  的激光。为实现该目标,激光器的最终方案倾向于采用窄线宽、低噪声 NPRO 激光器作为主控振荡器、光纤放大器作为功率放大的 MOPA 结构设计。

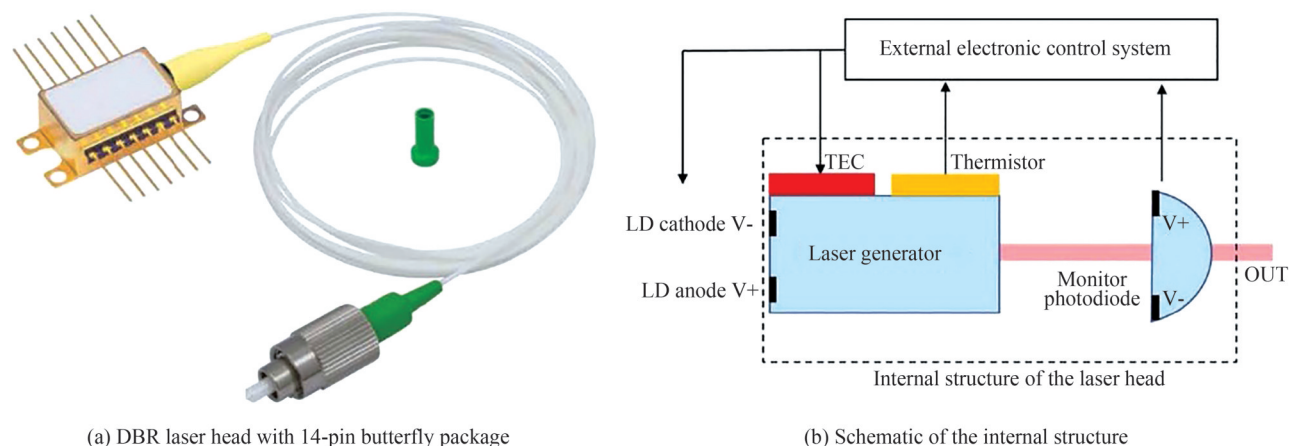


图12 天琴1号试验星中的DBR激光器

Fig.12 DBR laser head and schematic of the internal structure for Tianqin-1 mission

## 4.2 太极计划中的激光器研究

2016年,中国科学院正式提出并启动了太极计划,探测频段为0.1 mHz~1 Hz,计划在2033年前后发射。2019年8月31日,绕地球轨道运行的太极1号卫星成功发射,主要验证了空间引力波探测技术路线的可行性,同时对部分关键技术进行在轨测试,如激光干涉仪、引力参考传感器、单自由度航天器无拖曳控制等<sup>[40,41]</sup>。通过严格测试,太极1号干涉测距精度达100 pm量级,测试质量残余加速度噪声实测值达到 $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级,实现了我国迄今为止最高精度的空间激光干涉测量。

在太极1号星载激光干涉测量系统中,采用了808nm LD泵浦、激光线宽在百赫兹量级的高稳定性NPRO激光器<sup>[42]</sup>,图13所示为激光器的工作原理图,激光由单模保偏光纤耦合输出,经隔离器后按1:4分束,其中,输出端1作为激光监控端口,激光功率为10 mW,输出端2作为主要试验端口,激光功率为40 mW。

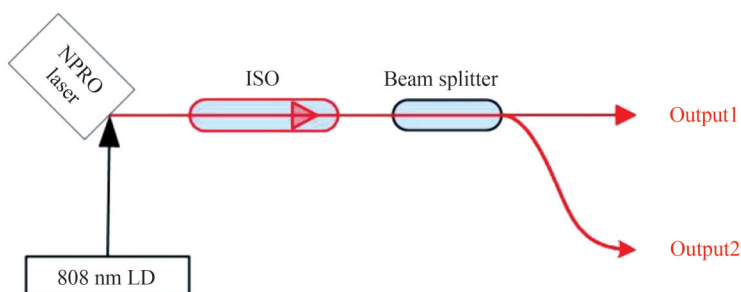


图13 太极1号中激光器的工作原理

Fig.13 Principle diagram of laser source for Taiji-1 satellite

通常情况下,激光器的工作温度会影响输出激光的频率稳定性。对于NPRO激光器,温度对频率的调谐系数为3 GHz/°C,需要亚mK量级的温度稳定性才能达到0.1 MHz的频率稳定性。因此,激光器采用两级温度控制措施,第一级控制激光晶体的温度,第二级控制激光器壳体的温度,频率噪声水平达 $0.1 \text{ MHz}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1 \text{ Hz}$ ,强度噪声达 $2 \times 10^{-4}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1 \text{ Hz}$ 。

为满足太极计划和太极探路者的实验需求,中国科学院研制了激光器原型样机和激光干涉仪原型样机<sup>[13]</sup>。其中,激光器的频率稳定性达 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,达到太极计划的要求,激光干涉仪原型样机的主要功能也已经过测试,位移测量精度达到 $15 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,激光锁相功能实现 $2\pi \cdot \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

## 5 激光器的噪声抑制技术

激光器的噪声性能直接决定了空间激光干涉引力波探测器的探测能力,因此,激光器的噪声抑制对于空间引力波探测系统具有重要的意义。目前,激光器噪声抑制的最大挑战在于进一步降低低频段的强度噪

声和频率噪声。

### 5.1 强度噪声抑制技术

激光器的强度噪声是指频域上激光功率的波动情况,一般用相对强度噪声(Relative Intensity Noies, RIN)来表示。激光器的强度噪声在频谱上可以分为低频段的技术噪声、中频段的弛豫振荡和高频段的量子噪声。在低频段,技术噪声的来源主要有外部环境的干扰、泵浦源的功率起伏等<sup>[43-53]</sup>。因此,可以通过降低外部环境干扰和抑制泵浦源功率起伏来降低低频段的强度噪声,除此之外,还可以通过直接稳定激光器的输出功率进一步降低低频段的强度噪声。

