

# 激光器系统声音响应和隔音特性研究

王彦华<sup>1,2</sup>, 秦林<sup>1</sup>, 任欢<sup>1</sup>, 王军民<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006;

<sup>2</sup>量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006;

<sup>3</sup>山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

**摘要** 对于输出频率易受环境干扰的光栅外腔反馈半导体激光器, 在利用光栅和电流两通道反馈并进行动态特性优化后, 基于原子偏振光谱的无调制稳频系统可极大地抑制低频随机干扰引起的激光频率波动, 并使闭环谐振频率扩展到 155 kHz。此时稳频系统可将特征频率在 120 Hz 处的激光器频率干扰, 抑制到开环时的 1/13570。利用偏振光谱, 还可以测量原子跃迁线中心频率附近小范围内激光频率的起伏, 获得激光器对不同频率声致振动激励的声音响应特性, 并可对比研究激光器隔音机壳的隔音效果。实验表明, 隔音机壳对于不同频率的声音激励, 隔音效果可从 12.8 下降到 0.14。这可为机械结构和隔音系统的设计提供实验依据, 并可促进声音精密测量的发展。

**关键词** 测量; 声致振动; 隔音特性; 激光稳频; 声音传感

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0701004

## Acoustic Response and Sound Insulation Characteristics of Laser System

Wang Yanhua<sup>1,2</sup>, Qin Lin<sup>1</sup>, Ren Huan<sup>1</sup>, Wang Junmin<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>3</sup>Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

**Abstract** For grating-feedback extended-cavity diode laser (ECDL) whose output frequency is susceptible to environmental interference, with two channel feedback loops for grating and injection current, the frequency stabilization system based on modulation-free polarization spectroscopy is optimized. Its resonant frequency is extended to 155 kHz. The laser frequency fluctuation caused by low frequency random disturbance under open loop is greatly suppressed. It can be suppressed to 1/13570 at 120 Hz. Now that laser frequency fluctuation near the atomic transition center frequency can be measured by use of the polarization spectra, and the acoustic response characteristics of ECDL are depicted experimentally with the analysis of laser frequency fluctuation and sound stimulant signal. By contrasting the acoustic response characteristics of ECDL with or without the soundproofing case, the sound insulating effect could be mapped directly. Experiment results show that sound insulating effect resulted from different frequency can deteriorate from 12.8 to 0.14. The measurement of insulating effect can also act as the experimental criteria for optimizing the design of laser mechanical structures and sound insulation systems. Furthermore, this system could be helpful for the development of acoustic precise measurement.

**Key words** measurement; acoustic-induced vibration; sound insulation characteristics; laser frequency stabilization; sound sensing

**OCIS codes** 120.7280; 140.3425; 040.5570

收稿日期: 2018-01-02; 收到修改稿日期: 2018-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(11374198, 61475091, 61227902, 11774210)、山西省“1331 工程”重点学科建设计划

作者简介: 王彦华(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光技术方面的研究。

E-mail: wangyanhua@sxu.edu.cn

## 1 引 言

非电物理量的精确测量往往需要通过敏感元件将其大小的变化转换为电压或电流幅度信号,而且在信号处理过程中不可避免地存在噪音干扰,因此建立待测物理量同最终电信号频率的对应关系是实现高精度物理测量的基本手段<sup>[1]</sup>。而在诸如精密原子分子光谱学<sup>[2-3]</sup>、物理精密测量<sup>[4-5]</sup>和光场时域-频域精密控制<sup>[6]</sup>以及原子频标<sup>[7]</sup>等激光应用的研究工作中,可以将物理量的大小同激光的频率联系起来,因此压窄激光的线宽和提高频率稳定性成为改善测量精度的关键问题。通常,使激光器工作在恒温、隔振、密封隔音的环境可极大地改善激光器的频率稳定性,还可以利用原子跃迁线或光学谐振腔提供频率参考,通过饱和吸收光谱(SAS)、偏振光谱(PS)<sup>[8-9]</sup>或PDH(Pound-Drever-Hall)<sup>[10]</sup>稳频技术,建立负反馈环路,抑制系统的漂移和环境的干扰。近年来,激光器稳频和窄线宽技术的研究逐步逼近毫赫兹量级的肖洛-汤斯极限<sup>[11]</sup>,均得益于抑制声音、机械振动、热辐射效应等因素对激光器频率或频率参考腔的干扰<sup>[12-14]</sup>,配合负反馈环路,激光线宽可压窄至10 mHz<sup>[15]</sup>。但在实际使用中,偶然的声致振动或环境扰动带来的瞬态干扰不可预知,有时可能因扰动过大而破坏闭环反馈的动态平衡,所以激光器自身以及使用稳频闭环反馈后,激光输出频率对声音的响应特性亟待深入研究。