除了采取隔震、隔音、精确控温等措施外,常采用光电反馈<sup>[44]</sup>、光学注入锁定<sup>[45]</sup>、基于半导体光放大器(SOA)饱和效应<sup>[46]</sup>和光学模式清洁剂<sup>[47]</sup>等方法抑制激光器的强度噪声。在这些方法中,光电反馈是发展最早、技术最成熟和应用最广泛的方法,其原理如图14所示,从输出激光中提取部分功率,利用光电探测器把激光强度噪声转换成电压信号噪声,与电压基准源比较得到误差信号,误差信号通过PID反馈回路后,驱动执行机构,实现激光器强度噪声的抑制。在实际应用中,既可以采用电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)或声光调制器(Acoustic Optic Modulator, AOM)直接对激光器的输出功率进行调制,也可以利用PID输出的误差信号调制泵浦LD的驱动电源,还可以采用双光电反馈回路分别控制激光输出和泵浦LD的驱动电源,最大程度地抑制激光器的强度噪声。

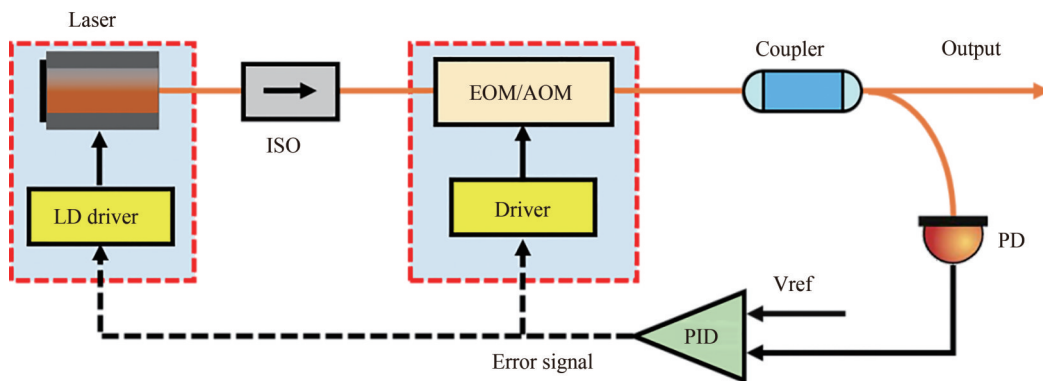


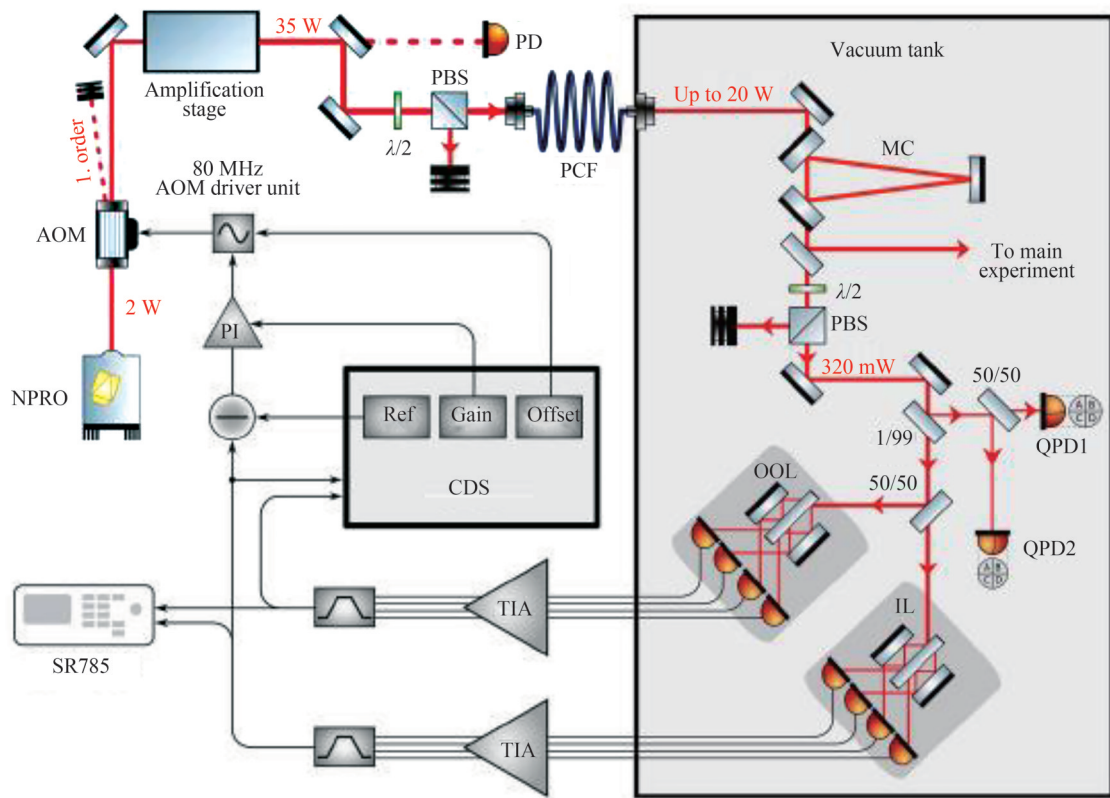
图14 基于光电反馈抑制强度噪声原理图

Fig.14 Schematic of suppressing the intensity noise based on optoelectronic feedback control