光栅外腔半导体激光器(ECDL)通过光栅反馈可实现频率连续调谐,但也因此使激光容易受到环境扰动的影响,对声音很敏感,便于研究激光器和稳频系统输出激光频率的声音响应和隔音特性。不巧的是声音扰动对激光器输出频率的影响往往同其他因素如室温变化、驱动源电学噪声以及机械振动等造成的干扰耦合在一起,特别是当声音的扰动同其他干扰影响程度相当时,声音响应特性区分度太差,难以独立表达。

为了准确研究、测量激光器输出频率对声音信号的响应特性,实验中,一方面通过分析激光器系统开环(激光器自由运转)及形成稳频闭环负反馈后的动态特性,优化稳频系统的闭环带宽,抑制了环境干扰对激光输出频率的影响;另一方面用音箱引入声音激励,使激光频率产生显著的声致起伏,从而提高声音响应相对于其他干扰的区分度。通过准确测量不同频率声音激励下激光器输出频率的波动,可获得激光器的声音响应特性;通过对比分析激光器有

无隔音机壳时对声致振动的响应差异,可获得隔音机壳的隔音特性。

## 2 激光器输出频率对声音扰动响应的实验测量系统

激光器系统受声致振动的干扰表现为激光频率波动幅度随声音激励的强度和频率的不同而变化。表征声音响应需要准确测定不同频率声音激励造成激光频率波动幅度的差异,获得幅(激光频率波动幅度)频响应特性。在实验中,需要解决两个关键问题:1)实验中激光器输出频率对除声音扰动外的其他因素不敏感,相对于其他干扰,声致振动的响应需有较高的区分度;2)在光频段激光频率波动需精确测量。

针对第一个问题,从激光器本身结构设计和稳频系统两个角度来解决。首先,激光器外腔选用柔性铰链结构,并利用3个可独立调节的面接触转动副<sup>[16]</sup>,提高了光栅调节机构的稳定性和准确性,减小了本身的频率漂移。此外,实验中构建了以铷原子超精细跃迁频率为参考,基于偏振光谱的无调制稳频闭环负反馈系统,并依据动态特性,通过光栅和电流两路反馈优化系统带宽,抑制无声音激励时低频段慢变的激光频率起伏。

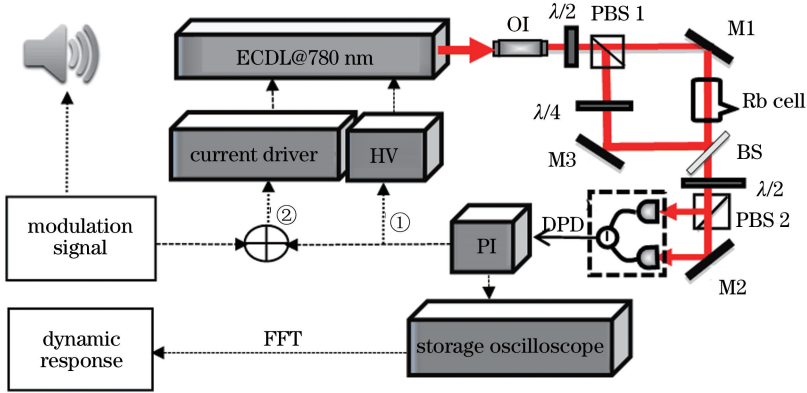
实验系统如图1所示。ECDL工作在780 nm铷原子D<sub>2</sub>线附近,将约310 μW的激光分成两路,其中一路经过1/4波片变换为圆偏振的抽运光通过铷原子气室,另一路线偏振的探测光同抽运光反向。如果原子未极化,差分探测器的输出为零。当抽运光频率在共振频率附近时,原子极化明显,探测光通过气室时左右旋分量的折射率或相位延迟不同,导致偏振面发生偏转,差分探测器不再平衡,最终获得铷原子的偏振光谱。

在原子共振频率附近的偏振光谱具有鉴频特性,可作为误差信号,在通过快速比例积分器处理后,用于无调制稳频环路的反馈校正<sup>[17-18]</sup>。对于ECDL激光器的稳频系统,通常以误差信号控制压电陶瓷来调整光栅角度,用于校正激光器的频率(如图1中①所示)。但受限于机械结构和压电陶瓷的响应速度,环路带宽通常仅在千赫兹量级。因此同时(如图1中②所示)以误差信号调制恒流源(Thorlabs LDC205C,3 dB带宽为150 kHz),改变激光二极管的注入电流,用于校正激光的频率,构建了响应速度更快的电流反馈环路。通过两反馈环路的协调配合可扩展系统带宽至十万赫兹量级。从而进一步增强了稳频环路对激光频率低频段干扰的抑

制,便于准确测量声音信号的响应特性。

利用偏振光谱的鉴频特性,组成测频系统,可实现共振频率附近激光频率波动的准确测量,解决第二个问题。在获取偏振光谱的同时,实验中还采集了饱和吸收光谱。如图 2 所示,蓝色的实线为偏振光谱,黑色虚线为<sup>87</sup>Rb 原子基态  $5S_{1/2} F_g = 2$  到  $5P_{3/2} F_e = 1, 2, 3$  激发态超精细跃迁的饱和吸收光谱。其中  $T_3$  对应<sup>87</sup>Rb 原子基态  $5S_{1/2} F_g = 2$  到

$5P_{3/2} F_e = 3$  超精细跃迁吸收峰,  $C_{2,3}$  表示  $5S_{1/2} F_g = 2$  到  $5P_{3/2} F_e = 2$  和  $5P_{3/2} F_e = 3$  的交叉线,这两个谱线的中心频率差为 133.4 MHz。据此可在  $T_3$  中心频率附近标定偏振光谱作为鉴频信号时的频率与电压的对应关系。图中鉴频信号的电压起伏范围为 37 mV, 鉴频曲线的对应的频率跨度约为 15.2 MHz, 最终获得基于偏振光谱的频率波动测频系统的标度因子为  $410 \text{ kHz} \cdot (\text{mV})^{-1}$ 。



① grating feedback loop with piezoelectric ceramics driven by the high voltage amplifier;

② current feedback loop formed by error signal going through the constant current source modulation port;

OI: optical isolator;  $\lambda/2$ : half wave plate;  $\lambda/4$ : quarter-wave plate; M1, M2, M3 are  $45^\circ$  high reflectivity mirrors; BS: beam splitter; PBS: polarized beam splitter; DPD: differential photoelectric detector; PI: proportional integral amplifier; HVA: high-voltage amplifier

图 1 测量声音响应特性的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for measuring response characteristics of sound signals

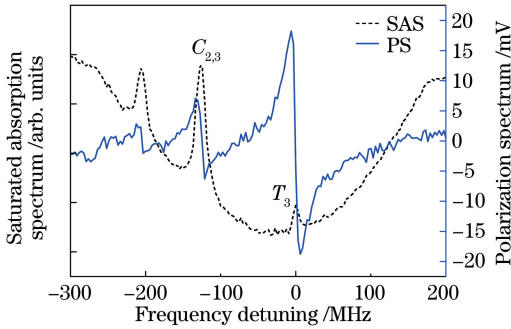


图 2 <sup>87</sup>Rb  $5S_{1/2} F_g = 2$  到  $5P_{3/2} F_e = 1, 2, 3$  偏振光谱 (蓝色实线) 以及饱和吸收谱 (黑色虚线)

Fig. 2 Polarization spectra (blue solid line) and corresponding saturated absorption spectrum (black dash line) of <sup>87</sup>Rb  $5S_{1/2} F_g = 2$  to  $5P_{3/2} F_e = 1, 2, 3$  transitions

实验中通过信号发生器输出正弦波,驱动非线性失真频率范围为 160 Hz~20 kHz 的音箱,产生正弦的声音激励。为避免音箱振膜导致的机械振动影响激光器,将音箱垂直悬挂在距离激光器 10 cm 的空中。整个实验过程中,激光频率锁定在<sup>87</sup>Rb  $5S_{1/2} F_g = 2$  到  $5P_{3/2} F_e = 3$  超精细跃迁共振频率附近,并参照标度因子,通过偏振光谱的起伏测量激光