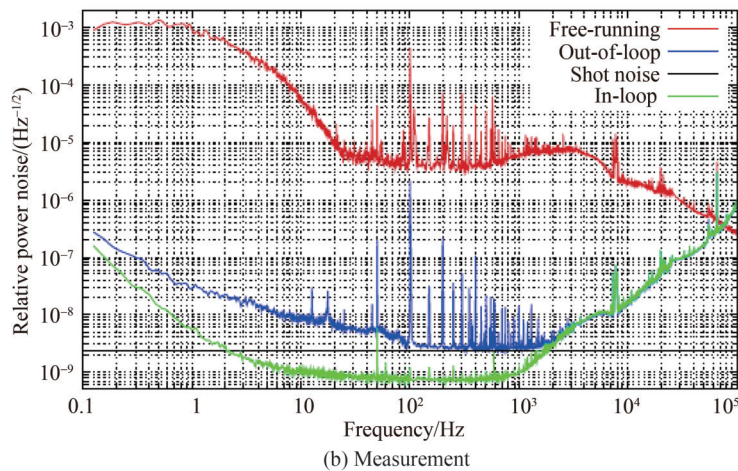
早在1990年,为满足NASA的应用需求,KANE T J等采用光电反馈把LD泵浦的YAG激光器弛豫振荡峰141 kHz处的强度噪声抑制了37 dB<sup>[48]</sup>。1993年,哈佛大学BALL G A等采用该方法调整泵浦LD的电流,对单频光纤激光器弛豫振荡峰处的强度噪声进行抑制,把182 kHz处的强度噪声从 $-82.1$  dB/Hz降低至 $-121.1$  dB/Hz<sup>[49]</sup>。2003年,山西大学张靖等利用双光电反馈回路对YAG激光器的泵浦电流和输出激光功率分别进行控制,实现了在弛豫振荡峰处40 dB和低频处20 dB的抑制效果<sup>[50]</sup>。2009年,德国马普实验室为满足aLIGO的应用需求,在光电反馈控制回路中采用电光调制器(EOM)、模式清洁剂和高功率光电二极管阵列,对NPRO激光器(输出功率为500 mW)的强度噪声进行抑制,获得 $2.4 \times 10^{-9}$ /Hz@10 Hz、 $1.8 \times 10^{-9}$ /Hz@15 Hz的噪声水平<sup>[51]</sup>。2017年,该实验室采用AOM、模式清洁剂和高功率光电二极管阵列,对放大后的激光(35 W)进行强度噪声抑制,内环噪声达到 $1.8 \times 10^{-9}$ /Hz@100 Hz~1 kHz,外环噪声达到 $2.6 \times 10^{-9}$ /Hz@100 Hz~1 kHz的世界最好水平<sup>[52]</sup>,实验装置和测量结果如图15所示。

2021年底,清华大学研究并测量了一种低噪声、窄线宽、全保偏的MOPA激光器,如图16(a)所示,主控振荡器采用自由运转的NPRO激光器,光纤放大器采用长为2 m的双包层掺镱增益光纤,利用锁波长的976 nm多模LD进行正向泵浦,输出激光经1/99分束后,1%的光束进入内环(in-loop)探测,光电探测器输出的电信号与商用PID控制器(SIM960)的内部参考电压进行比较,得到误差信号,实时调整泵浦LD的驱动电流,实现输出激光的强度噪声抑制。在输出功率为2W时,测得内环强度噪声为 $-78.4$  dBc/Hz@1 mHz,外环强度噪声为 $-63.8$  dBc/Hz@1 mHz和 $-76.5$  dBc/Hz@0.1 Hz,在1 mHz~1 Hz频段内,外环强度噪声均





(a) Experimental setup



(b) Measurement

图 15 强度噪声抑制实验装置和测量结果

Fig.15 Schematic of the experimental setup and measurement of the RPN

低于  $-60$  dBc/Hz。在实验中发现,环境温度变化和泵浦 LD 的温度控制精度对低频段强度的噪声影响较大,要进一步抑制低频段的强度噪声,不仅环境温度漂移要小,还需要对泵浦 LD 进行精确控温。例如,文献[39]中对天琴 1 号任务中的激光器的内部温度波动的功率谱要求为  $1 \text{ mK}/\sqrt{\text{Hz}}@0.4 \text{ mHz}$ ,这对器件的温度控制提出了很高的要求。因此,对于抑制强度噪声,除了提高参考电压的精度、优化放大器结构设计和封装外,对器件进行精确控温是一种重要的技术手段。



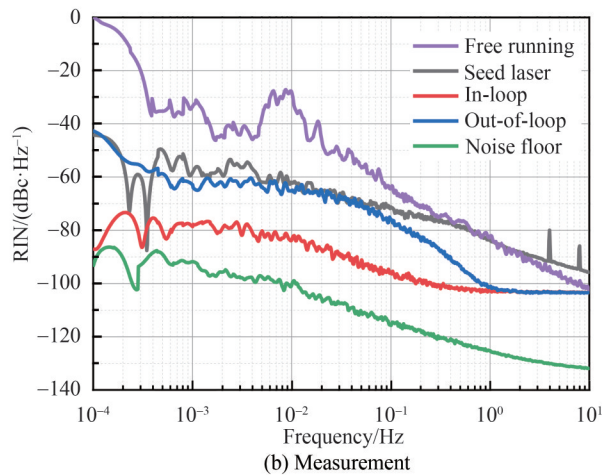
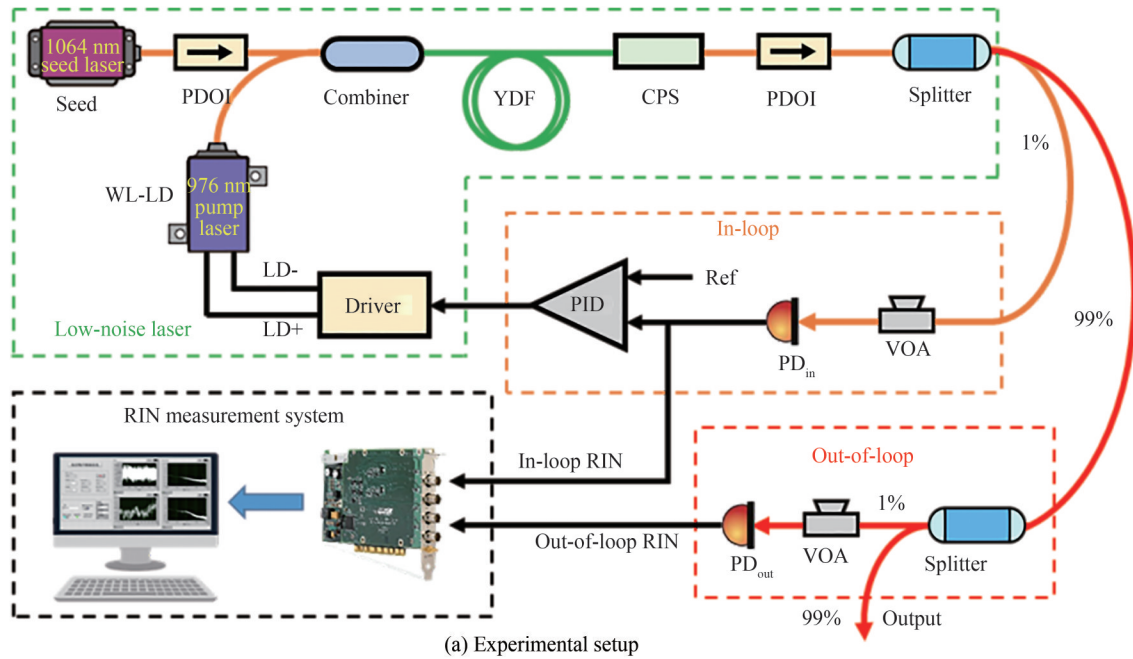