频率波动幅度,从而可研究 ECDL 激光器系统在不同频率声音激励下的响应。

### 3 激光器稳频系统动态响应特性的优化

理想的声音激励响应测量系统不应受其他频率干扰因素的影响,或者只在较强的声音激励下才存在显著的激光频率波动,具有很好的声音响应区分度。因此相对于激光器自由运转的开环状态,优化的闭环稳频系统具有很大的优势。一方面它可以抑制无声音激励时外界因素引起的低频段激光频率波动,减弱系统的零输入响应;另一方面还可起到抑制系统漂移,保持测量过程系统一致性的作用。

如图 3 所示,ECDL 激光器稳频后,实验记录时间 10 s,激光频率的漂移从自由运转时约 10 MHz 抑制到小于 450 kHz。但是通过时域信号分析测定激光器频率起伏特征时,信号的电学噪声成为主要障碍。为了进一步表征并优化实验系统,还应从频域上进行分析,以动态特性指标——闭环带宽为判据,优化图 2 中两路(①光栅外腔和②激光二极管注入电流)频率校正环路的参数。



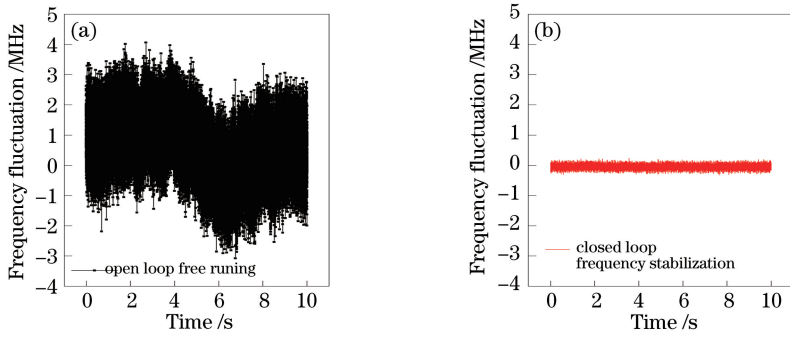


图 3 激光频率在自由运转及频率锁定后的时域起伏。(a)自由运转;(b)频率锁定

Fig. 3 Laser frequency fluctuation in time domain of open loop free-running and closed loop frequency stabilization.

(a) Under open loop free-running; (b) after loop frequency closing

在测定稳频系统闭环带宽时,传统的方案需要选用一系列正弦波作为系统的输入,调制激光二极管注入电流,对不同频率的响应分时测量,分析系统增益(激光频率波动幅度同电流调制信号幅度的比值)同信号频率的关系,获得增益的幅频特性曲线。本文采用频率成分丰富的方波信号输入系统,调制激光二极管注入电流<sup>[16]</sup>,一次性完成多个频点处系统响应的测量。

方波傅里叶变换的结果可表示为

$$f(t) = \frac{2A}{\pi} \left[ \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right], \quad (1)$$

式中: $A$  为方波的振幅; $\omega$  为方波的频率。显然,方波可等价于频率间隔为  $2\omega$ 、幅度随谐波次数增加而衰减的多个正弦单频信号的叠加。所以方波激励的恒流源相当于激光器的注入电流中含有多个正弦调制成分。此时系统经差分探测器可输出正比于激光频率起伏的偏振光谱信号,再结合标度因子,理论上可一次性得到方波各阶谐波频率处闭环稳频系统的响应,其频域的分辨率为方波频率的两倍。

通过快速傅里叶变换(FFT)对系统输入和输出的时域信号进行频谱分析,获得方波激励信号各阶谐波幅值以及系统在对应该频点处的响应(激光输出频率波动)。图 4 中每组的多个数据点就是在每次某一个频率的方波激励后,不同谐波电流激励的系统增益,即稳频系统的幅频增益。实验中每次的采样时间为 1 s,采样率为  $1 \text{ MSa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对应 FFT 频谱分析的频率分辨率为 1 Hz,最高分析频率为 500 kHz,可一次性高效测量系统动态响应特性。图中还给出了动态信号分析仪(SR785)的测量结果。

闭环动态特性的测量中,需要仔细选择作为激

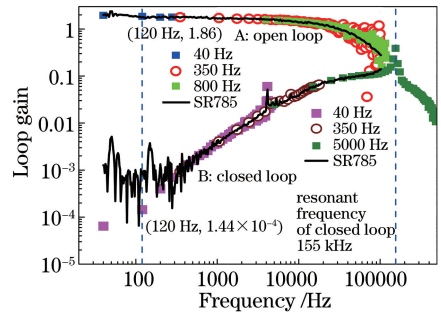


图 4 激光器系统开环及闭环增益的幅频特性

(离散数据点为方波扰动激励的测量结果,黑色实线为 SR785 的对比测量结果)

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristics under open loop and closed loop of laser system. Scatter line shows measured results of square wave modulation and black line shows that of dynamic signal analyzer SR785

光器频率扰动激励的方波振幅和频率。从(1)式可知,高阶谐波分量的幅度随着阶次的增加而衰减,例如在分析频率为方波 100 倍谐波时,谐波分量的强度只有基频的百分之一。如果方波的振幅过小,系统对同样阶次谐波的响应信噪比变差,易被噪声淹没,导致测量失真。所以图 4 中利用 40 Hz 和 350 Hz 的方波测量时,分析频率大于 30 kHz 后增益出现了较大的起伏。反之,如果方波扰动的幅度过大,低阶谐波对激光频率的扰动幅度过大,就可能使激光频率相对于偏振光谱中心频率失谐过大,超出偏振光谱测量频率波动的线性响应区,导致测量失真,或超出偏振光谱的线宽,破坏闭环反馈。实验中最终选择了振幅为 70 mV 的方波来测量动态响应。同时,幅频特性曲线相邻数据点的频率间隔是方波基频的两倍,选择方波的频率时应考虑响应特性的频率分辨率需求。因此这个方波激励的方案中,需要平衡频率分辨率和高频区信噪比两个需求。所以在实验过程中选择不同频率的方波,以实现对



系统动态特性的准确测量。图 4 中实验对比了用 40, 350, 800 Hz 以及 5 kHz 多个不同频率激励方波测量开环或闭环特性的效果,测得的特性曲线频率分辨率分别为 80, 700 Hz 以及 1.6, 10 kHz。

在此基础上,实验中改变图 2 中①光栅外腔和②激光二极管注入电流两路激光频率校正环路的相对增益以及比例积分放大器(PI)参数,可优化增益曲线带宽。经过参数优化后,系统的谐振频率为 155 kHz。此时系统带宽主要受限于恒流源 3 dB 带宽为 150 kHz 的调制特性。

闭环反馈后稳频系统对低频段激光频率起伏的抑制效果可通过对比激光器开环和闭环的幅频增益特性来体现。从图 4 中可发现,开环系统对低频段的频率扰动有显著响应,随着频率的增大,增益逐渐减小。而闭环系统对扰动的抑制作用非常明显。图 4 中 120 Hz 处,同样的电流扰动信号,开环增益为 1.86,稳频环路闭环反馈后增益为  $1.44 \times 10^{-4}$ 。于是经过两通道稳频反馈校正和环路带宽优化后,稳频系统可将特征频率为 120 Hz 处的激光器低频频率起伏抑制到开环时的 1/13570。

为了对比方波激励分析增益特性的效果,实验中还专门利用 SR785 测量了系统增益特性,SR785 输出的激励信号连接到激光器恒流源的调制端口,并分析获得的偏振光谱信号。如图 4 中黑色实线所示,频率小于 100 kHz 的测量结果吻合得很好。由于受限于 102 kHz 的最高分析频率,SR785 的结果未能表征闭环系统的谐振频率和带宽信息。另外,

同方波测量的结果相比,SR785 所测增益在低频区有起伏。这是因为方波激励测量时,采样时间为 1 s,每个频点的数据其实都是通过 FFT 分析整个 1 s 内所有测量数据后的结果。SR785 测量时为分时扫频,即不同的频率点测量对应的是系统在不同时间的响应。因此对于 120 Hz 附近的这些数据,相对于 SR785,方波激励的测量结果在低频区曲线平滑,起伏较小。