图 16 清华大学研制的低噪声激光器及测量结果  
Fig.16 Low-noise laser developed by Tsinghua University

## 5.2 频率噪声抑制技术

如前所述,激光器的频率噪声是引力波探测器噪声直接来源之一,抑制激光频率噪声,可以有效地提高引力波探测器的灵敏度。由于环境温度的起伏、气压变化、机械振动等都会造成激光频率的漂移,采用隔振、隔音、精确控温等被动措施可以在一定程度上抑制频率噪声。但是,这些被动措施很难保证激光频率的长期稳定性和复现性,要得到更优异的频率噪声性能,通常采用主动反馈抑制技术,把激光频率锁定在噪声极低、频率稳定度更高的参考频率上<sup>[53]</sup>。主动抑制技术依据频率参考标准分为两种:一种是以原子或分子的跃迁谱线中心频率为参考标准,包括兰姆凹陷稳频技术<sup>[54]</sup>、原子光谱 Zeeman 效应稳频技术<sup>[55]</sup>、原子或分子饱和吸收稳频技术<sup>[56]</sup>;另一种是以超稳光学参考腔的共振频率作为频率参考标准,应用最多是 Pound-Drever-Hall(PDH)稳频技术<sup>[57]</sup>。PDH 激光稳频技术具有伺服响应快、噪声低等特点,是目前稳频技术中应用最广泛、稳频效果最优异的技术方法之一<sup>[58]</sup>。

图 17 为 PDH 稳频的原理框图,以法布里-珀罗腔(F-P 腔)的共振频率为频率基准,利用电光调制器(EOM)对激光进行相位调制,通过光电探测器探测共振腔的反射光,利用混频器解调出反射光中的频率失谐信息,即误差信号,误差信号经过比例积分电路处理后,反馈到激光器的压电陶瓷(PZT)或者其他频率响应器件上,进行频率补偿<sup>[59]</sup>。在 LIGO 和 LISA 的激光器中,为降低频率噪声,均采用了 PDH 技术把主控振

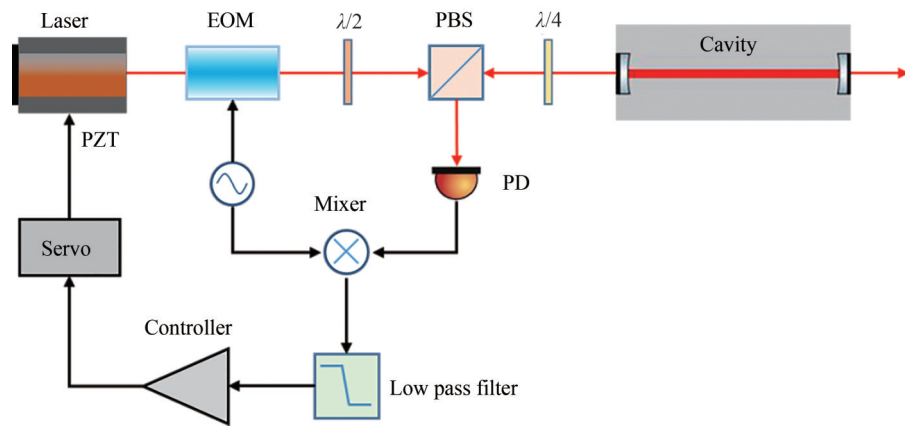


图 17 PDH 技术稳频原理图

Fig.17 Schematic of the PDH laser frequency stabilization

荡器的频率锁定在参考腔的共振频率上。

1983年,在引力波探测项目的推动下,DREVER R W P等采用F-P腔,把Pound提出的用于微波稳频的方法移植到光频段,成功地把激光线宽压缩到87 Hz<sup>[60]</sup>。1996年,BONDU F等报道了用于VIRGO引力波探测器的PDH锁频Nd:YAG激光器,间隔时间低于0.1 s时的阿伦方差优于 $10^{-14}$ <sup>[61]</sup>。1998年,PETERSEIM M等报道了为LISA系统研制的稳频激光器,稳频后的频率噪声显著降低<sup>[62]</sup>。2007年,LUDLOW A D等利用光学谐振腔把半导体泵浦的激光器线宽压窄到400 mHz,该谐振腔具有极低的热噪声,精细度为250 000,线宽为7 kHz,频率稳定度达到 $10^{-15}$ <sup>[63]</sup>。2009年,TRÖBS M等利用PDH技术把光纤激光器的频率锁定在参考腔上,在0.1 mHz~1 Hz频段内,频率噪声满足LISA系统的要求<sup>[64]</sup>。2012年,喷气推进实验室的PIERCE P报道了用于GRACE-FO空间任务的PDH稳频激光器,频率噪声达 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ @0.01 Hz,该激光器已在GRACE-FO卫星上成功运行<sup>[16, 65]</sup>。2014年,英国国家物理实验室利用超稳定立方腔的PDH方案,为NGGM研制了高稳定性激光(HSL)系统,在 $>0.01 \text{ Hz}$ 频段实现了优于 $20 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的激光频率稳定性<sup>[16, 66]</sup>。为满足天琴计划和中国下一代重力场测量任务的需要,中山大学天琴中心空间光学组从2013年开始研发面向空间任务的PDH激光稳频系统,样机实测结果表明,在0.7~10 Hz的频率范围内,激光频率稳定性优于 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[67]</sup>。2019年,NUMATA K等报道了用于LISA的技术成熟度为6级的MOPA激光器,采用PDH技术对NPRO激光器进行预稳频,频率噪声可达 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ @5 mHz~1 Hz<sup>[18]</sup>。

利用PDH稳频时,激光器的频率稳定度极大程度上取决于参考腔的频率稳定性。但是F-P腔的长期稳定性容易受外界环境扰动等因素的影响,使中心频率易发生漂移,研究人员一直致力于提高F-P腔的稳定性,例如,选用低热膨胀系数的腔材料、采取精密温控、隔声隔震等被动抑制措施、放置在真空环境中等,从而尽可能降低环境中震动、声波、温度等扰动的影响<sup>[68]</sup>。

碘分子的超精细跃迁是激光稳频技术的一个绝对频率参考<sup>[16, 69]</sup>。碘分子激光锁频可提供一个无热漂移的绝对精确的参考频率,可以把515 nm或532 nm(1 064 nm的倍频光)的激光锁定在碘分子的超精细跃迁上。2012年,MUSHA M等报道了用于DECIGO的利用碘分子吸收谱线稳频的、输出功率10 mW的515 nm激光器,频率噪声为 $0.2 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz<sup>[36]</sup>,2017年,该小组报道了输出功率43 mW的515 nm稳频激光器,频率噪声为 $0.4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz,满足DECIGO的技术要求<sup>[70]</sup>。2017年,DÖRINGSHOFF K等首次报道了基于非饱和吸收池的碘分子稳频系统,其频率噪声满足LISA和NGGM的要求,频率噪声为 $40 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ @2mHz~10 Hz,其改进装置已于2018年装配在JOKARUS探空火箭上<sup>[71]</sup>。图18为几种稳频激光器的频率噪声结果<sup>[14]</sup>,从图中可以看出,利用碘分子吸收谱线稳频可以进一步降低频率噪声。

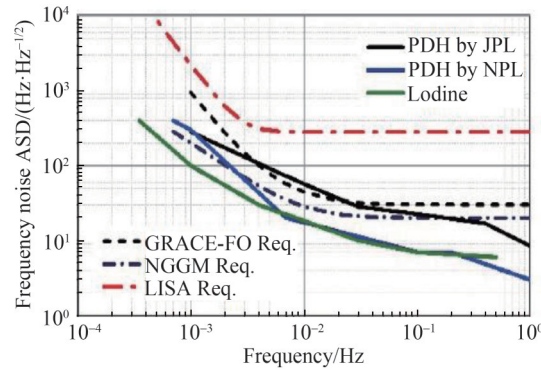


图18 PDH和碘分子稳频系统的频率噪声比较

Fig.18 Frequency noise spectral density between the PDH and the molecular iodine

## 6 总结与展望

空间激光干涉引力波探测器是引力波探测历程中的一个崭新的里程碑。在空间激光干涉引力波探测器中,低噪声激光器是关键部件之一,其噪声性能对引力波探测器的灵敏度具有重要的影响。综合LISA、天琴和太极等空间引力波探测用的激光器研究结果看,在实验室环境下,在激光功率、强度噪声、频率噪声等方面已经取得重要的进展;在空间环境下,LISA探路者、天琴1号、太极1号等任务验证了低噪声激光器、超高精度干涉仪、无拖曳技术等,各项功能和性能满足任务要求。下一阶段的空间引力波探测任务需要构建星间激光干涉测量系统,要求激光器的激光功率足够高、噪声性能足够低。目前,低噪声的MOPA激光器是最优的方案,在NPRO、m-NPRO、PW-ECL等不同的主控振荡器中,以Avo Photonics为LISA研制的m-NPRO激光器的噪声性能最好,技术成熟度最高,对于光纤放大器,最成熟的方案是选用大模场面积的双层掺镱光纤。

近年来,我国在空间引力波探测器的低噪声激光器研究方面也取得了阶段性研究成果,为进一步提高激光器的性能,在激光器设计和噪声抑制等方面还需要开展进一步的研究。在激光器设计方面,需要研究稳定性更好、噪声性能更低的主控振荡器和性能更优的光纤放大器,例如,采用单晶光纤或硅酸盐光纤的放大器,后者可以大大缩短增益光纤的长度。对于激光器的强度噪声性能,除采用隔振、隔音、精确控温等措施降低环境干扰外,还需要采用光电反馈控制等多种技术进一步抑制强度噪声。对于激光器的频率噪声,除了采用PDH技术进行预稳定外,为达到空间引力波探测器的需求,还可以通过边带锁定、碘分子吸收等方法进一步抑制低频段的频率噪声,并通过锁臂技术(arm-locking)或双锁臂技术(dual arm locking)对激光频率不稳定性进行进一步压制,最后通过TDI(Time Delay Interferometer)技术实现空间引力波探测器的频率噪声要求。另外,考虑到空间辐照对光纤器件的影响,增益光纤会产生色心效应,使光纤放大器的损耗增加,光学性能下降,影响激光器的稳定性和使用寿命,因此,亟需开展相关实验研究,厘清空间辐照对激光器性能影响的规律,为激光器抗辐照设计和下一步空间任务奠定基础。