#### 4 激光频率对外界声音激励的响应特性测量与分析

利用信号发生器输出正弦波驱动音箱产生单频声音激励,并根据偏振光谱在中心频率附近的信号同激光频率波动幅度近似的线性关系,分析激光器在该频率处的声音响应。基于带宽优化的闭环稳频系统,减小了声音响应测量系统的零输入响应,提高了测量的信噪比。

图 5(a)为无隔音机壳时,以 1200 Hz, 700 mV 的正弦波驱动音箱,激光频率随时间变化的信号;图 5(b)为对该信号进行 FFT 变换后的频谱,此时在 1200 Hz 处,信号振幅约 0.549 mV,根据标度因子  $410 \text{ kHz} \cdot (\text{mV})^{-1}$  可知,激光频率波动的幅度约为 225 kHz。此时在 1200 Hz 附近,测量噪声等效的激光频率波动幅度约为 500 Hz,所以在 1200 Hz 频率附近声音响应测量系统可以分辨出导致激光器频率波动大于 500 Hz 的声音,本次测量的信噪比  $225 \text{ kHz}/500 \text{ Hz}$ ,约为 450。

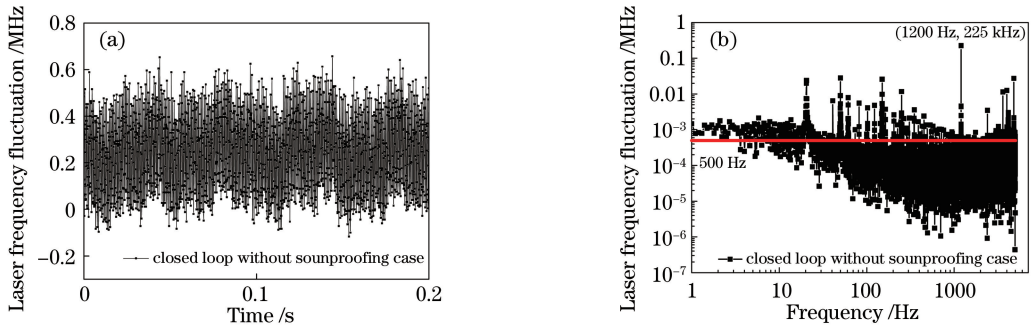


图 5 (a)频率为 1200 Hz 的声致振动激励下激光频率的波动;(b)激光器频率波动信号的频谱  
Fig. 5 (a) Laser frequency fluctuation with 1200 Hz sound stimulant signal;  
(b) frequency spectrum for laser frequency fluctuation signal

图 6 记录了不同频率声音激励下的激光频率波动幅度,其中 A 组数据为加上隔音机壳后激光频率波动幅度,B 组为没有隔音机壳的情况,从而分别获得了有无铝制隔音机壳时激光器的声音响应特性。

表征材料或部件的隔音效果一般需要对比输入

输出声音信号的声压级或声强级。本实验以激光器系统作为声音响应的传感装置,将声音信号的扰动转化为激光器频率的起伏,因此隔音前后的声音响应特性可直观地通过频率起伏的差别来体现。图 6 中,对应同一声音激励频率,B/A 就可以体现隔音

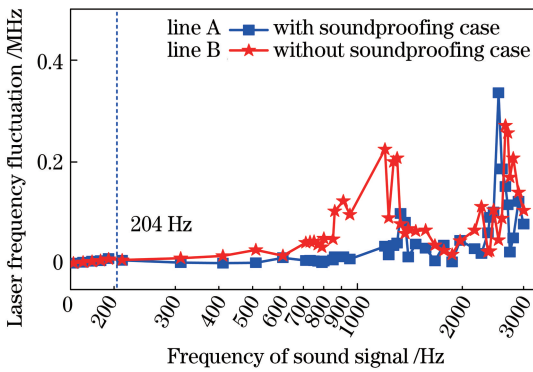


图 6 激光器输出频率波动幅度对不同频率声音激励的响应特性

Fig. 6 Acoustic response characteristics of laser frequency fluctuation to sound stimulant signal