### 参考文献

- [1] EINSTEIN A. The foundation of the general theory of relativity[J]. Annalen der Physik, 1916, 49: 769-822.
- [2] WEBER J. Anisotropy and polarization in the gravitational-radiation experiments[J]. Physical Review Letters, 1970, 25: 180-184.
- [3] BARISH B C. The laser interferometer gravitational-wave observatory LIGO[J]. Advances in Space Research, 2000, 25 (6): 1165-1169.
- [4] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 61102.
- [5] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. GWTC-1: A gravitational-wave transient catalog of compact binary mergers observed by LIGO and Virgo during the first and second observing runs[J]. Physical Review X, 2019, 9(3): 31040.
- [6] WANG Yunyong, ZHU Xingjiang, LIU Jian, et al. The laser interferometer gravitational wave detector[J]. Progress in Astronomy, 2014, 32(3): 348-382.

- 王运永,朱兴江,刘见,等.激光干涉仪引力波探测器[J].天文学进展,2014,32(3):348-382.
- [7] LUO Ziren, BAI Shan, BIAN Xing, et al. Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(4): 415-447.  
罗子人,白珊,边星,等.空间激光干涉引力波探测[J].力学进展,2013,43(4):415-447.
- [8] DANZMANN K, TEAM L S. LISA—an ESA cornerstone mission for a gravitational wave observatory[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 1997, 14(6): 1399-1404.
- [9] WANG Yunyong. Gravitational wave detection[M]. Beijing: Science Press, 2020.  
王运永.引力波探测[M].北京:科学出版社,2020.
- [10] KAWAMURA S, ANDO M, SETO N, et al. The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, 28: 94011.
- [11] LUO Jun, AI Linghao, AI Yanli, et al. A brief introduction to the TianQin project[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(1-2): 1-19.  
罗俊,艾凌皓,艾艳丽,等.天琴计划简介[J].中山大学学报(自然科学版),2021,60(1-2):1-19.
- [12] LUO Ziren, GUO ZongKuan, JIN Gang, et al. A brief analysis to Taiji: Science and technology[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102918.
- [13] GONG Yungui, LUO Jun, WANG Bin. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(9): 881-889.
- [14] MING Min, LUO Yingxin, LIANG Yurong, et al. Ultraprecision intersatellite laser interferometry[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2020, 2(2): 53-66.
- [15] WANG Yunyong, ZHU Zonghong. Noise and sensitivity of laser interferometer gravitational wave detectors[J]. *Modern Physics*, 2019, 31(3): 56-62.  
王运永,朱宗宏.激光干涉仪引力波探测器的噪声和灵敏度[J].现代物理知识,2019,31(3):56-62.
- [16] DUAN Huizong, LUO Yingxin, ZHANG Jingyi, et al. Inter-satellite laser interferometry[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(1-2): 162-177.  
段会宗,骆颖欣,张静怡,等.星间激光干涉测量技术[J].中山大学学报(自然科学版),2021,60(1-2):162-177.
- [17] WANG Yunyong. Third-generation laser interferometer gravitational wave detector[J]. *Modern Physics*, 2017, 29(1): 39-51.  
王运永.第三代激光干涉仪引力波探测器[J].现代物理知识,2017,29(1):39-51.
- [18] NUMATA K, YU A W, JIAO H, et al. Laser system development for the LISA (Laser Interferometer Space Antenna) mission[C]. SPIE, 2019.
- [19] KANE T J, BYER R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Optics Letters*, 1985, 10(2): 65-67.
- [20] LUVSANDAMDIN E, SPIEBBERGER S, SCHIEMANGK M, et al. Development of narrow linewidth, micro-integrated extended cavity diode lasers for quantum optics experiments in space[J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(2): 255-260.
- [21] TRÖBS M, BARKS S, MÖBIUS J, et al. Lasers for LISA: Overview and phase characteristics[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 154: 12016.
- [22] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, et al. Temperature stability in the sub-millihertz band with LISA pathfinder[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 486(3): 3368-3379.
- [23] TRÖBS M, D'ARCIO L, HEINZEL G, et al. Frequency stabilization and actuator characterization of an ytterbium-doped distributed-feedback fiber laser for LISA[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(5): 1137-1140.
- [24] NICKLAUS K, HERDING M, WANG X, et al. High stability laser for next generation gravity missions[C]. SPIE, 2014.
- [25] Avo Photonics Creates Ultra-Low Noise Lasers for NASA LISA Mission[EB/OL]. <https://www.avophotonics.com/post/avo-photonics-creates-ultra-low-noise-lasers-for-nasa-lisa-mission>.
- [26] SHI Wei, FU Shijie, SHENG Quan, et al. Research progress on high-performance single-frequency fiber lasers: 2017-2021 (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 65-78.  
史伟,付士杰,盛泉,等.高性能单频光纤激光器研究进展:2017-2021(特邀)[J].红外与激光工程,2022,51(1):65-78.
- [27] TRÖBS M, WESSELS P, FALLNICH C. Power- and frequency-noise characteristics of an Yb-doped fiber amplifier and actuators for stabilization[J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 2224-2235.
- [28] NUMATA K, CHEN J R, CAMP J. Fiber laser development for LISA[J]. *Journal of physics*, 2010, 228(1): 12043.
- [29] DAIBER A. Narrow-linewidth tunable external cavity laser for coherent communication[C]. IEEE Photonics Conference, 2014.



- [30] LUDLOW A D, JIANG Yanyi, LEMKE N D, et al. Making optical atomic clocks more stable with  $10^{-16}$ -level laser stabilization[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 158-161.
- [31] NUMATA K, CAMP J, KRAINAK M A, et al. Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 22781-22788.
- [32] NUMATA K, ALALUSI M, STOLPNER L, et al. Characteristics of the single longitudinal-mode planar-waveguide external cavity diode laser at 1 064 nm[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2101-2104.
- [33] DAHL K, CEBECIB P, FITZAUB O, et al. A new laser technology for LISA[C]. *International Conference on Space Optics*, 2018.
- [34] NASA Provides Laser for LISA Mission [EB/OL]. <http://parabolicarc.com/2021/09/15/nasa-provides-laser-for-lisa-mission/>.
- [35] KAWAMURA S, ANDO M, SETO N, et al. Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, 2021(5): 05A105.
- [36] MUSHA M, NAKAGAWA K, UEDA K. Developments of a space-borne stabilized laser for DECIGO and DPF[C]. *International Conference on Space Optical Systems and Applications*, 2012.
- [37] SUEMASA A, SNIMO O A, OHTSUKA S, et al. Stable and high power 515-nm lasers for the space gravitational wave detector: DECIGO[C]. *International Conference on Space Optics*, 2018.
- [38] LUO Jun, BAI Yanzheng, CAI Lin, et al. The first round result from the TianQin-1 satellite[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(18): 185013.
- [39] LI Zhu, DUAN Huizong, HUANG Xiangqing, et al. Design and performance test of the spaceborne laser in the TianQin-1 mission[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141: 107155.
- [40] LUO Ziren, ZHANG Min, JIN Gang, et al. Introduction of Chinese space-borne gravitational wave detection program Taiji and Taiji-1 satellite mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 3-10.  
罗子人,张敏,靳刚,等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极1号”在轨测试[J]. *深空探测学报*, 2020, 7(1): 3-10.
- [41] CAI Zhiming, DENG Jianfeng. Satellite architecture and preliminary in-orbit experiment of Taiji-1[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, 36(11&12): 2140020.
- [42] SUN Guangwei, CHEN Dijun, XIN Guofeng, et al. High stability laser source for Taiji-1 satellite[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, 36(11&12): 2140006.
- [43] YANG Zhongmin, XU Shanhu. Single-frequency fiber laser[M]. Beijing: Science Press, 2018.  
杨中民,徐善辉. 单频光纤激光器[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [44] BUCHLER B C, HUNTINGTON E H, HARB C C, et al. Feedback control of laser intensity noise[J]. *Physical Review A*, 1998, 57(2): 1286-1294.
- [45] ZHANG Qian, HOU Yubin, Qi Shuxian, et al. Low-noise single-frequency  $1.5\mu\text{m}$  fiber laser with a complex optical-feedback loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(2): 193-196.
- [46] DANION G, BONDU F, LOAS G, et al. GHz bandwidth noise eater hybrid optical amplifier: design guidelines[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4239-4242.
- [47] WILLKE B, UEHARA N, GUSTAFSON E K, et al. Spatial and temporal filtering of a 10-W Nd:YAG laser with a Fabry-Perot ring-cavity premode cleaner[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(21): 1704.
- [48] KANE T J. Intensity noise in diode pumped single frequency Nd YAG lasers and its control by electronic feedback[J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 1990, 2(4): 244-255.
- [49] BALL G A, HULL A G, HOLTON C, et al. Low noise single frequency linear fiber laser[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(18): 1623-1625.
- [50] ZHANG Jing, MA Hongliang, XIE Changde, et al. Suppression of intensity noise of a laser-diode-pumped single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser by optoelectronic control[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(6): 1068-1074.
- [51] KWEE P, WILLKE B, DANZMANN K. Shot-noise-limited laser power stabilization with a high-power photodiode array[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2912-2914.
- [52] JUNKER J, OPPERMAN P, WILLKE B, et al. Shot-noise-limited laser power stabilization for the AEI 10m Prototype interferometer[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 755-758.
- [53] ZHANG Le. Research on fiber-optic vibration sensor and SHG laser system with high frequency stability based on laser frequency locking technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.  
张乐. 基于激光锁频技术的光纤振动传感器和高稳定性倍频激光系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [54] MOSES E I, TANG C L. High-sensitivity laser wavelength-modulation spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 1977, 1(4): 115-117.
- [55] UMEDA N, TSUKIJI M, TAKASAKI H. Stabilized He<sup>3</sup>-Ne<sup>20</sup> transverse Zeeman laser[J]. *Applied Optics*, 1980: 19.
- [56] GALZERANO G, SVELTO C, FERRARIO F, et al. Frequency stabilization of a  $1.54\mu\text{m}$  Er-Yb laser against doppler-free <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> lines[J]. *Optics Communications*, 2002, 209(4): 411-416.