效果,如图 7 所示。B/A 大于 1,说明隔音有效,声致振动对激光频率的影响被抑制;B/A 等于或小于 1,说明隔音失效。

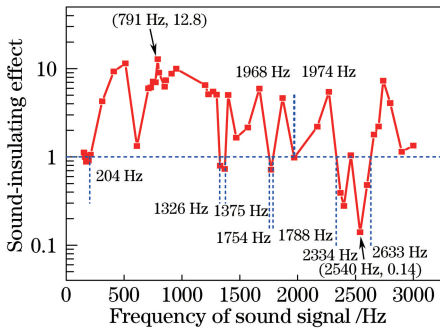


图 7 不同频率声音激励的隔音特性

Fig. 7 Sound-insulating effect of different soundproofing cases

图 6 和图 7 的结果表明:1)小于 204 Hz 的低频声音激励,铝制机壳没有明显的隔音效果;2)频率在 204~1326 Hz 范围的激励,机壳隔音效果较为明显。其中对频率为 791 Hz 的声音激励,隔音效果最好。隔音前后激光频率波动幅度之比为 12.8,即隔音机壳使声音激励削弱为原来的 7.8%;3)特别值得

关注的是在 1326 ~ 1375 Hz、1754 ~ 1788 Hz、1968 ~ 1974 Hz 以及 2334 ~ 2633 Hz 等频段内,声音激励的响应增强(见图 7),隔音效果显著恶化。如在频率为 2540 Hz 处的隔音效果最差,隔音前后激光频率波动幅度之比为 0.14,即加上隔音机壳后使声音响应增强了 7.1 倍。所以在加上隔音机壳后对不同频率的声音激励,激光器的响应从 12.8 降为 0.14。

通常,温度为  $T$  的空气中声音的传播速度为:  $v = 331 + 0.6T$  ( $m \cdot s^{-1}$ ),实验时环境温度约  $30^\circ C$ ,该条件下的声音的传播速度约为  $349 m \cdot s^{-1}$ ,据此可得到此时不同频率声音的波长。表 1 中列出了隔音变差的激励频率及对应的声音波长和半波长。这些频点的声音半波长分别对应图 8 中的几个特征尺寸。其中 127,111,100 mm 是光栅调节机构的特征尺寸,74,90 mm 是铝制机壳的结构尺寸。此时,激光器内出现声频的谐振共鸣,使得声致振动的影响增强。显然,隔音机壳的机械结构不合理可导致声音响应增强。因此,激光器隔音机壳内部尺寸和表面结构设计非常重要,如果将表面设计成非平面结构,并避免构成对于声音振动及环境扰动的特征频率的谐振,则可有效抑制声音振动及环境扰动对激光频率的干扰,提高激光器系统的长期稳定性。

表 1 隔音失效的声音波长与机械结构尺寸

Table 1 Mechanical structure dimensions with regard to sound wavelengths when the sound insulation is invalid

Sound Frequency /Hz	1370	1770	1970	2370
Wavelength /mm	254.7	197.2	177.2	147.3
Half wavelength /mm	127.4	98.6	88.6	73.6
Dimensions of soundproofing case /mm	127.0	100.0	90.0	74.0

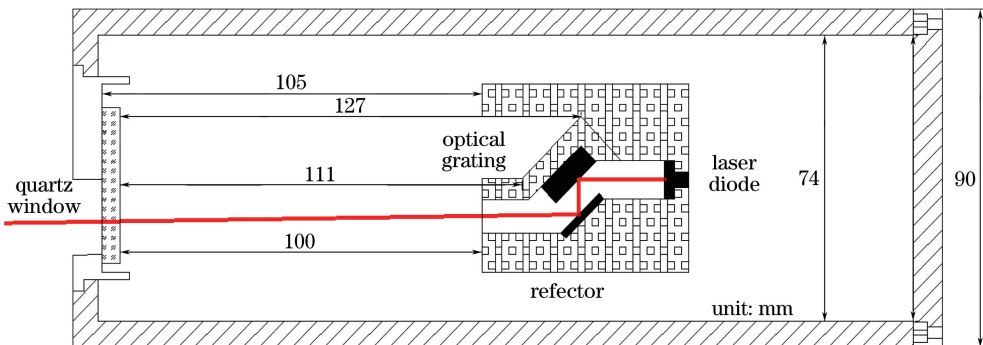


图 8 激光器机械结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of laser mechanical structure