- [57] BLACK E D. An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization[J]. American Journal of Physics, 2000, 69(1): 79–87.
- [58] LIU Zhiqiang, LIU Jianli, ZHAI Zehui. Research and development of laser frequency stabilization technique[J]. Journal of Quantum Optics, 2018, 24(2): 228–236.  
刘志强, 刘建丽, 翟泽辉. 激光稳频技术的研究及进展[J]. 量子光学学报, 2018, 24(2): 228–236.
- [59] TAI Zhaoyang. Study on the key techniques of the 1.5  $\mu\text{m}$  cavity-stabilized ultra-stable laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 41–50.  
邵朝阳. 1.5  $\mu\text{m}$  腔稳超稳激光器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 41–50.
- [60] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. Applied Physics B, 1983, 31: 97–105.
- [61] BONDU F, FRITSCHEL P, MAN C N, et al. Ultrahigh-spectral-purity laser for the VIRGO experiment[J]. Optics Letters, 1996, 21(8): 582–584.
- [62] PETERSEIM M, BROZEK O S, DANZMANN K, et al. Laser development and laser stabilization for the space-borne gravitational wave detector LISA[M]. American Institute of Physics, 1998.
- [63] LUDLOW A D, HUANG X, NOTCUTT M, et al. Compact, thermal-noise-limited optical cavity for diode laser stabilization at  $1 \times 10^{-15}$ [J]. Optics Letters, 2007, 32(6): 641–643.
- [64] TRÖBS M, D'ARCIO L, HEINZEL G, et al. Frequency stabilization and actuator characterization of an ytterbium-doped distributed-feedback fiber laser for LISA[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(5): 1137–1140.
- [65] NICKLAUS K, BELLER N, FITZAU O, et al. High stability laser for next generation gravity missions [C]. International Conference on Space Optics, 2014, 10563:105632T.
- [66] DÖRINGSHOFF K, SCHULDT T, KOVALCHUK E V, et al. A flight-like absolute optical frequency reference based on iodine for laser systems at 1064 nm[J]. Applied physics B, 2017, 123(6): 181–183.
- [67] LUO Yingxin, LI Hongyin, LIANG Yurong, et al. A preliminary prototype of laser frequency stabilization for spaceborne interferometry missions[C]. European Frequency and Time Forum, 2016:1–4.
- [68] ZHANG Ji. Research on the noise measurement and suppression technology of fiber lase[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.  
张骥. 光纤激光器噪声测量与抑制技术[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [69] ARIE A, SCHILLER S, GUSTAFSON E K, et al. Absolute frequency stabilization of diode-laser-pumped Nd: YAG lasers to hyperfine transitions in molecular iodine[J]. Optics Letters, 1992, 17(17): 1204.
- [70] SUEMASE A, SHIMO O A, NAKAGAWA K, et al. Developments of high frequency and intensity stabilized lasers for space gravitational wave detector DECIGO/B-DECIGO[J]. CEAS Space Journal, 2017, 9(4): 1–7.
- [71] SCHKOLNIK V, DÖRINGSHOFF K, GUTSCH F B, et al. JOKARUS–Design of a compact optical iodine frequency reference for a sounding rocket mission[J]. EPJ Quantum Technology, 2017, 4(9): 1–10.

## Research Progress on Low-noise Laser for Space-based Gravitational Wave Detector (Invited)

LIU Qiang<sup>1,2</sup>, WANG Zaiyuan<sup>1,2</sup>, WANG Jiehao<sup>1,2</sup>, LI Yuhang<sup>1,2</sup>

(1 Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Key Laboratory of Photonic Control Technology (Tsinghua University), Ministry of Education, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Gravitational Waves (GWs) are ripples of space-time that propagate across the universe at the speed of light. GWs detection is one of the most important frontiers of physics today. Ground-based laser interferometer gravitational wave detectors, such as LIGO, Virgo and KAGRA, have successfully confirmed the existence of GWs. GWs have become a new window for a human to observe the universe. Due to the influence of ground vibration noise, terrestrial gravity gradient noise and other factors, ground-based detectors are not sensitive to GWs below 1 Hz. Space-based detectors are free from such noises and can be made very large, thereby expanding the frequency range downwards to  $10^{-4}$  Hz, where exciting GW sources are waiting to be explored. Space-based GW detectors are expected to bring even more information about the universe through low-frequency GWs. A highly stable and long-lifetime laser system is a key component of the space-based GW detector, and the output power, intensity noise, frequency

noise and other properties of the laser directly affect the sensitivity of the space-based GW detector. Thus, space-based GW detectors put forward much higher and stricter requirements for the laser. After widely experimental and industrial surveys, the baseline architecture for the laser for space-based GW detector consists of a low-power, low-noise master oscillator followed by a power amplifier with 2~10 W continuous-wave output. So, lasers consisting of a Master Oscillator and a Power Amplifier (MOPA) have been identified as the most-promising architecture for the space-based GW detector. In this review, we focused on the research progress of low-noise MOPA lasers in LISA, TianQin and Taiji missions. As in other applications of precision interferometry, 1064 nm was chosen as the laser wavelength, due to the availability of high-quality bulk optics and the traditional low-noise Nd:YAG laser source represented by the Non-Planar Ring Oscillator (NPRO). The performance of different MOPA lasers for LISA injected by NPRO (m-NPRO), fiber laser and External Cavity Diode Laser (ECDL) were compared, and the m-NPRO has been identified as the most-promising MO architecture for the LISA laser, and the baseline architecture consists of a low-power, low-noise m-NPRO followed by a diode-pumped Yb-fiber amplifier with ~2 W output. As for the Relative Intensity Noise (RIN), the m-NPRO meets the LISA requirement. As to the Chinese space-based GW detection projects, the research progress and spatial test results of lasers were elaborated. A DBR laser was designed for the TianQin-1 mission as the space laser in the laser interferometer, and was successfully verified in the TianQin-1 mission. The laser passed the environment performance verification under the aerospace standard. Meanwhile, a high stability laser source at 1064 nm for Taiji-1 satellite was reported. The key component of the laser source was a NonPlanar Ring Oscillator (NPRO) solid laser with linewidth of 260 Hz. The frequency noise and power noise of Laser source were greatly improved by applying precision driving current control and temperature control. Furthermore, around the requirements of the noise performance of lasers by space-based GW detectors, the principle and progress of intensity noise suppression and frequency noise suppression were described, and the main achievements of photoelectric feedback suppression technology for intensity noise suppression and PDH technology for frequency noise suppression were discussed respectively. We designed a laser system with the characteristics of narrow-linewidth, low-noise and polarization-maintaining. In our experiment setup, optoelectronic feedback suppression technology was used to suppress pump LD fluctuations using low-noise photodetectors and PID controller. In the frequency domain, the relative intensity noise is reduced at the level of  $10^{-3} \text{ Hz}^{-1/2}@1 \text{ mHz}$ . Finally, the research on low noise lasers for space-based GW detection in China is prospected, and the development direction of low noise lasers is proposed.

**Key words:** Space-based gravitational wave detector; Low-noise Laser; Master oscillator power amplifier; Intensity noise suppression; Frequency noise suppression

**OCIS Codes:** 270.3430; 060.2320; 380.3400; 140.3425