## 5 结 论

基于偏振光谱稳频系统实现了激光器对声致振动响应的测量。实验中利用方波扰动系统测量闭环的动态特性,并据此优化环路参数,获得了十万赫兹量级的闭环带宽,有效抑制了环境的干扰。以音箱作为人为加载的声音激励源,可测量激光器频率波动随激励声音频率变化的响应特性。在此基础上,分析铝制隔音机壳对不同频率声音隔音效果的差异,实验结果同基于隔音机壳结构分析的结论相符合。因此该实验方案用来分析机械结构或材料的声音响应特性,可为隔音系统提供具体的实验判据。鉴于此,系统能够通过激光的频率波动表征声致振动的信息,可作为实现声音激光传感的一种方法。在此基础上还可以研究声致振动下激光的频率噪声和量子起伏,有望实现声音的精密测量和量子传感。

## 参 考 文 献

- [1] Hänsch T W. Nobel lecture: passion for precision [J]. *Review of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1297-1309.
- [2] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, *et al.* Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000, 288(5466): 635-639.
- [3] Hu Y X, Zhao N J, Gan T T, *et al.* An analytical model for multi-wavelength transmittance spectra of bacteria in water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0830001.  
胡玉霞, 赵南京, 甘婷婷, 等. 水体细菌微生物多波长透射光谱解析模型 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0830001.
- [4] Turyshev S G. Experimental tests of general relativity: recent progress and future directions [J]. *Physics-Uspokhi*, 2009, 52(1): 3-34.
- [5] Ying Z H, Gao C F, Wang Q, *et al.* Application of high-accuracy laser doppler velocimeter in self-contained land navigation system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204003.  
应智慧, 高春峰, 王琦, 等. 高精度激光多普勒测速仪在陆用自主导航系统中的应用 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204003.
- [6] Kourogi M, Nakagawa K, Ohtsu M. Wide-span optical frequency comb generator for accurate optical frequency difference measurement [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(10): 2693-2701.
- [7] Rafac R J, Young B C, Beall J A, *et al.* Sub-dekahertz ultraviolet spectroscopy of  $199\text{Hg}^+$  [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(12): 2462-2465.
- [8] Wang J, Gao J, Yang B D, *et al.* Comparison of frequency locking of 780 nm diode laser via rubidium saturated absorption and polarization spectroscopies [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 305-312.  
王杰, 高静, 杨保东, 等. 铷原子饱和吸收光谱与偏振光谱对 780 nm 半导体激光器稳频的比较 [J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 305-312.
- [9] Wieman C, Hänsch T W. Doppler-free laser polarization spectroscopy [J]. *Physical Review Letters*, 1976, 36(20): 1170-1173.
- [10] 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(2): 97-105.
- [11] Schawlow A L, Townes C H. Infrared and optical masers [J]. *Physical Review*, 1958, 112(6): 1940-1949.
- [12] Jiao D D, Gao J, Liu J, *et al.* Development and application of communication band narrow linewidth lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(19): 0190601.  
焦东东, 高静, 刘杰, 等. 用于光频传递的通信波段窄线宽激光器研制及应用 [J]. *物理学报*, 2015, 64(19): 0190601.
- [13] Wu L F, Jiang Y L, Ma C Q, *et al.* 0.26-Hz linewidth ultrastable lasers at 1557 nm [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24969.
- [14] Kessler T, Hagemann C, Grebing C, *et al.* A sub-40 mHz linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 687-692.
- [15] Matei D G, Legero T, Häfner S, *et al.* 1.5  $\mu\text{m}$  lasers with sub-10 mHz linewidth [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(26): 263202.
- [16] Qin L J, Qin L, Wang Y H, *et al.* Dynamic response of the grating-feedback external cavity diode laser and frequency stabilization system [J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2017, 40(4): 789-796.  
秦利娟, 秦林, 王彦华, 等. 光栅外腔反馈半导体激光器及稳频系统的动态特性测试 [J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(4): 789-796.
- [17] Yoshikawa Y, Umeki T, Mukae T, *et al.* Frequency stabilization of a laser diode with use of light-induced birefringence in an atomic vapor [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(33): 6645-6649.
- [18] Pearman C P, Adams C S, Cox S G, *et al.* Polarization spectroscopy of a closed atomic transition: applications to laser frequency locking [J]. *Journal of Physics B: Atomic Molecular & Optical Physics*, 2002, 35(24): 5141-5151.